



Association pour la Relance Agronomique en Alsace
Schiltigheim
67013 Strasbourg cedex

Master 2
Génie Agronomique et Alimentaire
68000 Colmar

Rapport de stage de fin d'études (Du 31 Janvier 2011 au 29 Juillet 2011)

Détermination des paramètres hydrodynamiques des sols alsaciens en fonction des techniques culturales



Lucile Winterer
Responsable pédagogique : Mme Isabelle Soustre-Gacougnolle
Maître de stage : M. Paul van Dijk

Année scolaire : 2010/2011

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier M. Rémi Koller, directeur de l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace, de m'avoir accueilli au sein de son établissement.

J'exprime ma gratitude à M. Paul van Dijk, docteur en géographie physique, de m'avoir encadré pendant mon stage et de m'avoir permis de mener à bien ma mission de stage. Je le remercie de m'avoir fait partager ses connaissances.

J'adresse mes remerciements à l'ensemble des personnes qui m'ont aidé à la réalisation de mes expérimentations et plus particulièrement Anne-Véronique Auzet, professeur d'université à l'Université de Strasbourg, pour ses précieux conseils pour la mise en place des mesures et surtout pour le fonctionnement du TRIMS sur le terrain.

Je remercie également Martine Trautmann, gestionnaire du laboratoire d'analyses des sols et des formations superficielles, de m'avoir accueilli au laboratoire pour réaliser différentes analyses de caractérisation des sites étudiés et pour son accueil.

Un grand merci à l'ensemble de l'équipe INRA Agriculture Durable pour son accueil et sa gentillesse et plus particulièrement à M.Chapot, ingénieur de recherche, pour ses conseils et ses connaissances sur le TRIMS et les résultats.

Merci à Sandie Masson, stagiaire de licence, pour son aide lors de ma première campagne de mesure.

SOMMAIRE

Remerciements

Liste des abréviations

Glossaire

I. INTRODUCTION	1
II. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE	3
III. ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR L'INFILTRABILITE EN FONCTION DU TRAVAIL DU SOL.....	4
1) Importance de l'infiltration dans la problématique liée au ruissellement.....	4
2) Le processus d'infiltration et les facteurs déterminants	4
a) Perméabilité du profil du sol	4
b) Les états de surface.....	5
c) L'humidité du sol	5
3) La description quantitative de l'état hydrique du sol et de l'infiltrabilité	5
a) Les paramètres hydrodynamiques du sol.....	5
b) Equations à base physique de l'infiltrabilité.....	6
c) Les paramètres hydrodynamiques à déterminer sur les essais.....	7
4) Incidence du travail du sol sur l'infiltration	7
a) L'impact du travail du sol.....	7
b) Etats des connaissances à l'échelle régionale	9
IV. SITES D'ETUDES ET MATERIELS ET METHODES DE MESURE.....	10
1) Différents sites en Alsace et deux campagnes	10
a) Pourquoi différents sites ?	10
b) Pourquoi deux campagnes de mesures ?	11
c) Bref historique des sites.....	11
2) Matériels et méthodes de mesure d'infiltration in situ.....	12
a) Choix des méthodes.....	12
b) Mesures de la densité apparente et des humidités initiales et finales	12
c) L'infiltromètre à disques	13
d) Beerkan.....	16
V. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	18
1) Résultats bruts et estimation des paramètres	18
2) Comparaisons culture d'hiver/culture printemps	19
3) Evolution des paramètres DA , θ_i et θ_s	19
4) Evolution des paramètres pour les cultures de printemps.....	20
5) Evolution des paramètres pour les cultures d'hiver.....	21
6) Discussion concernant les méthodes de mesure	22
VI. CONCLUSION	25

Bibliographie

Annexes

LISTE DES ABREVIATIONS

ARAA : Association pour la Relance Agronomique en Alsace

BEST: Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters

CEB : Coulée d'Eau Boueuse

DA : Densité Apparente

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EDS : Etats De Surface

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

LISEM : Limbourg Soil Erosion Model

TCSL : Technique Culturelle Sans Labour

SD: Semis Direct

SPSS: Statistical Package for the Social Sciences

GLOSSAIRE

Assolement concerté : assolement mis en place par le biais d'une concertation entre les agriculteurs. Dans le contexte de la lutte contre l'érosion, cette concertation a pour but d'arriver à une répartition hétérogène des couverts végétaux qui permet de réduire les transferts des sédiments dans le bassin versant

Bassin versant : « un territoire délimité par des lignes de crête dont les eaux alimentent un exutoire commun »

Charge (d'eau) : la hauteur d'eau sur la surface du sol ; elle influence sur la vitesse d'infiltration

Coulée d'eau boueuse (CEB) : écoulement d'eau fortement chargée en terre. Elle résulte du ruissellement des eaux pluviales sur des surfaces érodibles

Croûte de battance : une fine couche qui se forme à la surface du sol suite à la désagrégation des agrégats sous l'action des pluies où la porosité est très réduite et la densité apparente est plus importante

Erosion hydrique : « détachement et transport des particules de terre en conséquence du ruissellement lorsque l'eau de pluie ne s'infiltré plus entièrement dans le sol »

Eutrophisation : dégradation de la qualité des eaux continentales, provoquée par des apports excessifs d'éléments minéraux (phosphates et nitrates en particulier)

Fascine : un obstacle perméable constitué de fagots entre deux rangées de pieux afin de réaliser un écran de branchages en travers du ruissellement. Elle freine les ruissellements sans créer de zone inondable et piège les sédiments transportés par le ruissellement

Potentiel hydrique (ou tension de succion) du sol : le travail nécessaire pour extraire l'eau de la matrice du sol qui tend à retenir l'eau grâce aux forces d'adsorption, de capillarité et d'osmose. En milieu non saturé la pression effective de l'eau est négative. Le potentiel hydrique du sol dépend de sa texture, de la taille des pores et de la quantité d'eau contenue par rapport à sa capacité de champ.

Talweg : (mot d'origine allemande) la ligne joignant les plus bas points des sections transversales successives d'une vallée ou plus simplement le « chemin » de la vallée

Sensibilité à l'érosion à la maille (20m)

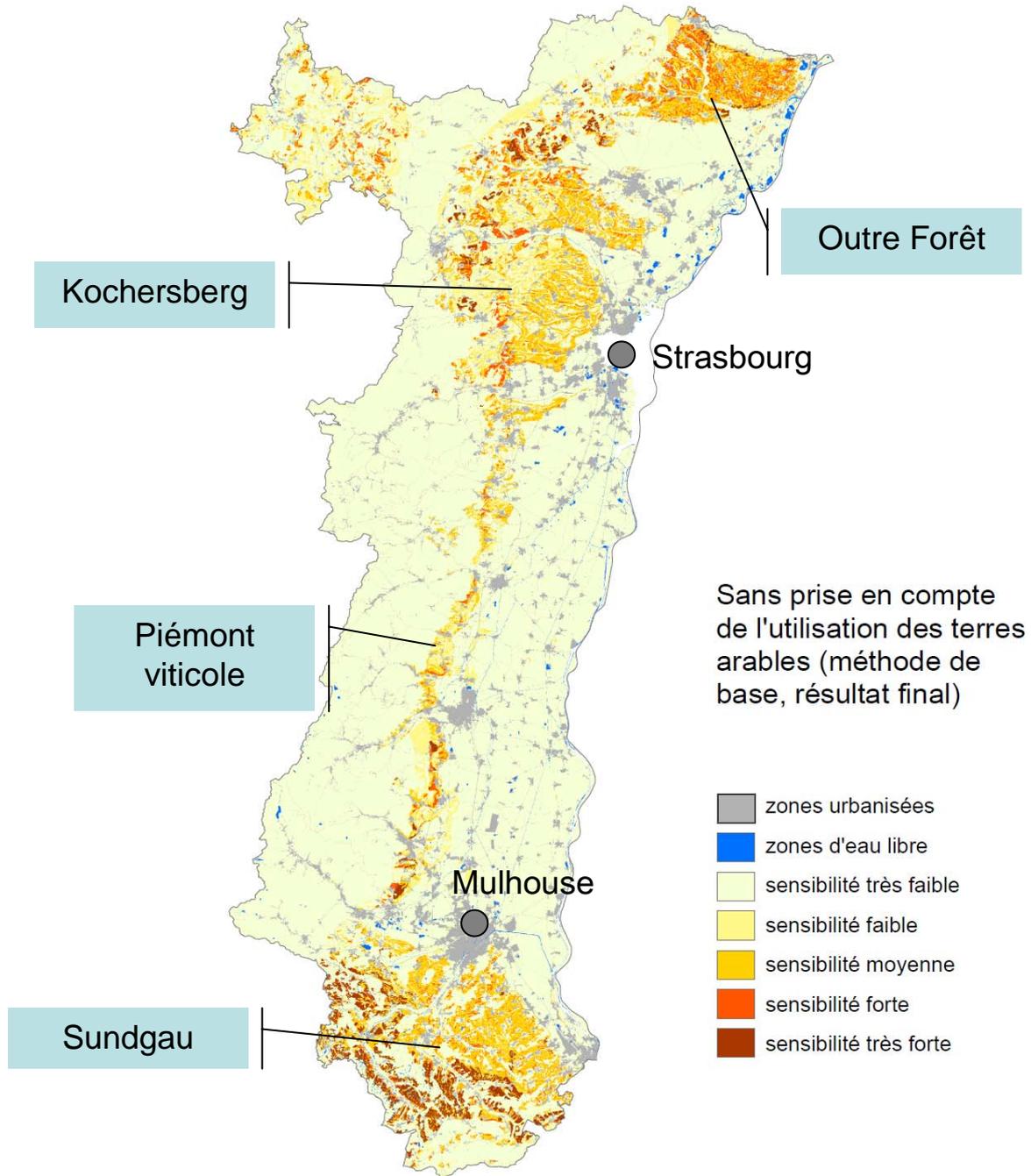


Figure 1 : Carte de la sensibilité à l'érosion en Alsace

I. Introduction

Contexte

Considérée comme une sérieuse menace par la Commission Européenne, l'érosion des sols est responsable de perte de terre non négligeable (environ 25 milliards de tonnes/an à l'échelle mondiale) (**Ministère de l'Environnement**).

L'érosion est un phénomène naturel causée par le vent et / ou les précipitations qui entraîne une modification des surfaces et un transfert de matériaux. **L'érosion hydrique** se caractérise par des ruissellements d'eau chargés de matières, appelés coulées de boues (ou coulées d'eaux boueuses, **CEB**) dans les formes les plus extrêmes. Plusieurs facteurs influencent la sensibilité des sols à l'érosion, notamment la pédologie (les sols limoneux sont plus sensibles), la topographie (les pentes et les **talwegs** sont sensibles), l'intensité des pluies et la couverture végétale (**Ifen (1998), Ministère de l'Environnement**).

En Alsace, les zones géographiques les plus touchées sont les parcelles viticoles sur les coteaux du Piémont vosgien (mais l'effet de l'enherbement permet de diminuer considérablement le risque), le Sundgau, le Kochersberg, et l'Outre Forêt, (**Auzet et al., 2005 ; Van Dijk et al., 2009**) (Figure 1). Ces trois dernières zones présentent des facteurs élevés de sensibilité à l'érosion : parcelles limoneuses en pente, pendant la période des forts orages de printemps et de début d'été les parcelles en culture de printemps (maïs) n'ont pas ou ont une faible couverture du sol. Dans ces localités, des CEB peuvent se produire lors des violents orages de printemps et d'été et entraînent de nombreux dégâts. Ces dégâts sont préjudiciables pour tous sinistrés des CEB :

- les exploitants : dommages directs à la culture (déchaussement et l'arrachement des plantes en amont), dommages sur le semis et les jeunes plantes dans les zones de dépôt en aval, perte du capital sol qui conduit souvent à une diminution des rendements, dommages aux infrastructures rurales;
- les habitations et les infrastructures en aval (inondations);
- le milieu naturel : cours d'eaux chargés en particules, en phytosanitaires, en fertilisants pouvant entraîner une **eutrophisation** des milieux aquatiques ;

Afin de réduire ces dommages, des actions et des mesures peuvent être mises en place :

- des mesures « surfaciques » pour diminuer la production et le démarrage du ruissellement, et pour augmenter la résistance du sol aux forces érosives ;
- des mesures sur les chemins du ruissellement en général (**fascines**) et aussi en aval pour intercepter et diminuer l'intensité des flux (bassins de rétention).

Une autre action très importante pour limiter les conséquences des CEB concernerait l'aménagement urbain afin d'éviter de nouvelles constructions dans les zones sensibles.

Les mesures « surfaciques » concernent par définition les agriculteurs. Pour être le plus efficace possible, plusieurs mesures « surfaciques » sont envisageables et nécessitent une collaboration entre

exploitants et acteurs locaux. Ainsi les chambres d'agriculture d'Alsace sont fortement impliquées dans la lutte contre l'érosion. Elles proposent plusieurs mesures : des **assolements concertés** et/ ou le recours aux techniques culturales sans labour (TCSL).

L'association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA) intervient dans l'identification des zones les plus vulnérables (**DREAL Alsace**, 2007) et l'estimation de l'efficacité des actions prioritaires dans la lutte contre l'érosion. L'ensemble de ces données est cartographié (**ARAA**).

Le recours au modèle informatique permet de simuler l'implantation et le fonctionnement de divers moyens de luttés à l'échelle du bassin. Il est nécessaire d'estimer au plus juste le ruissellement dans un **bassin versant** afin que les conseillers, techniciens et exploitants puissent mettre en œuvre les moyens les plus adéquats. Les moyens de lutte testés sont multiples : des choix culturaux (couvert végétal, culture d'hiver), des techniques culturales sans labour (TCSL, semis direct : SD) ou des structures linéaires (bandes enherbées, fascines).

Objectifs du stage

Afin de simuler au plus près de la réalité, il est important que les paramètres du modèle employé soient les plus précis possibles ; une erreur de modélisation peut entraîner des erreurs d'estimation autant préjudiciables que la non simulation. Dans le modèle utilisé, le ruissellement est principalement conditionné par les paramètres de l'infiltrabilité. Pour le moment, les données régionales existantes ne permettent pas le paramétrage de toutes les situations rencontrées dans les bassins versants. Les objectifs de mon étude sont de mieux connaître, afin d'enrichir le référentiel régional, les paramètres hydrodynamiques pendant la période à risques élevés d'érosion (avril à juin) pour :

- a) les différentes techniques culturales, notamment le travail sans labour et le semis direct, par rapport au travail du sol conventionnel avec labour ;
- b) les cultures d'hiver (semées à l'automne), souvent utilisées dans les assolements concertés proposés par les chambres d'agriculture, par rapport aux cultures de printemps.

L'étude va également servir au paramétrage de l'indicateur de ruissellement en cours de développement à l'ARAA en collaboration avec l'institut national de la recherche agronomique (INRA) de Colmar.

Les mesures d'infiltrabilité ne font pas encore partie du programme d'activité habituel de l'ARAA. C'est pourquoi l'étude intègre une partie méthodologique importante : recherche des méthodes de mesure d'infiltrabilité et des méthodes d'analyse des résultats. Le but est de préconiser la méthode la plus adaptée aux besoins de l'ARAA, elle sera mise en œuvre dans les années à venir pour compléter le référentiel agronomique lié à l'infiltrabilité.

Le stage de Sandie Masson (**Masson**, 2011) effectué en parallèle avec le mien m'a permis d'obtenir des données complémentaires ; collectées le même jour et sur les mêmes sites que moi ; sur les états de surface et les paramètres d'érodibilité. Ces résultats sont nécessaires pour mon interprétation des mesures d'infiltrabilité lors de ma soutenance.

II. Présentation de l'entreprise

Créée en 1984, l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace travaille au développement de la recherche appliquée et sert d'appui technique et agronomique aux différents acteurs agricoles régionaux pour répondre aux enjeux du contexte alsacien.

Son activité s'articule autour de deux principaux programmes complémentaires permettant un lien entre la recherche fondamentale agronomique et les utilisateurs (exploitants, conseillers, techniciens) :

- un programme agronomique régional, d'appui technique au conseil agricole ;
- un programme de Recherche et Développement via un partenariat avec l'INRA de Colmar.

Soucieuse de développer une agriculture durable en Alsace, les activités de l'ARAA tentent d'apporter des réponses aux questions actuelles, sur :

- la production et la qualité des cultures
- la qualité des eaux
- la qualité des sols

Les travaux de l'ARAA sont organisés en quatre missions :

- renforcer et mettre en valeur la connaissance des sols régionaux
- élaborer de nouvelles références techniques via l'expérimentation
- évaluer et prévoir les impacts des pratiques agricoles sur le milieu
- développer les échanges et la coopération transfrontalière.
-

Ces différentes missions s'inscrivent dans le cadre de la préservation des milieux (les sols contre l'érosion, l'eau contre les pollutions) et le maintien de la production de qualité.

Les différentes missions de l'ARAA sont définies avec les professionnels de l'agriculture comme les chambres d'agriculture du Bas-Rhin et du Haut-rhin ainsi qu'avec les acteurs institutionnels (Agence de l'eau Rhin-Meuse, la Région Alsace et les services régionaux de l'état.

Ma mission s'inscrit dans la thématique de travail de l'ARAA « Ruissellement et érosion » (**ARAA**).

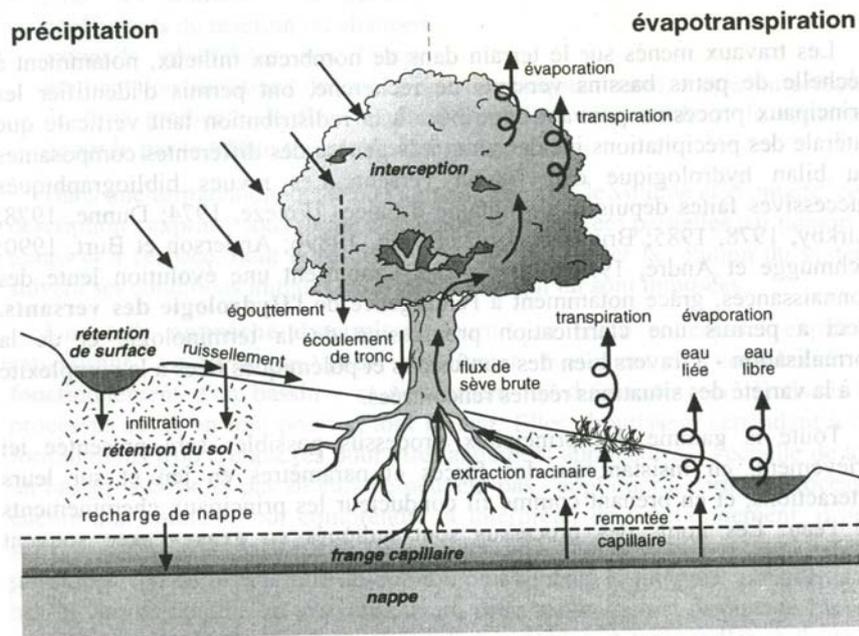


Figure 2 : L'eau dans le système sol-plante-atmosphère : principaux processus et réservoirs (Ambroise, 1999)

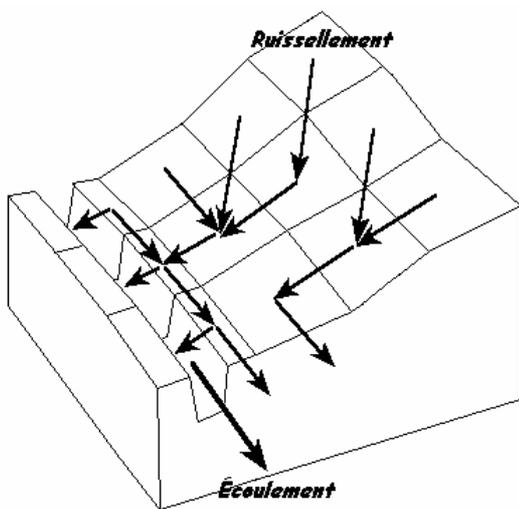


Figure 3 : Phénomène d'accumulation des flux dans le paysage lié à la topographie (issu du manuel de LISEM)

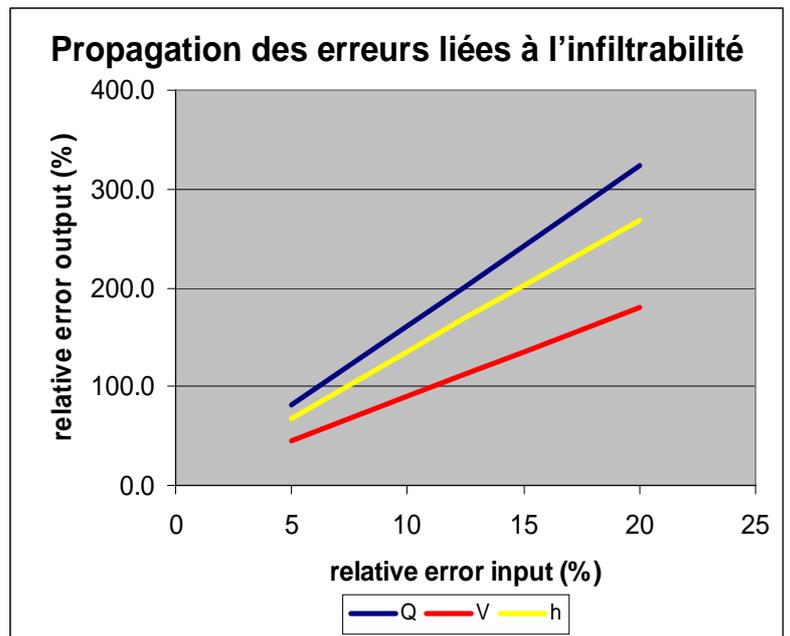


Figure 4 : Propagation des erreurs liées à l'infiltrabilité. (Q = débit, V = vitesse d'écoulement, h = hauteur de l'eau de ruissellement) issue de la présentation de Govers et Jetten, 2001)

III. État des connaissances sur l'infiltrabilité en fonction du travail du sol.

1) *Importance de l'infiltration dans la problématique liée au ruissellement.*

Les principaux apports d'eau naturelle à la surface sont des précipitations liquides (pluie) ou solides (neige). La totalité des précipitations ne rentrent pas en contact avec la surface du sol. Une partie des précipitations est **interceptée** par la végétation (Figure 2). Quant à l'eau qui atteint la surface, elle sera soit **évapotranspirée** dans l'atmosphère sous le rayonnement solaire soit infiltrée ou sera retenue en surface dans les microreliefs (**Ambroise, 1999**). Une fois que l'eau ne peut ni s'infiltrer ni être retenue en surface, alors il va se produire un ruissellement de surface. A l'échelle d'un événement pluvieux, le facteur déterminant pour la production de ruissellement est l'infiltration. L'évapotranspiration, l'interception et la rétention en surface sont souvent beaucoup plus faibles.

L'infiltration d'un sol varie dans l'espace et dans le temps. La production du ruissellement est marquée sur les parcelles en pente ayant une faible infiltrabilité. L'eau de ruissellement se concentre au fur et à mesure de son écoulement vers l'aval dans le bassin versant. Le niveau de débit mesuré en l'aval est très sensible à l'infiltrabilité des surfaces en amont. Aussi, l'erreur du débit simulé avec un modèle d'érosion est tout d'abord déterminée par la qualité de l'estimation de l'infiltrabilité (Figure 3 et 4).

2) *Le processus d'infiltration et les facteurs déterminants*

L'infiltration se définit comme le processus de pénétration de l'eau (précipitations ou submersion) dans le sol à travers sa surface (**Soutter et al., 2007**). L'infiltrabilité du sol (ou capacité d'infiltration, d'absorption) se définit comme « le flux d'eau maximal que le sol est capable d'absorber à travers sa surface, lorsqu'il reçoit une pluie efficace ou s'il est recouvert d'eau » ⁽³⁾. Quand l'infiltrabilité maximale du sol est atteinte alors dans un premier temps il y aura « flaquage » en surface puis ruissellement. L'intensité et la durée des précipitations impactent sur l'infiltration et sur le point de flaquage et de ruissellement.

Tous les sols n'ont pas les mêmes capacités d'infiltrer l'eau, différents facteurs influent sur l'infiltration (**Kwaad, 1982**).

a) Perméabilité du profil du sol

La perméabilité du profil du sol est déterminée par son volume porale, la distribution des tailles des pores et le degré de connectivité entre elles. La perméabilité peut diminuer sous l'effet de gonflement de certains minéraux argileux. Elle peut être caractérisée par la conductivité à saturation (K_s) qui égale la vitesse de percolation d'un sol saturé sous influence unique des forces gravitaires. K_s dépend de l'écoulement matriciel (surtout fonction de la texture) et de l'écoulement à travers des

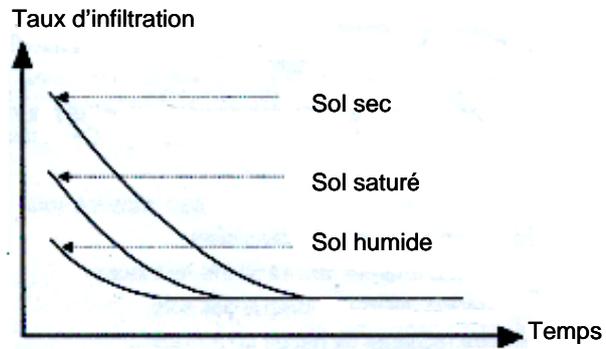


Figure 5 : Evolution de l'infiltrabilité dans le temps en fonction de l'humidité initiale du sol

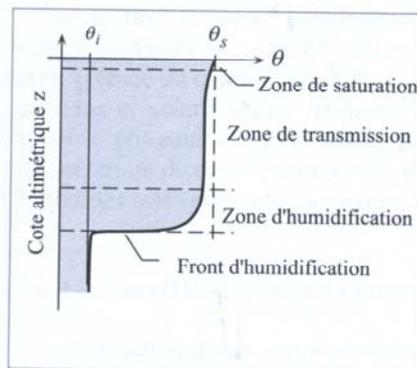


Figure 6 : Schématisation d'un profil hydrique (Soutter et al., 2007)

macropores qui peuvent être créées par le travail du sol, des racines, des animaux ou par dégonflement. La macroporosité peut très fortement modifier le K_s des sols à texture fine et sont souvent à l'origine des variations importantes de l'infiltrabilité à courte distance dans une parcelle.

b) Les états de surface

La pluie exerce des forces sur la surface et les agrégats qui mènent à une désagrégation et éventuellement à la formation d'une croûte battance qui est beaucoup moins perméable que la surface initiale (Calvet, 2003). L'aptitude du sol à former des croûtes est liée à la stabilité des agrégats qui dépend de plusieurs facteurs comme la teneur en matière organique, la teneur en argile et la teneur en calcaire. De plus, cette stabilité est influencée par les variations saisonnières liées à la température et l'activité biologique. La vitesse de formation des croûtes dépend de la pluie (intensité et quantité), de la stabilité des agrégats, mais aussi du travail du sol : un lit de semence très fin va pouvoir se fermer plus vite qu'une surface motteuse (Calvet, 2003).

c) L'humidité du sol

L'humidité initiale du sol influence fortement la capacité d'infiltration du sol. Un sol sec a tendance à « aspirer » l'eau dans sa matrice dû aux forces capillaires (sorptivité). Pendant l'infiltration, l'humidité augmente, les capillaires se saturent, l'infiltrabilité diminue et enfin l'infiltration est commandée uniquement par la gravité (Calvet, 2003). L'infiltrabilité au début de la pluie peut être en fonction de l'humidité initial jusqu'à 100 fois plus élevée que l'infiltrabilité finale en régime permanente (Figure 5).

L'importance de ce processus d'absorption d'eau peut être exprimée avec la sorptivité (S) qui dépend pour un sol donné de l'humidité initial.

3) *La description quantitative de l'état hydrique du sol et de l'infiltrabilité*

a) Les paramètres hydrodynamiques du sol

L'état hydrique du sol est caractérisé par la teneur volumique en eau, θ . Les valeurs limites de θ sont : θ_r , la teneur en eau résiduelle du sol soit la quantité minimale en eau du sol et θ_{sat} , la teneur en eau à saturation du sol (quantité maximale). Les profils hydriques représentent les variations de teneur en eau d'un sol à différentes profondeurs et différents temps donnés. Lors de l'infiltration, quatre zones se distinguent dans le profil hydrique (Figure 6):

- une zone de saturation présente sous la surface du sol ;
- une zone d'humidification où la teneur en eau est proche de la saturation et constante ;
- une zone d'humidification où la teneur en eau diminue avec la profondeur ;

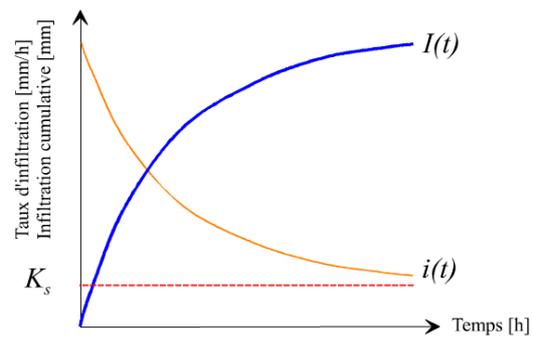


Figure 7 : Evolution générale du régime d'infiltration et de l'infiltration cumulative au cours du temps (K_s = conductivité hydraulique à saturation) (Laboratoire ECHO)

- un front d'humidification délimitant le sol humide d'un sol sec sous-jacent (**Hillel (1974), Soutter et al. (2007), Laboratoire ECHO**).

La sorptivité (S) représente « la capacité d'un sol à absorber l'eau par capillarité » (**Chossat, 2005**). La sorptivité est une caractéristique propre à chaque type de sol et à une teneur en eau donnée. Elle caractérise le premier temps de l'infiltration. (**Chossat, 2005**)

Liée à la teneur en eau du sol, **la conductivité hydraulique** K caractérise « l'aptitude du sol et plus généralement celle d'un milieu poreux à permettre le déplacement d'une phase liquide continue dans les pores non fermés » (**Calvet, 2003**).

La conductivité hydraulique atteint sa valeur maximale à θ_{sat} et se note K_{sat} (mm/h). La conductivité hydraulique à saturation représente les écoulements gravitaires dans le sol une fois que la porosité capillaire/matricielle est saturée en eau.

b) Equations à base physique de l'infiltrabilité

Pour simuler l'infiltration, plusieurs équations ont été mises au point. Ces dernières intègrent un ou plusieurs paramètres hydrodynamiques. Ici les équations de Philip (1957) et de Green & Ampt (1911) sont présentées car la dernière est utilisée dans le modèle LISEM, et la première est utilisée dans l'indicateur de ruissellement en cours de développement à l'ARAA.

→ L'équation de Philip

L'équation de Philip permet de résoudre l'équation de l'infiltration verticale en intégrant la sorptivité (**Soutter et al. (2007), Laboratoire ECHO**). Elle peut s'écrire des deux manières suivantes (Figure 7) :

$$i(t) = \frac{1}{2} * S * t^{-1/2} + A$$

$$I(t) = S * t^{1/2} + A * t$$

Avec :

$i(t)$: le régime d'infiltration ou capacité d'infiltration au cours du temps (mm/s)

t : le temps (s)

S : la sorptivité ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-0.5}$)

A : composante gravitaire fonction de la conductivité hydraulique à saturation (mm/s).

$I(t)$: l'infiltration cumulative (mm)

→ L'équation de Green & Ampt

Quant à l'équation de Green&Ampt, elle permet une schématisation et une simplification du profil hydrique lors de l'infiltration. Selon les hypothèses de Green&Ampt, le profil hydrique ne comporte plus que deux zones : la zone de transmission et le front d'humectation. Dans la zone de transmission,

il est supposé que la teneur en eau et la conductivité hydraulique sont constantes dans le temps (Soutter et al. (2007),³).

L'équation de Green&Ampt intègre la valeur de la conductivité hydraulique à saturation ainsi que les pressions imposées à l'eau du sol.

Avec $i(t)$: le régime d'infiltration (mm/s)

K_s : la conductivité hydraulique à saturation (mm/s)

h_0 : pression en surface (mm)

h_f : pression au front d'humectation (mm)

z_f : profondeur atteinte par le front d'humectation (mm) (²).

$$i(t) = K_s \times \left(1 + \frac{h_0 - h_f}{z_f(t)} \right)$$

c) Les paramètres hydrodynamiques à déterminer sur les essais

Les paramètres utiles à déterminer dans le cadre de cette étude sont la conductivité à saturation (K_s), la sorptivité en fonction de la teneur en eau initiale (θ_i), et la teneur en eau à saturation (θ_s) pour les différentes situations culturales et pédologiques sélectionnées. La teneur en eau initiale est également une donnée d'entrée des modèles utilisés, mais en soit elle n'est pas intéressante à décrire car elle est surtout déterminée par les conditions météorologiques précédant les mesures de terrain et moins par les situations culturales ou pédologiques.

4) **Incidence du travail du sol sur l'infiltration**

a) L'impact du travail du sol

Dans le contexte de lutte contre l'érosion et le ruissellement, en complément d'infrastructures installées (fascines, bandes enherbées) les pratiques culturales sont un levier d'action à disposition des exploitants. Il a été montré que les TCSL réduisent plus souvent les ruissellements et peuvent augmenter les flux d'infiltration (Labreuche et al., 2007).

La classification des techniques culturales dans le tableau 1 présente les principaux points caractéristiques des techniques du travail du sol. Un itinéraire technique du travail du sol en TCSL peut combiner plusieurs travaux du sol mais est caractérisé par l'absence du retournement du sol par un labour ; celui du site de Geispitzen illustre un itinéraire de travail du sol en TCSL (tableau 2). Le semis direct supprime tout travail du sol à l'exception de la création d'une ouverture linéaire pour déposer les grains de semence et la fermeture de cette fente par la suite.

Selon les techniques du travail du sol, l'intensité des perturbations des horizons est différente selon qu'il y ait retournement ou pas des horizons (labour). Dans cette partie, trois types du travail du sol sont analysés et comparés sur leur impact sur le sol : le labour conventionnel, les TCSL et le semis direct.

La porosité totale des sols travaillés (labour et TCSL) est composée de la porosité induite par l'action mécanique des outils et de la porosité biologique.

Le travail du sol profond (labour) ou superficiel est créateur de macroporosité mécanique. Cette macroporosité diminue dans le temps sous l'effet des alternances de période d'humidité et de sécheresse (**Strudley et al., 2008**).

La porosité biologique résulte du travail racinaire des cultures, de la vie biologique des sols (vers de terres). L'effet négatif du labour est la destruction partielle de la porosité biologique, plus stable, pour créer de la porosité mécanique moins stable. Egalement, le labour répété crée une semelle de labour, zone très dense et compacte, qui crée une frontière entre les horizons du sol où la porosité biologique et les racines peuvent se heurter.

Le semis direct se distingue du labour et des TCSL car il n'y a pas de travail du sol. Les sols en semis direct présentent une activité biologique forte, créatrice de porosité contrant ainsi l'effet du non travail du sol (**Labreuche et al., 2007 ; Vian, 2009**).

La présence de résidus de végétaux en surface ou de couvert végétal dans les parcelles en TCSL ou SD permet d'augmenter la rugosité de surface et le flaquage lors de fortes pluies, d'être un réservoir de nourriture pour la microbiologie du sol et de structurer le sol avec une hausse de la matière organique (MO) (**Labreuche et al., 2007**).

A l'inverse, les sols nus à faible stabilité structurale ont tendance à être recouverts par une **croûte de battance** qui défavorise l'infiltration. Cette croûte « ferme » la porosité du sol et l'eau ne peut plus s'infiltrer et va ruisseler.

Les principaux facteurs à prendre en compte, dans le cadre de la lutte anti-ruissellement, anti-érosion des sols sont :

- la couverture des sols qui permet de réduire la présence de croûte de battance et d'augmenter la rugosité
- l'activité biologique des sols qui entraîne la formation des biopores ;
- le maintien d'une forte teneur en matière organique qui augmente la stabilité structurale ;
- le maintien de la rugosité des sols qui augmente la détention de surface et retarde le ruissellement. (**Bottinelli, 2010 ; Labreuche et al., 2007**)

Issue de ces données, notre hypothèse de travail est de vérifier ce fonctionnement d'infiltration des sols selon les techniques culturales adoptées (labour, TCSL, semis direct) et ainsi de quantifier les composantes hydrodynamiques.

Nous supposons que les modalités en labour auront une meilleure infiltrabilité en début de campagne par rapport aux deux autres modalités (macroporosité liée au travail du sol). Puis au cours de la campagne on s'attend à une diminution d'infiltrabilité en labour plus rapide qu'en TCSL, en fonction de la pluviométrie depuis le dernier travail du sol. L'infiltrabilité du semis direct devrait être

beaucoup plus constante et son niveau par rapport aux autres modalités peut être plus faible dû à sa compaction plus élevée ou plus élevée si la macroporosité biologique est bien développée (**Bottinelli, 2010 ; Labreuche et al., 2007**)

b) Etats des connaissances à l'échelle régionale

A l'échelle régionale, il n'existe pas de références pour l'infiltration mesurée par un infiltromètre à disques. Des mesures de K_s avec la méthode Beerkan ont été obtenues en parallèle de la caractérisation des états de surface (**Ali, 2008**). Les données obtenues par **Ali (2008)** sont comparées avec des mesures réalisées avec un simulateur de pluie. Les mesures ont eu lieu sur quatre sites limoneux dont trois dans le Haut-Rhin (Geispitzen, Landser, Kappelen) et un dans le Bas-Rhin (Neewiller) cultivés en maïs. Ali montre une diminution de K_s (méthode Beerkan et simulateur de pluie) avec une dégradation des EDS. Les valeurs de K_s par la méthode Beerkan sont beaucoup plus élevées que celles obtenues avec le simulateur de pluie, et ne peuvent pas être utilisées en valeurs absolues pour paramétrer un modèle d'érosion.

Il existe plusieurs études sur les thèmes du ruissellement et de l'évolution des EDS en fonction des techniques culturales effectuées en Alsace. Les travaux d'**Armand (2009)** ont eu pour objectif de suivre les EDS en fonction des techniques de travail du sol et l'impact sur le ruissellement. Ces essais ont été menés sur les mêmes sites qu'**Ali (2008)**. Plusieurs mesures ont été réalisées par **Armand** : suivi des EDS, relevés pluviométriques, collecte de ruissellement sous pluies naturelles, suivi de la propagation du ruissellement (effet EDS) et simulation de pluie sur des placettes avec une organisation spatiale et des résidus de tailles différentes afin de vérifier si la présence de résidus induit des « zones d'infiltrations préférentielles » (**Armand, 2009**). Les résultats mis en avant au travers de ces multiples expérimentations (sur des micro-parcelles) sont les suivants :

- Forte dégradation structurale sur la ligne de semis (affinement des micro-reliefs) et motif cultural ayant un rôle important dans le ruissellement ;
- Les croûtes sédimentaires réduisent l'infiltrabilité et facilitent le ruissellement ;
- La tendance est que les TCSL réduisent le ruissellement et l'érosion mais l'effet des TCSL est hétérogène et la réduction est effective avec une présence de 30% minimum de résidus.

Sur le site de Geispitzen (trois parcelles) suivi par Arvalis-Institut du végétal, parmi les mesures réalisées, des mesures de la quantité et de la qualité du ruissellement ont lieu. L'étude du ruissellement se fait sur l'ensemble des parcelles. Les eaux de ruissellement en bas de parcelle sont mesurées et analysées. Les résultats des années 2007 et 2008 sur ce site montrent que la parcelle conduite en TCSL ruisselle plus tard et quand elle ruisselle, les quantités relevées sont plus faibles que pour les parcelles en labour (**Van DIJK et al., 2007 et 2008**). Le suivi des EDS d'Armand sur les parcelles de Geispitzen (en 2007) montre que pour des relevés à la même date (fin juin 2007), la surface de la

	Obernai (67)	Rouffach (68)	Geispitzen (68)	Muntzenheim (68)
topographie	plat	plat	penne	plat
degrés de pente	X	X	moyenne 5%	X
type de sol	limoneux (L) à limono-sablo-argileux (LSA)	sablo-argilo-limoneux (SAL)	limoneux (L) à limono-argileux (LA)	sablo-argileux-x (SAX)
année de mise en place de l'essai	2004	2009	2001	2010
cultures mises en place et travail du sol pour la campagne 2011	Blé après maïs	Maïs référence après blé + CIPAN	Maïs	Maïs référence
	Labour TCSL SD	Labour TCSL TCSL TCSL	Labour TCSL	Labour SD Labour SD
		Maïs Soja Blé		Maïs dans trèfle permanent Orge hiver Maïs sur mulch de pois

essai système de culture innovant
modalités retenues pour les mesures

en gras



Figure 8: Etats de la couverture végétale au début du printemps pour une culture d'hiver (à gauche) et une culture de printemps (à droite)

Tableau 3 : Les différents sites de mesure avec leurs caractéristiques

parcelle en labour est plus dégradé (quasi fermé) alors que celle en TCSL présente quelques croûtes et non une surface quasi fermée.

L'ensemble de ces données souligne l'importance des EDS dans le ruissellement et donc sur la capacité d'infiltration des sols dégradés.

IV. Sites d'études et matériels et méthodes de mesure

1) *Différents sites en Alsace et deux campagnes*

a) *Pourquoi différents sites ?*

Afin de couvrir une partie de la diversité pédologique des sols alsaciens, plusieurs sites d'expérimentations sont nécessaires. La diversité des sols recherchée permettra de mieux paramétrer LISEM pour des sols autres que limoneux qui ont reçu jusqu'à aujourd'hui la quasi-totalité de l'attention de la recherche alsacienne sur le sujet ruissellement et érosion. Il y a un besoin urgent de mieux pouvoir prendre en compte les effets liés aux caractéristiques pédologiques sur le mouvement de l'eau dans le sol et sur la production du ruissellement avec les outils de modélisation.

En levier d'action contre le ruissellement, il est conseillé que le sol présentant un risque érosif soit couvert lors des premiers événements pluvieux orageux, avril/mai. Une solution pour avoir cette couverture du sol est l'implantation de culture d'hiver (par exemple : blé ou orge d'hiver). Au printemps durant la période des probables forts événements pluvieux, les cultures d'hiver ont une forte couverture du sol (Figure 8). La présence de culture de printemps et de culture d'hiver sur un même site (ex : Rouffach et Muntzenheim) va permettre de comparer l'effet culture pour un sol donné.

Le choix des parcelles d'expérimentation en plus de couvrir une diversité pédologique doit répondre à une diversité de cultures implantées car le choix cultural est une proposition d'action à disposition des exploitants.

La couverture du sol en plus d'une culture d'hiver est possible avec des techniques culturales alternatives au labour conventionnel. C'est pourquoi les sites choisis sont conduits avec différentes techniques culturales (avec toujours un labour pour référence), pour pouvoir déterminer l'effet travail du sol pour une culture et un sol donnés.

Plusieurs sites correspondants aux précédentes exigences sont disponibles en Alsace. Sur ces parcelles, l'ARAA en partenariat avec différents acteurs locaux mènent des essais tels que des systèmes de culture innovants.

Le tableau 3 présente les principales caractéristiques des parcelles à disposition pour l'expérimentation *in situ*.

Malgré que les parcelles en pentes soient plus sensibles au ruissellement, trois des quatre sites ne sont pas en pente car pour réaliser les mesures *in situ* d'infiltration, les méthodes choisies (développées ci-après) ne peuvent pas se faire sur des parcelles en pente.

b) Pourquoi deux campagnes de mesures ?

Afin de suivre l'évolution des paramètres hydrodynamiques du sol au cours d'une même série de mesures, il faut réaliser plusieurs campagnes de mesures.

La première campagne de mesures est réalisée dans l'objectif de caractériser les sols après le semis de maïs soit entre le 15 et 30 avril.

La deuxième campagne de mesures a eu lieu après des événements pluvieux (fin mai, début juin) afin de pouvoir réaliser des mesures sur des surfaces dégradées (présences de croûtes) et ainsi mesurer l'impact sur l'infiltrabilité.

c) Bref historique des sites

Le site d'Obernai (67), en place depuis 2004, a pour objectif de mesurer la qualité de l'eau, les conséquences agronomiques, environnementales et économiques du travail du sol de longue durée.

La parcelle initiale est subdivisée en trois modalités (labour, TCSL et SD) où se succède la rotation triennale suivante : blé/betterave/maïs.

Cet essai est suivi par différentes structures locales : Chambre d'Agriculture du Bas-Rhin, le lycée agricole d'Obernai, la sucrerie d'Erstein et l'ARAA. (**Exploitation d'Obernai**)

Le site de Geispitzen (68) a été mis en place en 2001 (et 2002 pour le non labour) dans le cadre de la limitation du ruissellement et du transfert de produits phytosanitaires pour réduire la pollution des eaux de surface. Ce site permet à l'heure actuelle de connaître les impacts des techniques de non labour et de différents programmes de désherbage par rapport aux parcelles en labour. Le site de Geispitzen est constitué de trois parcelles homogènes de 2,5 hectares côte à côte, hydrauliquement indépendantes. Deux parcelles sont en modalité labour avec une différence du programme de traitement. La troisième parcelle est en non labour (TCSL) et le programme de désherbage de cette parcelle est le même que celui d'une des parcelles en labour. Egalement différents partenaires travaillent sur cet essai : la ferme Lehe (exploitant des parcelles), Arvalis-Institut du végétal, les chambres d'agriculture du Bas et Haut-Rhin et l'ARAA qui est maître d'ouvrage (**Van Dijk et al., 2006, 2007**). La parcelle en non labour et la parcelle adjacente en labour sont retenues pour mesurer. Des zones planes sont présentes et retenues pour effectuer les différentes mesures.

Sur les sites de Rouffach (68) et de Muntzenheim (68) ont lieu des essais Système de Culture Innovant. Ces essais ont pour objectif de suivre des systèmes de culture innovant comme alternative à la monoculture du maïs mal perçue par le grand public. Ces essais comparent une modalité de référence en maïs traditionnel (labour) à d'autres modalités.

critères de mesures	infiltromètre multi disques TRIMS	simple anneau à charge (semi-) constante	simple anneau (charge décroissante)	double anneau (charge constante)	simulateur de pluie
différentes succions applicables	oui	non	non	non	non
charge constante ou non	oui	oui	non	oui	non
obtention de Ks	oui pour un potentiel près de zéro (saturation)	oui avec la méthode BEST	non	oui	oui
obtention de s	oui	oui	non	oui	oui
temps de mesure estimé	de 30 minutes à 2heures	de 30 minutes à plusieurs heures	fonction de la quantité appliquée et du sol	entre 1 et 5 heures	entre 1 et 2 heures
quantité d'eau nécessaire	10L pour le disque de diamètre 25cm	10L pour un anneau de diamètre 20 cm	3L pour anneau de diamètre 20cm	20L	environ 30 L/m ²
mise en place du dispositif	long et maîtrise de l'appareil nécessaire	facile et rapide	facile et rapide	assez compliquée	long et matériel plus complexe
conditions d'humidité du sol	sèches	sèches si utilisation de l'analyse BEST			pas de contraintes
conditions météorologiques	ni vent ni pluie	pas de contraintes	pas de contraintes	pas de contraintes	ni vent ni pluie
mesure en pente possible	non	à éviter	à éviter	à éviter	oui
choix final	oui: appareil et expertise disponible à l'INRA Colmar	oui: mise en œuvre très simple et méthode d'analyse BEST disponible	non: résultats difficilement interprétables	non: bibliographie pas convaincante et problème 3D pas entièrement résolu	non: pas de matériel disponible et peu pratique

Tableau 4 : Evaluation des différentes méthodes de mesures *in situ*

A Rouffach, depuis 2009, est mis en place trois autres modalités en TCSL : maïs avec un sous-semis, soja et blé avec une CIPAN. Seules les parcelles de maïs et de blé sont retenues pour les mesures car la parcelle de soja n'était pas semée au début de ma campagne de mesures.

A Muntzenheim, depuis 2010 sont mises en place trois modalités en comparaison de la modalité maïs référence en rotation avec une orge+pois+CIPAN. Deux modalités en SD sont implantées: un maïs (monoculture) dans un trèfle permanent et un maïs (monoculture) dans un mulch de pois. La troisième modalité est une culture d'orge d'hiver en labour. Les quatre modalités sont retenues pour les mesures (Schaub et al., 2010).

Sur ces quatre sites et 12 modalités, j'ai réalisé des mesures d'infiltrométrie ainsi que des relevés de terre pour diverses mesures (densité apparente, granulométrie). En parallèle, Sandie Masson a réalisé diverses mesures (résistance à l'arrachement, description des états de surface, stabilité structurale, rugosité) sur les mêmes sites et aux mêmes dates.

2) *Matériels et méthodes de mesure d'infiltration in situ*

La détermination des paramètres hydrodynamiques d'un sol peut se faire *in situ* ou bien au laboratoire. Les mesures ont été faites *in situ* pour les deux campagnes. Ce choix permet de limiter les erreurs/modifications structurales lors des prélèvements de sol pour les méthodes d'analyses en laboratoire.

a) Choix des méthodes

Parmi toutes les méthodes de terrain possibles, j'ai du retenir deux méthodes de mesures complémentaires à réaliser à la surface du sol (absence de forage).

Pour effectuer le choix, les outils de mesures devaient répondre à plusieurs critères :

- Critères de mesures : potentiel applicable, charge constante...
- Critères pratiques : temps de mesures, quantité d'eau, conditions météorologiques...

L'évaluation des méthodes proposées dans la bibliographie est synthétisée dans le tableau 4 ; elle se base sur les publications suivantes : **Boers et al** (1992), **Eijkelkamp** (1999), **Chossat** (2005), **Ali** (2008). A l'issue de la comparaison des méthodes envisageables, les deux méthodes retenues sont les suivantes : l'infiltromètre à disques (TRIMS) et l'infiltromètre à simple anneau (appelé le Beerkan par la suite). En complément de ces méthodes, des échantillons de terre sont prélevés pour obtenir les densités apparentes, les humidités initiales et finales des sols testés.

b) Mesures de la densité apparente et des humidités initiales et finales

→ Mesure de la densité apparente (DA)

Dans mon étude, la DA se calcule sur les cinq premiers centimètres du sol.

La prise d'échantillons pour obtenir la DA se fait à l'aide d'un cylindre métallique ouvert (volume cylindre $V_c = 100\text{cm}^3$) à ces deux extrémités qu'il faut enfoncer dans le sol sur les cinq premiers centimètres. Une fois le cylindre complètement plein (coté à la surface), il faut le refermer avec le couvercle puis compléter si nécessaire avec de la terre prise à 5cm de profond puis refermer. Une fois fermé, il faut peser l'ensemble pour obtenir la masse fraîche (MF). L'échantillon sera séché à l'étuve pendant 48h à 105°C , après ce délai, il faut peser la masse sèche (MS) puis obtenir la tare (T) en vidant et nettoyant le cylindre avec les 2 couvercles. Au minimum quatre prises d'échantillon sont effectuées pour chaque valeur moyenne.

Calcul de DA :

$$DA = \frac{MS - T}{V_c} \quad \text{Avec DA : densité apparente (g/cm}^3\text{), MS : masse sèche de l'échantillon (g), T : la tare (g), } V_c \text{ : volume du cylindre (cm}^3\text{)}$$

→ Mesure de l'humidité initiale

La prise de sol est faite juste avant la mesure d'infiltration. L'humidité initiale est obtenue avec la prise d'échantillon pour la DA.

Calcul de la teneur en eau initiale (θ_i)

$$\theta_i = \left(\frac{(MF - T) - (MS - T)}{(MS - T)} \right) \times DA \quad \text{Avec MF : masse fraîche (g), T : la tare (g), MS : masse sèche (g), DA : densité apparente (g/cm}^3\text{)}$$

→ Mesure de l'humidité finale

La prise d'échantillon se fait après avoir stoppée la mesure. Une quantité de terre humide est prélevée avec une spatule et déposée dans un aluminium, fermé et pesé afin d'avoir l'humidité finale après infiltration. L'échantillon, comme pour la mesure de la DA, est mis à l'étuve à 105°C pendant 48h. Après ce délai, l'échantillon sec est pesé (obtention du poids sec) ainsi que la tare du morceau d'aluminium.

Calcul de la teneur en eau finale (θ_f)

$$\theta_f = \left(\frac{(MF - T) - (MS - T)}{(MS - T)} \right) \times DA \quad \text{Avec MF : masse fraîche (g), T : la tare (g), MS : masse sèche (g), DA : densité apparente (g/cm}^3\text{)}$$

c) L'infiltromètre à disques

→ Principe

Egalement appelé TRIMS (Triple Ring Intiltrometer at Multiple Suctions), l'infiltromètre permet d'obtenir les valeurs de K et de S pour des potentiels proches de la saturation et ainsi récolter des informations sur la macroporosité. Le principe du TRIMS est de mesurer un flux d'infiltration à **charge** constante.

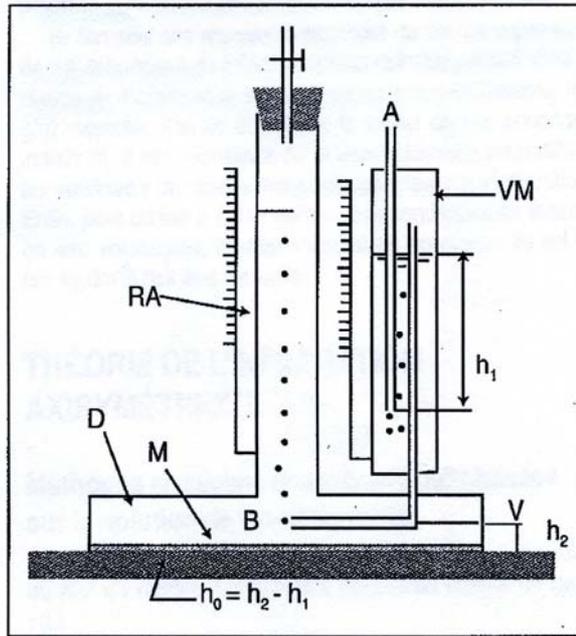


Figure 9 : Schéma de l'infiltromètre à disque (Coquet et al., 2000). (RA : réservoir d'alimentation en eau ; VM : vase de Mariotte ; D : disque creux ; M : membrane en nylon ; A : tube d'aération du vase de Mariotte ; B tube d'aération du réservoir d'alimentation)



Figure 10 : L'infiltromètre à disque

→ Matériel

« L'infiltromètre est constitué d'un disque creux (D) muni d'une membrane (M) à sa base en contact avec le sol. Le disque est alimenté en eau par un réservoir (RA) gradué, amovible et fermé à sa partie supérieure par une pince de Mohr (Figures 9 et 10). L'entrée de l'air dans le réservoir d'alimentation se fait par un tube (B) relié à un vase de Mariotte (VM) permettant de régler le potentiel de l'eau au niveau de la surface du sol. Pour que l'eau quitte l'infiltromètre et s'infiltré dans le sol, elle doit être remplacée dans le réservoir d'alimentation par un volume identique d'air. Cet air transite à travers le vase de Mariotte de A jusqu'à B. L'air entre dans le vase de Mariotte par le tube A à la pression atmosphérique. Les bulles d'air ainsi formées à la base du tube A remontent dans le vase de Mariotte et rejoignent le volume d'air contenu dans celui-ci. Lors de l'infiltration de l'eau, l'air quitte le vase de Mariotte par le tube B à la pression p_{airVM} pour rejoindre le réservoir d'alimentation. L'eau située juste à la sortie du tube B a donc une pression égale à celle de l'air qui sort du tube, si l'on néglige l'effet de la tension superficielle de l'eau dans l'air à la sortie de ce tube (remarque valable aussi pour le tube A).

Si l'on exprime les pressions en unité de hauteur de colonne d'eau, un potentiel de l'eau h_0 à la sortie de l'infiltromètre: $h_0 = h_2 - h_1$. Ce dispositif permet donc de contrôler et maintenir la pression de l'eau à l'interface infiltromètre/sol. Dans la pratique, la hauteur h_2 est déterminée en remontant le tube A jusqu'à ce que l'eau coule à travers la membrane. On a alors $h_0 = 0$ et $h_1 = h_2$. Le tube A est alors rabaisé de la distance correspondant au potentiel h_0 désiré. La membrane du disque doit avoir un potentiel d'entrée d'air bien inférieur à -25cm tout en ayant une résistance hydraulique négligeable devant celle du sol » (Coquet et al., 2000).

Trois diamètres de disque sont disponibles pour faire les mesures : 250mm, 80mm et 48,5mm. Nous avons choisi d'utiliser le disque de diamètre 250mm dans le but d'avoir une surface la plus grande possible. Trois potentiels sont appliqués (-7, -3 et -1,5cm) dans les parcelles en labour pour obtenir les courbes de rétention. Pour les parcelles en TCSL et en SD, les mesures d'infiltration sont faites au **potentiel** -3cm (Annexe 1 : feuille de terrain TRIMS).

→ Protocole

Tout d'abord, il faut choisir un endroit à plat pour que l'infiltromètre ne soit pas penché et que toute la zone sous le disque contribue de la même manière à l'infiltration (même potentiel sur toute la surface). Un gabarit à la taille du disque est posé sur la zone choisie pour pouvoir ôter les résidus et les mottes non scellés, les cailloux, couper la végétation à ras du sol puis une fine couche de sable (<2mm) est déposée à l'intérieur du gabarit, nivelée (vérification avec un niveau à bulle) et légèrement humidifiée avec un brumisateuse. L'étape de préparation du sol est primordiale pour avoir une mesure correcte et ne pas percer la toile du disque. La mise en eau du TRIMS consiste à remplir le réservoir d'alimentation, à retirer les bulles d'air présentes dans le disque (la présence de bulle dans le disque diminue la surface d'infiltration à la surface du sol et n'est pas calculable) et dans un dernier

temps régler le tube A dans le vase de Mariotte pour faire le zéro (potentiel égal 0, l'eau est à la pression atmosphérique) puis à régler le potentiel choisi en abaissant A dans le VM. Le début de la mesure commence dès que le TRIMS est déposé (droit) sur la couche de sable et il faut lancer la mesure du temps à ce moment précis. En début de mesure, le temps (cumulé) est relevé tout les 0,5cm jusqu'à 10 minutes (caractérisation du début de l'infiltration pour obtenir la valeur de la sorptivité) puis tout les centimètres.

Le régime quasi-stationnaire est atteint à partir de 45 minutes, nous avons choisi de stopper la mesure au-delà de l'heure d'infiltration pour les cas où le réservoir n'est pas encore vide. Dès que la mesure est terminée, il faut ôter la couche de sable pour prélever un échantillon de sol humide pour avoir θ_f et ce pour toutes les répétitions. Pour la tension -7cm, une seule répétition est faite sauf dans le cas où la mesure ne dure pas plus de 45 minutes. Pour les tensions -3 et -1,5cm, deux répétitions sont effectuées et si les temps de mesures sont différents alors une troisième mesure est réalisée. Les répétitions dans le même inter-rang sont séparées d'au moins 60cm.

→ Analyse des résultats

Vandervaere et al. (2000a et 2000b) décrivent plusieurs méthodes des résultats en comparant principalement des méthodes de régression non linéaire (basées sur l'infiltration cumulative ou sur le flux d'infiltration, soient des équations simples) à des méthodes de régression linéaire (basées sur une linéarisation cumulative ou sur une linéarisation différentielle (DL), soient des équations plus complexes). Le résultat de leurs comparaisons est que la méthode de régression linéaire avec une linéarisation différentielle semble plus robuste et permet de représenter l'effet sable. Nous avons choisis de tester deux méthodes d'analyses des résultats: la méthode de régression linéaire DL et la méthode de régression non linéaire basée sur l'infiltration cumulative d'après l'équation de Philip (1957). La régression non linéaire basée sur l'équation suivante : $I = C_1 \sqrt{t} + C_2 t$ a été réalisée avec le logiciel SPSS, avec I : la lame d'eau infiltrée cumulée (mm), C_1 : la sorptivité ($\text{mm/s}^{0.5}$), t : le temps cumulé (s) et C_2 : le facteur gravitaire = $\frac{2 - \beta}{3} K + \frac{\gamma S^2}{R(\theta_f - \theta_i)}$ avec β : une constante égale à 0.6, K : la conductivité hydraulique (mm/s), γ : une constante égale à 0.75, S : la sorptivité ($\text{mm/s}^{0.5}$), R : le rayon du disque (mm), θ_f : la teneur en finale et θ_i : la teneur en eau initiale.

La détermination des paramètres avec la régression linéaire DL se fait graphiquement avec l'équation suivante : $\left(\frac{dI}{d\sqrt{t}} = C_1 + 2C_2 \sqrt{t} \right)$ avec t, le temps cumulé (s), C_1 , la sorptivité, C_2 : le paramètre gravitaire (ci-dessus) et $\left(\frac{dI}{d\sqrt{t}} \right) = \frac{I_{i+1} - I_{i-1}}{\sqrt{t_{i+1}} - \sqrt{t_{i-1}}}$ avec i : le point de mesure, $i+1$: le point de mesure suivant, $i-1$: le point de mesure précédent, I la lame d'eau infiltrée cumulée (mm), t : le temps

(s). La courbe $\frac{dI}{d\sqrt{t}} = f\left(\sqrt{\sqrt{t_{i-1}} \times t_{i+1}}\right)$ permet d'obtenir les paramètres C1 et C2 après avoir ôté de la courbe les points représentant l'effet sable (partie descendante de la courbe). La valeur du paramètre C1 (la sorptivité) est égale à l'ordonnée à l'origine et celle de C2 est égale à la moitié de la pente. Les résultats obtenus avec ces deux méthodes sont majoritairement positifs (K et S). Pour pouvoir comparer les résultats avec ceux du Beerkan, j'ai testé sur troisième méthode (les deux précédentes ne sont pas concluantes pour le Beerkan) : la méthode White&Sully (1987) $K = q_{\infty} - \frac{4bS^2}{\pi R(\theta_f - \theta_i)}$ avec

K : la conductivité hydraulique (mm/s), q_{∞} : le flux minimal en régime quasi-permanent (mm/s), b : un paramètre égal à 0,55, S : la sorptivité (mm/s^{0,5}), R : le rayon du disque (mm), θ_f : la teneur en finale et θ_i : la teneur en eau initiale. La valeur de q_{∞} s'obtient en sélectionnant la valeur du flux minimale observée durant l'expérimentation (normalement vers la fin de l'observation où le régime quasi-permanente est atteint) et la sorptivité est calculée grâce à la régression linéaire sur les cinq premiers points (après les points liés au sable) de la courbe $I = f(\sqrt{t})$ d'après l'équation de Philip (1957) $I = S\sqrt{t}$ qui est valide tant la conductivité hydraulique est marginale par rapport aux forces capillaires, c'est-à-dire pour t proche de 0.

d) Beerkan

→ Principe

Le principe du Beerkan tout comme le TRIMS est de mesurer un flux d'infiltration. La particularité du Beerkan est que la quantité d'eau à infiltrer est en charge positive soit en légère surpression.

→ Matériel

Dans mon étude, le Beerkan est un anneau en métal d'un diamètre de 20cm et d'une hauteur de 10cm. Nous n'utilisons pas une charge constante avec un système de Mariotte comme Ali (2008), mais une charge semi-constante avec un apport de faibles doses d'eau pour entretenir une charge qui varie entre 1 et 0cm (0,5cm en moyenne) selon la description de **Lassabatère et al.** (2006). Pour verser une charge de 1cm, il faut un volume de 300mL d'eau. Pour un gain de temps sur le terrain, une entaille est faite à la hauteur des 300mL sur un flacon qui servira de dose référence. La dose d'eau n'est pas versée comme tel dans l'anneau mais au travers d'une assiette plastique perforée posée sur l'anneau pour simuler l'effet des gouttes et pour éviter une perturbation trop brutale de la surface du sol due au versement de la dose d'eau. Il faut également se munir d'un chronomètre pour relever le temps d'infiltration de chaque dose (Annexe 2 : feuille de terrain Beerkan).

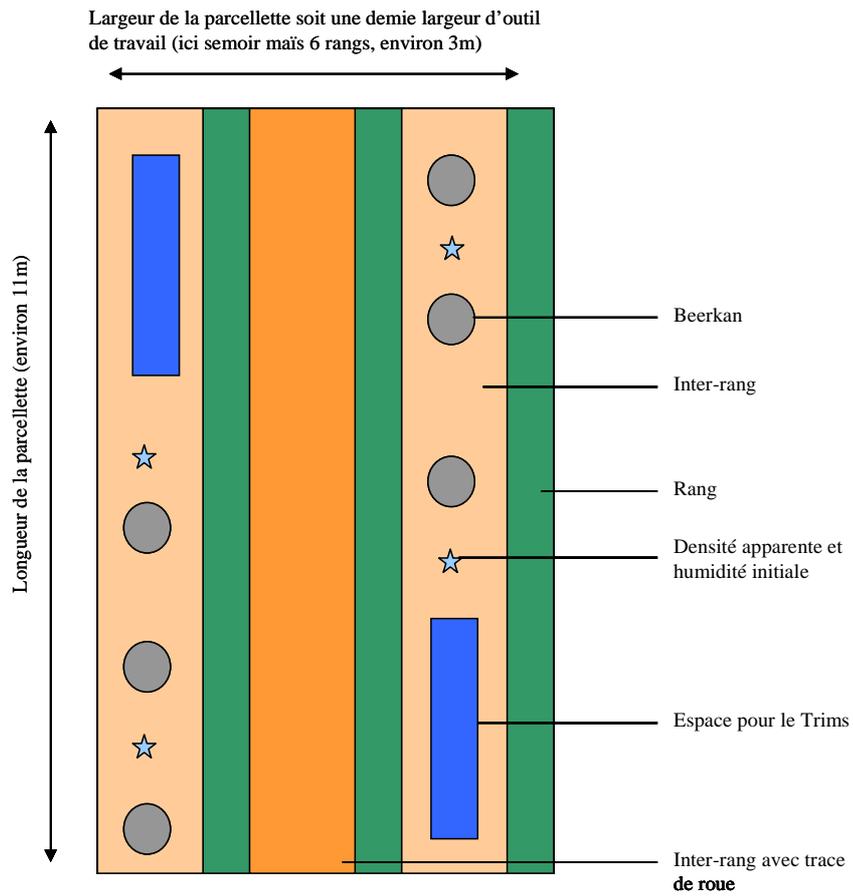


Figure 11 : Répartition intra-parcellette des différentes mesures



Figure 12 : Le Beerkan

→ Protocole

Les anneaux (6 par modalité) sont insérés trois par trois à un intervalle de 50cm dans les inter-rangs pour mesurer la variabilité inter-parcellette, (Figures 11 et 12). Les anneaux sont enfoncés à une profondeur d'environ 2cm pour éviter les fuites latérales. Pour les parcelles en blé d'hiver et en orge, les cultures à l'intérieur de l'anneau ont été coupées à 0,5cm du sol de même que les adventices dans les inter-rangs de maïs.

Une fois les anneaux installés avec l'assiette perforée dessus, il faut verser la première dose et lancer le chronomètre. Une fois la dose infiltrée, le temps intermédiaire (cumulé) est noté (sans stopper le chronomètre) et une deuxième dose est versée et cela jusqu'à un temps cumulé de 45 minutes. A la fin de l'infiltration, un échantillon de sol humide est prélevé au centre de l'anneau pour obtenir la teneur en eau finale sur deux des six répétitions.

→ Analyse des résultats

Plusieurs méthodes d'exploitation des résultats ont été testées. Parmi les méthodes testées, le logiciel BEST permet d'obtenir les valeurs de K_s , S ainsi que les courbes caractéristiques de l'infiltration ($K(h)$; $K(\theta)$ et $h(\theta)$) à partir des données entrantes suivantes : diamètre de l'anneau, répartition granulométrique du sol, volume de la dose d'eau et temps cumulé, (**Lassabatère et al.**, 2006). Le logiciel a été utilisé pour l'ensemble des données des deux campagnes mais BEST a fourni seulement 26% (soit 31 sur 116) de résultats (c'est-à-dire que le logiciel fonctionné entièrement sur l'ensemble de la mesure). En raison du mauvais fonctionnement de BEST, il a fallu tester d'autres méthodes. Comme pour l'analyse des résultats du TRIMS, nous avons comparé deux méthodes d'analyses (décrites ci-avant) : la méthode de régression non linéaire (réalisée sur SPSS) à partir de l'équation de Philip (1957) $I = C_1\sqrt{t} + C_2t$ et la méthode d'estimation White&Sully (1987) $K = q_\infty - \frac{4bS^2}{\pi R(\theta_0 - \theta_n)}$. Avec ces méthodes, les résultats obtenus pour K (mm/h) étaient tous négatifs, ce qui est impossible physiquement ; la conductivité hydraulique ne peut pas être négative. Dans ces deux équations les paramètres S et K sont liés, ainsi quand S est élevée alors K est faible.

La troisième méthode choisie est une alternative à la méthode White&Sully. La valeur de K_f est obtenue avec la valeur minimale du flux d'infiltration (q_{\min}) et un facteur intégrant les caractéristiques de l'infiltromètre et de la sorptivité pour prendre en compte les flux latéraux (**Nimmo et al.**, 2009). Plusieurs facteurs de correction ont été mis aux points (**Nimmo et al.** 2009 ; **Reynolds et al.**, 1990) mais seul celui de Wu intègre les caractéristiques du Beerkan (profondeur d'insertion de l'anneau hauteur de la lame d'eau). La valeur de K_f est calculée avec le facteur de Wu de la façon suivante :

$$K_f = \frac{q_{\min}}{F_{Wu}} \quad \text{Avec } K_f = \text{conductivité finale (mm/h)} ; q_{\min} = \text{flux minimum (mm/h)} ; F_{Wu} =$$

facteur de Wu

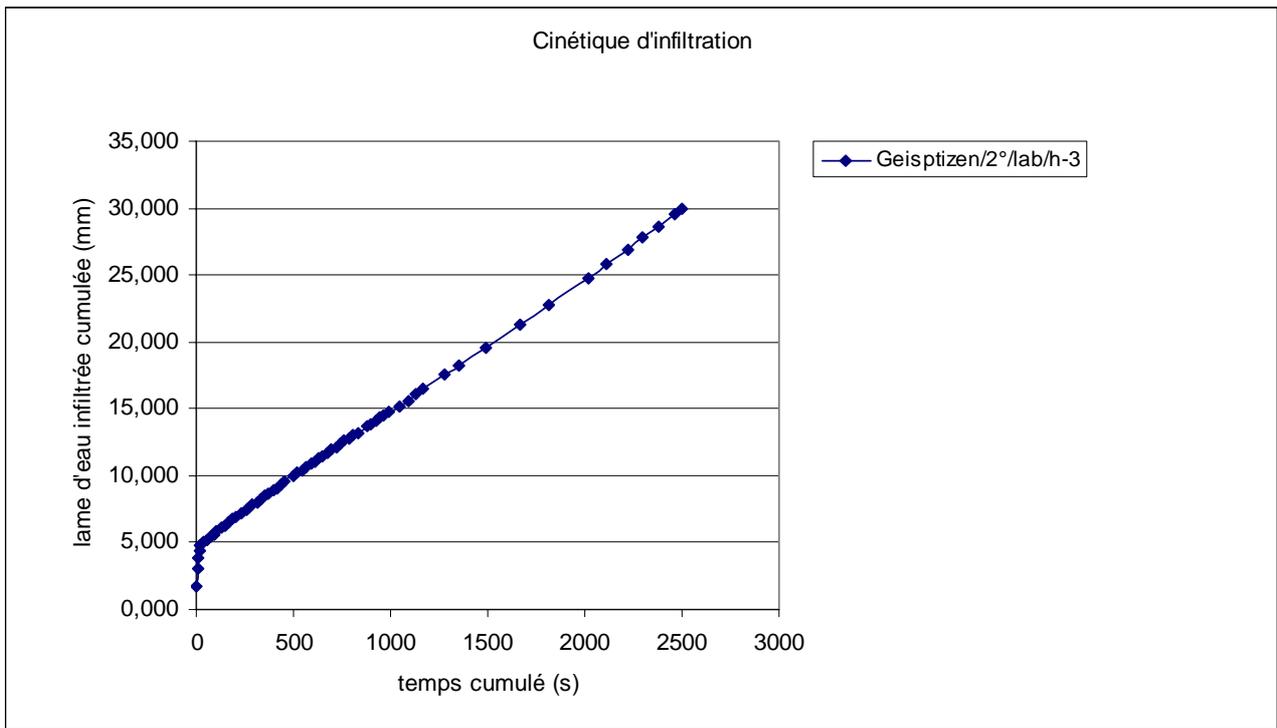


Figure 13 : Cinétique d'infiltration (exemple pour Geisptizen en labour maïs au potentiel -3cm en deuxième campagne)

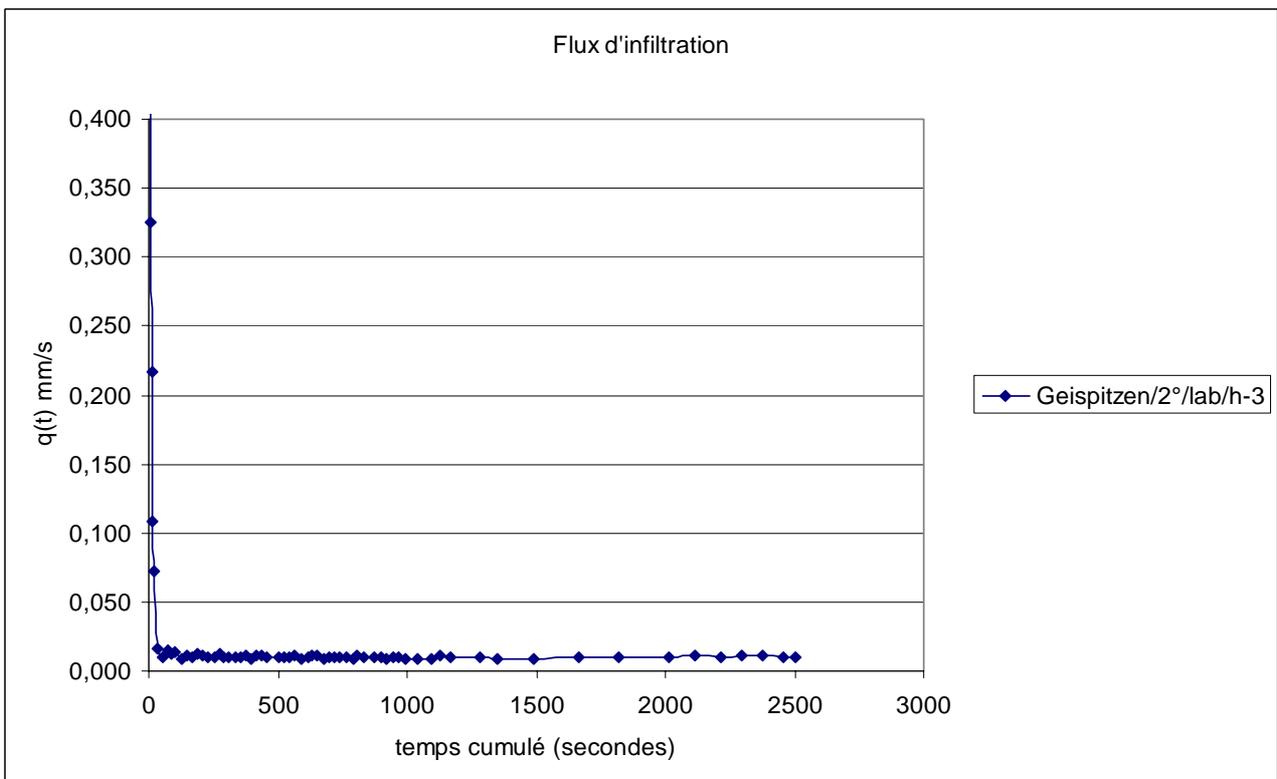


Figure 14 : Flux d'infiltration (exemple pour Geisptizen en labour maïs au potentiel h-3cm en deuxième campagne)

$$F_{wu} = 1 + \frac{H + \frac{1}{\alpha}}{d + \frac{r}{2}}$$

Avec H : hauteur de la lame d'eau (m) ; α : paramètre fonction de la texture et

de structure du sol ; d : profondeur d'insertion de l'anneau dans le sol (m) ; r : rayon de l'anneau (m).

La valeur de la sorptivité est obtenue comme pour le TRIMS avec une régression linéaire sur les cinq premiers points de la courbe $I = f(\sqrt{t})$ d'après l'équation théorique de Philip (1957) $I = S\sqrt{t}$.

V. Résultats et discussions

Dans un premier temps, je vais présenter les résultats « bruts » issus du traitement des données, ensuite l'évolution des paramètres DA, θ_i , θ_s et enfin l'évolution des paramètres K_f et S en fonction du paramètre « culture ». Les cultures de blé et d'orge sont regroupées sous le terme de culture d'hiver et la culture de maïs est présentée sous le terme de culture de printemps.

Sur la parcelle de blé de Rouffach et sur l'ensemble du site de Muntzenheim, il n'y a pas eu de deuxième campagne de mesure par manque de temps.

Seuls les résultats des paramètres obtenus avec le TRIMS au potentiel -3cm seront présentés dans les tableaux et graphiques suivants. Le choix de travailler sur ce potentiel est justifié parce qu'il est testé sur toutes les modalités au cours des deux campagnes. Les mesures obtenues sont plus précises car elles sont plus longues (entre 30 et 50min).

1) Résultats bruts et estimation des paramètres

Afin de mieux visualiser l'infiltration dans le temps, j'ai représenté graphiquement la cinétique d'infiltration ($I = f(t)$, graphique 13) et le flux d'infiltration ($q = f(t)$, graphique 14). Ces courbes sont conformes avec celles disponibles dans la bibliographie. La courbe du flux d'infiltration montre que l'infiltration diminue dans le temps.

Les valeurs des paramètres K_f et S sont les valeurs moyennes obtenues sur une même modalité pour une méthode de mesure donnée (annexe 3). Les valeurs de DA, θ_i , θ_f ($\theta_f = \theta_s$ pour le Beerkan) sont les moyennes des prises d'échantillons pour une modalité. Les valeurs des paramètres DA et θ_i sont présentées en annexe 4.

Les valeurs de S obtenues par Beerkan sont plus élevées que celles obtenues avec TRIMS de même que pour les valeurs de K_f . Cet écart est dû à la différence de potentiel imposée par les deux méthodes de mesure. Les mesures avec le Beerkan se font au potentiel 0,5cm (légère surpression, à saturation) tandis qu'avec le TRIMS le potentiel retenu pour les analyses est de -3cm (légère dépression, proche de la saturation).

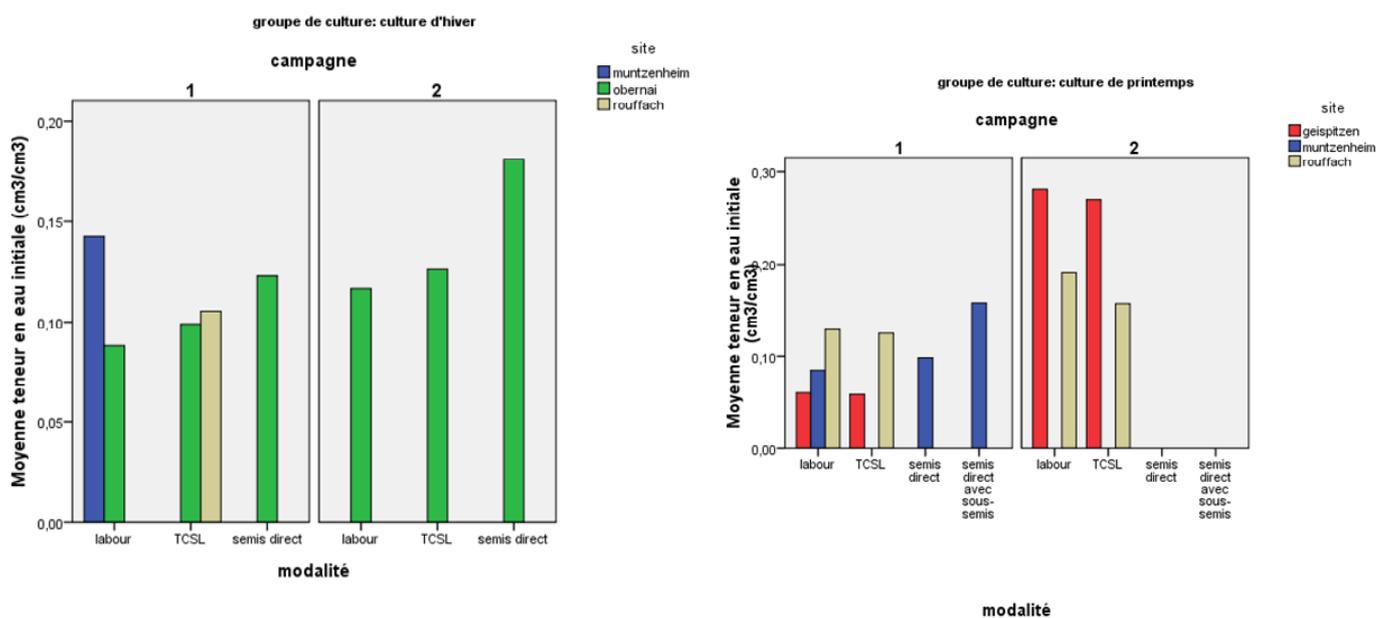


Figure 15 : Evolution de la teneur en eau initiale entre les campagnes selon le groupe de culture

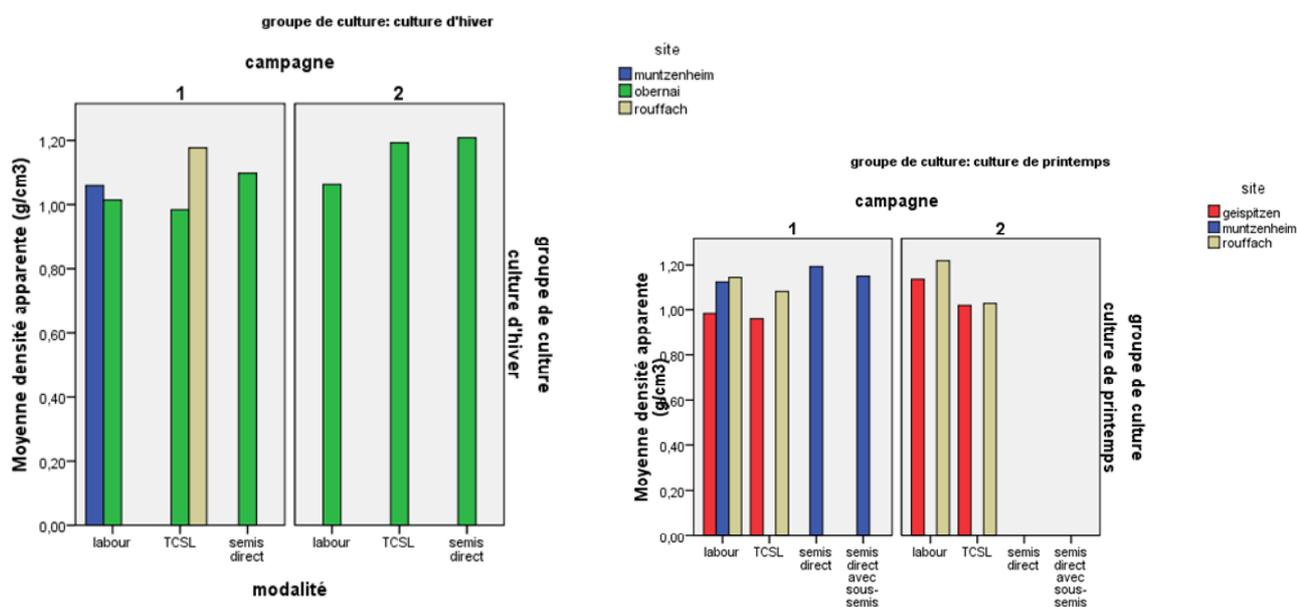


Figure 16 : Evolution de la densité apparente entre les campagnes selon le groupe de culture

2) Comparaisons culture d'hiver/culture printemps

Les valeurs obtenues de S pour les cultures de printemps et d'hiver sont du même ordre de grandeur mais différent selon les méthodes de mesure. Pour la méthode Beerkan (les deux campagnes confondues) la valeur moyenne est de $3,53 \text{ mm/s}^{0,5}$ pour les cultures de printemps et pour les cultures d'hiver la sorptivité moyenne est de $4,11 \text{ mm/s}^{0,5}$. De même pour les valeurs obtenues avec le TRIMS, la valeur de S moyenne pour les cultures d'hiver est de $0,64 \text{ mm/s}^{0,5}$ et de $0,35 \text{ mm/s}^{0,5}$ pour les cultures d'hiver.

Les valeurs de K_f sont semblables pour une méthode quelque soit le type de culture choisie. L'exemple pour le Beerkan illustre cette observation : K_f culture d'hiver = $136,3 \text{ mm/h}$ et K_f pour les cultures de printemps = $122,8 \text{ mm/h}$. Par contre, si on compare que le site d'Obernai et de Geispitzen dont les sols ont des textures proches, on remarque une différence importante entre le K_f du maïs (moyenne de 70 mm/h) et du blé (110 mm/h) pour la méthode Beerkan. Cette différence n'est pas observée avec la méthode TRIMS (moyenne autour de 30 mm/h sur les deux sites) pour laquelle les deux sites montrent des valeurs de K_f quasiment identiques. Il semble alors qu'en période de printemps, les cultures d'hiver infiltrent mieux en condition de saturation (Beerkan) que les cultures de printemps. Ceci peut être dû au développement d'une macroporosité racinaire dans les cultures d'hiver qui est absente dans le maïs.

3) Evolution des paramètres DA , θ_i et θ_s

Durant la deuxième campagne, les mesures ont été réalisées dans des conditions d'humidité plus élevées qu'en première campagne à cause de fréquentes averses, (graphique 15).

La DA est également plus élevée en deuxième campagne sur l'ensemble des modalités testées sauf pour la modalité en TCSL à Rouffach où la DA est légèrement plus faible qu'en première campagne (graphique 16). L'augmentation de la DA résulte de la compaction des sols par rapport à la première campagne où les sols venaient d'être travaillés et affinés. Cette augmentation peut être expliquée par la prise en masse des sols par l'alternance de période humidité/sècheresse.

Par ailleurs, on observe que :

- les DA de Muntzenheim et Rouffach sont en général plus élevées que celles de Geispitzen et Obernai. Ceci est très certainement lié à la teneur en sable plus élevée sur les deux premiers sites que sur les sites de Geispitzen et Obernai qui sont beaucoup plus limoneux ;
- les semis directs montrent des DA plus élevées que les TCSL et labours ;
- les DA des modalités labourées augmentent nettement plus entre les deux campagnes que les modalités en TCSL.

Il est intéressant de savoir si l'évolution de DA et θ_i entre les campagnes influent sur les paramètres K_f et S . Pour répondre à cette question des mises en relations entre les paramètres ont été effectuées. Les résultats de ces tests (K_f/DA et K_f/θ_i) montrent que les facteurs DA et θ_i ne sont pas

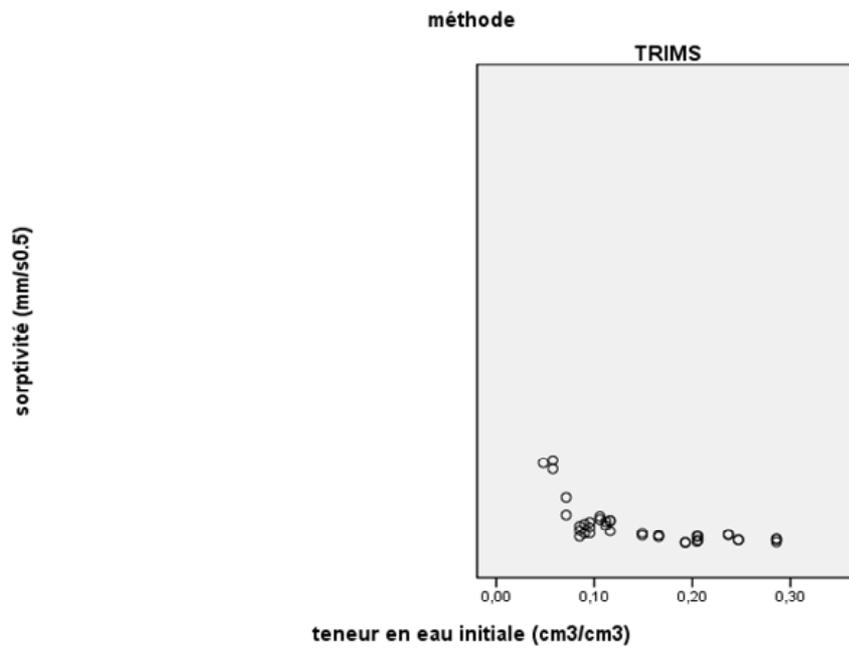


Figure 17 : Evolution de la sorptivité en fonction de la teneur en eau initiale

influent dans la détermination de K_f . A l'inverse pour S , il existe une relation entre la sorptivité et l'humidité initiale (figure 17). Ces observations sont conformes avec les informations disponibles dans la bibliographie sur la sorptivité. Nous constatons que K_f n'est pas influencé par DA et θ_i . Nous allons déterminer si les facteurs sols, cultures et modalités de travail du sol influent sur K_f mais aussi sur S .

4) Evolution des paramètres pour les cultures de printemps.

→ Effet modalité sur la sorptivité

Les modalités de travail du sol n'ont pas d'effet sur la sorptivité ce qui est illustré sur la figure 18. Quelque soit les campagnes, les valeurs de sorptivité pour un site donné sont similaires entre les modalités. Une exception est remarquable pour le site de Geispitzen où la sorptivité est différente d'une modalité à l'autre. Mais globalement la sorptivité ne semble pas influencée par le travail du sol.

→ Effet modalité sur la conductivité hydraulique finale

Avec la méthode TRIMS, la conductivité hydraulique est la plus élevée en labour, intermédiaire en TCSL et la plus faible sur les parcelles en semis direct (Figure 19).

Ce constat n'est pas le même avec la méthode Beerkan (Figure 19). Sur le site de Geispitzen, la conductivité hydraulique finale est plus élevée sur la modalité en TCSL. De même que pour la comparaison entre les cultures d'hiver et les cultures de printemps, il semble que le Beerkan met en évidence la macroporosité biologique (de vers de terre en particulier) plus présente en TCSL qu'en labour que le TRIMS à la tension de -3cm ne détecte pas. Pour les sites de Muntzenheim et de Rouffach, les valeurs de K_f sont similaires quelle que soit la modalité. Pour ces deux derniers sites, la mise en place récente des essais (2010 et 2009) ne permet pas de caractériser l'effet structurant du non labour ni l'augmentation de faune du sol.

→ Effet sol sur la sorptivité

Les valeurs élevées de S sur le site de Geispitzen (Figure 18) en première campagne sont liées aux conditions très sèches sur le site. En deuxième campagne, les valeurs de S sont similaires pour Geispitzen et Rouffach (méthode TRIMS pour deux sites aux caractéristiques texturales différentes) et plus élevées pour Geispitzen avec le Beerkan. Les méthodes de mesures ne permettent pas de mettre en évidence la sensibilité de S en fonction du type de sol. La sorptivité est tout d'abord déterminée par la teneur en eau initiale.

→ Effet sol sur la conductivité hydraulique finale

Avec la méthode Beerkan, les données obtenues de K_f sont plus élevées pour les sites de Muntzenheim et de Rouffach qui sont deux sites à dominante sableuse. La présence de sable dans les sols induit une conductivité hydraulique élevée parce que le sable est drainant et retient mal l'eau. L'effet sol avec le TRIMS n'est pas marqué ; le site de Geispitzen limoneux présente des valeurs de K_f ($K_{\text{flabour}} = 50,7 \text{ mm/h}$ mais avec un écart type de $52,4 \text{ mm/h}$) supérieures à celles de Rouffach

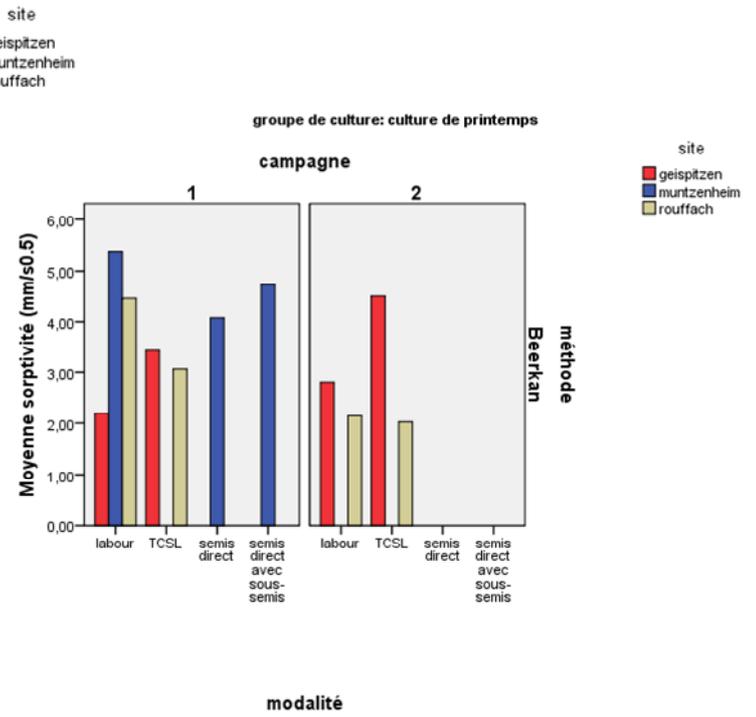
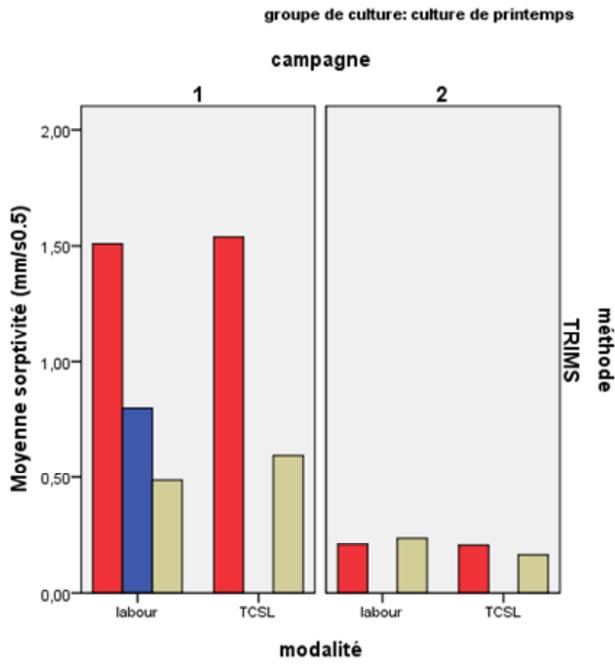


Figure 18 : Evolution des valeurs de la sorptivité pour le groupe de culture de printemps

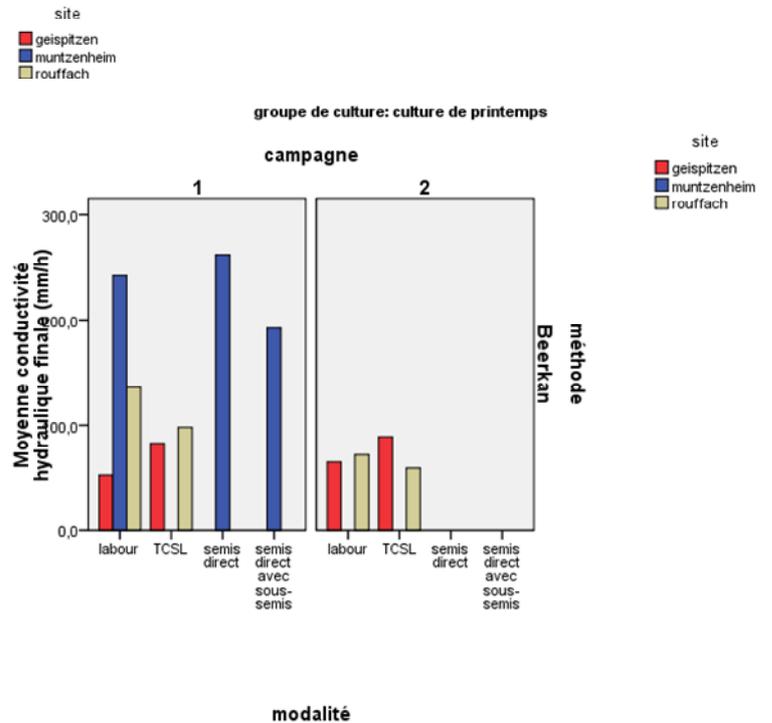
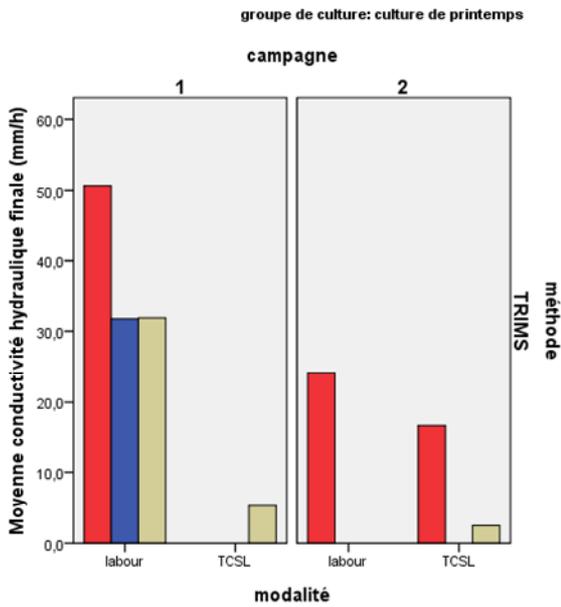


Figure 19 : Evolution des valeurs de la conductivité hydraulique pour le groupe de culture de printemps

($K_{\text{labour}} = 31,9$ mm/h avec un écart type de 8,9 mm/h) et de Muntzenheim ($K_{\text{labour}} = 31,7$ mm/h avec un écart type de 13,6 mm/h) alors que ces derniers sont plus sableux et a priori plus percolants. Ce constat est à nuancer à la vue de la valeur des écarts types avec lesquels sont présentés les valeurs de K_f pour Geispitzen et Muntzenheim. La méthode Beerkan semble plus sensible aux caractéristiques texturales que le TRIMS. Dans le traitement des données du Beerkan, le facteur de Wu intègre des caractéristiques texturales au travers du paramètre α , lui-même fonction de la texture et de la structure du sol.

→ Evolution de la sorptivité entre les deux campagnes

En deuxième campagne, les valeurs de S sont plus faibles qu'en première campagne hormis pour les modalités de Geispitzen (méthode Beerkan). Cette diminution est due à une teneur en eau initiale plus importante en deuxième campagne. La sorptivité étant en relation directe avec l'humidité, la sorptivité diminue quand la teneur en eau initiale augmente.

→ Evolution de la conductivité hydraulique finale entre les deux campagnes

Les deux méthodes de mesure montrent une évolution de K_f à la baisse entre les deux campagnes (Figure 19). Si on prend toutes les observations pour des modalités de culture de printemps pour lesquelles nous avons des données sur les deux campagnes, le K_f de TRIMS passe de 28 à 13 mm/h, et celle de Beerkan va de 92 à 71 mm/h. Ce résultat est conforme à la bibliographie qui décrit une plus faible infiltrabilité des sols dégradés par rapport aux sols non dégradés. Il y a une exception à cette tendance, observée avec le Beerkan : K_f reste plus ou moins stable sur les deux modalités de Geispitzen qui a reçu très peu de pluie entre les deux campagnes et qui est par conséquent peu dégradé.

5) Evolution des paramètres pour les cultures d'hiver

→ Effet modalité sur la sorptivité

Entre les différentes modalités des sites, les valeurs de S sont très peu différentes selon ce critère (Figure 20).

→ Effet modalité sur la conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique (pour un même sol obtenue avec les deux méthodes de mesures) diminue selon l'intensité du travail du sol (Figure 21). Ainsi la conductivité hydraulique d'une parcelle en SD est plus faible qu'une parcelle TCSL, elle-même plus faible qu'une parcelle labourée. Cette évolution entre modalité reste la même pour la deuxième campagne sauf dans le cas du labour à Obernai (Beerkan). La valeur obtenue ($K_f = 169$ mm/h) pour la modalité labour à Obernai est très variable (écart type : 142,1mm/h). La conductivité hydraulique est conditionnée par le travail du sol et les résultantes de ce travail (augmentation de la DA).

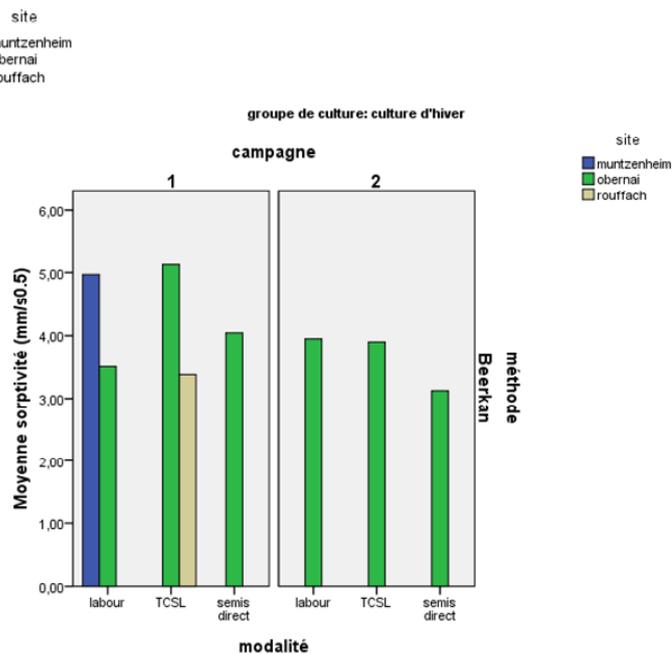
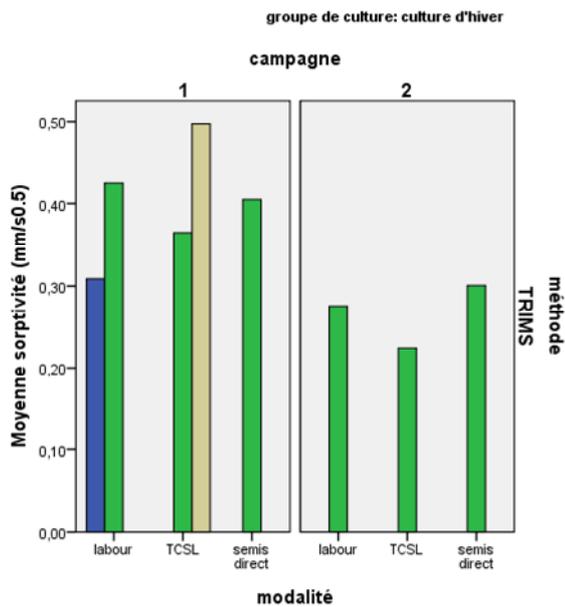


Figure 20: Evolution des valeurs de la sorptivité pour le groupe de culture d'hiver

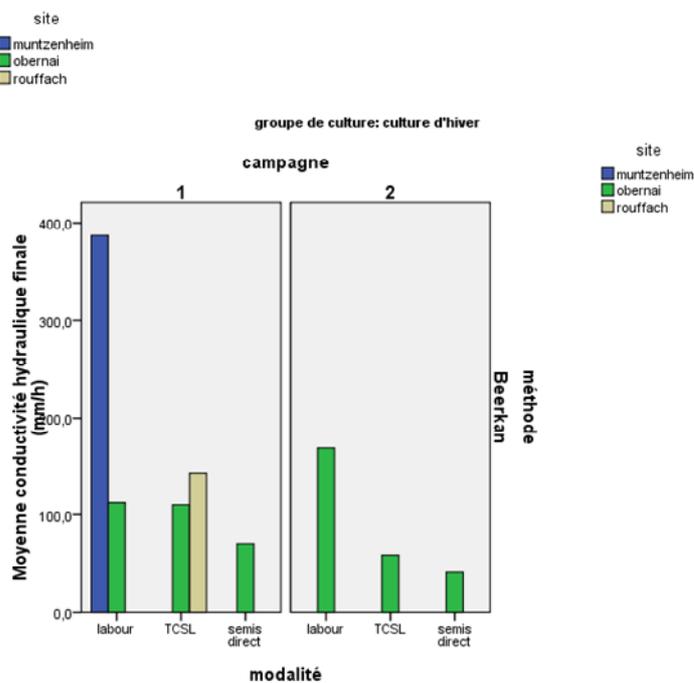
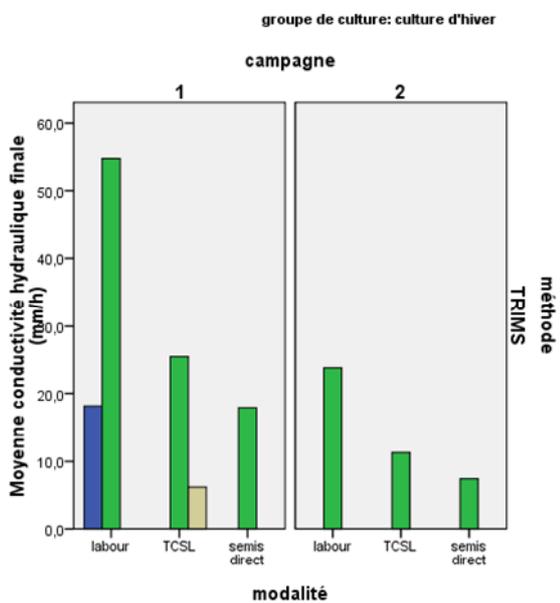


Figure 21 : Evolution des valeurs de la conductivité hydraulique pour le groupe de culture d'hiver

→ Effet sol sur la conductivité hydraulique finale

Pour les cultures de printemps, les valeurs de K_f par la méthode TRIMS ne semblent pas influencées par les caractéristiques du sol (Figure 21). En effet, les valeurs obtenues sur Obernai (même la modalité en SD) sont plus élevées que pour Muntzenheim, sol sableux. Il faut être prudent avec cette observation car la valeur de K_f pour Muntzenheim ($K_f=18,2$ mm/h) présente une grande variabilité (écart type =13,6 mm/h). Par contre les résultats obtenus via la méthode Beerkan semble plus sensible aux caractéristiques du sol : la valeur de K_f à Muntzenheim (labour, sol sableux) est supérieure à celle obtenue à Obernai (toutes modalités confondues, sol limoneux). La méthode d'analyse des résultats du Beerkan intègre des paramètres liés aux caractéristiques du sol (texture et structure du sol).

→ Evolution de la sorptivité entre les deux campagnes

Les valeurs du paramètre S déterminées avec le Beerkan et le TRIMS en deuxième campagne sont plus faibles qu'en première campagne sauf pour le labour d'Obernai (Figure 20). Cette différence est due à des teneurs en eau initiale plus importantes. L'augmentation de la sorptivité en deuxième campagne pour le labour à Obernai peut être due au système racinaire plus développé c'est une culture d'hiver dans un sol travaillé. De plus, le site d'Obernai était moins humide en deuxième campagne ; que les autres sites ; conduit également à des valeurs S plus élevées sur Obernai.

→ Evolution de la conductivité hydraulique finale entre les deux campagnes

Pour les cultures de printemps, les valeurs de K_f diminuent entre les 2 campagnes sauf pour le labour d'Obernai elles augmentent (méthode Beerkan) (Figure 21). Cette observation n'est pas représentative à la vue de la valeur de l'écart type (142,1 mm/h) par rapport à la valeur estimée de K_f (169,0 mm/h). Les parcelles de Rouffach et d'Obernai ont été irriguées. Cette irrigation a dégradée la surface. Plus la surface se dégrade, plus l'infiltrabilité diminue. Ce processus de dégradation des états de surface combiné à la prise en masse des sols permet d'expliquer la diminution de K_f entre les deux campagnes de mesures.

6) Discussion concernant les méthodes de mesure

→ Aspects pratiques des méthodes de terrain

Sur le plan pratique, la méthode Beerkan est simple à appliquer, mais très consommatrice d'eau pour obtenir les 45 min à partir desquels le régime quasi permanent est atteint. Le Beerkan est facile et rapide à installer.

L'installation et la manipulation du TRIMS sont plus délicates. Pour réaliser des mesures avec le TRIMS sur des surfaces rugueuses (présence de mottes scellées et micro relief résultant du travail du sol), il faut mettre une épaisseur de sable parfois supérieure aux 2mm conseillés. Dans ce type de mesure, l'épaisseur de la couche de sable peut être un biais ; mais il est le seul moyen ; pour caractériser les paramètres hydrodynamiques en fonction des EDS. La prise de l'échantillon de θ_f doit

être effectuée le plus vite possible après l'arrêt de la mesure pour avoir la teneur finale dans les cinq premiers centimètres. Le TRIMS consomme beaucoup moins d'eau que le Beerkan.

Le Beerkan permet un peu plus de répétition dans le même temps de travail : environ trois mesures en deux heures contre deux mesures en deux heures pour le TRIMS.

→ Aspects liés aux méthodes d'analyse des données

Il s'avère que des méthodes d'analyse des données de mesures pour les TRIMS et le Beerkan existent, mais aussi qu'elles posent souvent problèmes. La caractérisation des flux latéraux (3D) qui sont à prendre en compte pour les méthodes de mesure à disque et à l'anneau simple, a donné lieu à plusieurs équations dans la littérature. Mon étude a montré que ces équations donnent des résultats assez différents et parfois improbables.

Beerkan

La recherche des méthodes d'analyses des résultats a été plus longue que prévue car il a fallu trouver une méthode alternative au logiciel BEST qui ne fonctionnait pas sur l'ensemble des données Beerkan. Parmi les alternatives à BEST, on a choisi la méthode de Wu comme celle la plus performante. **Xu et al.** (2010) arrive à la même conclusion suite à une comparaison entre BEST et Wu. Ils montrent que BEST n'est pas adapté aux sols sableux et aux situations humides. C'est sûrement pour cette raison que BEST n'a pas fonctionné sur la plupart des mesures en deuxième campagne qui était relativement plus humide. La qualité des résultats dépend de l'amplitude de la variation entre la teneur en eau finale après infiltration et la teneur initiale. Une faible variation d'humidité entraîne une plage de mesure restreinte car le régime quasi permanent est atteint plus rapidement. La méthode de Wu est moins sensible à cela.

TRIMS

Certaines modalités en TRIMS n'ont pas pu être caractérisées. Pour palier à ce manque de données, il aurait fallu effectuer plus de répétitions pour toutes les tensions testées; ceci est lourd à effectuer et ne correspond pas aux objectifs opérationnels de l'ARAA qui cherche des méthodes relativement rapides.

Sur les graphiques représentant la cinétique d'infiltration pour le TRIMS, un phénomène de remontée de la vitesse d'infiltration est visible sur certaines modalités et sites (annexe 5). On n'a pas d'explication claire pour ce phénomène qui n'est pas mentionné dans la littérature à ce sujet.

→ Aspects liés aux résultats obtenus avec les deux méthodes

Les deux méthodes fournissent des résultats utiles, mais différents. Les valeurs absolues de K_f et S que fournisse le TRIMS à la tension -3cm correspondent aux valeurs disponibles dans la littérature et aux mesures déjà faites dans la région. Le TRIMS semble surtout sensible à la teneur en eau initiale et moins aux caractéristiques texturales et structurales (notamment la macroporosité) du sol. Les valeurs

obtenues avec le Beerkan sont dans l'ensemble plus élevées, ce qui s'explique en partie par le fait que la mesure de Beerkan est faite en surcharge et celle du TRIMS en dépression. Les résultats du Beerkan sont aussi sensibles aux conditions initiales mais moins que le TRIMS. Par contre le Beerkan semble mieux différencier les sols et leurs états structuraux que le TRIMS. Le Beerkan a par exemple pu mettre en évidence un effet favorable des TCSL sur l'infiltration sur le site de Geispitzen, ce qui correspond aux mesures de ruissellement faites sur ce site depuis 10 ans. Les effets structuraux des « modalités du travail du sol » sur Geispitzen peuvent expliquer ces bons résultats sur ce site car la modalité TCSL est mise en place depuis 9ans. Le TRIMS n'a pas donné un résultat dans ce sens sur le site de Geispitzen.

La différence de comportement entre les deux méthodes peut s'expliquer par :

- la différence de potentiel (négatif pour le TRIMS et positif pour le Beerkan) : les mesures de TRIMS ne vont pas activer l'ensemble du système poral pour participer à l'infiltration ;

- l'apport de l'eau du TRIMS vers le sol ne modifie pas l'état structural de la surface du sol durant la mesure car c'est une transmission par capillarité. L'apport de l'eau avec le Beerkan change fortement l'état structural de la surface du sol : la surface se sature complètement et l'eau qui tombe sur la surface détache des particules et met en suspension des sédiments. La surface finale est complètement modifiée et ressemble à l'impact d'une pluie très intense. Ceci veut dire que le TRIMS permet de caractériser le comportement d'un état précis, tandis le Beerkan simule plutôt la dynamique d'un événement. Les courbes d'infiltration sont forcément différentes.

On peut donc dire que ces méthodes sont complémentaires et donnent toutes les deux des informations utiles.

VI. CONCLUSION

Les paramètres hydrodynamiques obtenus montrent l'importance des techniques culturales dans le processus d'infiltration. La sorptivité est principalement dépendante de la teneur en eau initiale. La conductivité hydraulique finale est influencée par différents facteurs : les caractéristiques texturales du sol (effet drainant du sable), le mode de travail du sol (les parcelles conduites en SD sont plus compactées que celles en labour qui sont caractérisées par des valeurs de K_f plus élevées) et l'état de surface du sol (les surfaces dégradées infiltrent moins que des surfaces non dégradées). Les résultats des analyses entre les deux méthodes de mesures présentent des valeurs plus élevées pour S et K_f avec le Beerkan que celles issues du TRIMS.

Dans l'hypothèse où la méthode d'analyse avec le logiciel BEST (pour les données Beerkan) ne permet pas d'obtenir des résultats sur l'ensemble des mesures, il me semble intéressant d'utiliser le TRIMS. Le développement des mesures avec le TRIMS ne peut se faire qu'avec la mise au point d'une méthode d'analyse des résultats concluante. Bien que plus complexe à mettre en œuvre, le TRIMS nécessite de faible quantité d'eau par rapport au Beerkan et il faut effectuer plusieurs répétitions (au moins 3) pour chaque tension.

Le Beerkan a montré plus de sensibilité aux états structuraux du sol que le TRIMS, mais les paramètres hydrodynamiques qu'il fournit ne peuvent pas être directement utilisés dans les outils de modélisation.

Personnellement, ma mission m'a permis d'acquérir des connaissances théoriques et techniques sur la thématique « érosion des sols ». Ce que j'ai apprécié dans mon sujet, c'est l'aspect global de l'étude : recherche bibliographique sur les méthodes de mesures terrain et d'analyses des résultats, réalisation des mesures avec les méthodes retenues, test des différentes mesures d'analyses et l'interprétation des résultats. Les contraintes imposées par les mesures de terrain (date de semis et de traitement, conditions météorologiques, disponibilité des différents professionnels) ont été des aspects à ne pas négliger dans la gestion du planning.

Cette expérience me conforte dans mon projet professionnel qui est de travailler en expérimentation végétale et de mettre à disposition les résultats aux professionnels agricoles.

BIBLIOGRAPHIE

- ALI, B., 2008.** Typologie fonctionnelle des états de surface du sol [EDS] pour l'extrapolation des propriétés hydro-érosives. Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur de Strasbourg, 206p.
- AMBROISE, B., 1999.** *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : Processus, facteurs, modèles.* Editions HGA, Bucarest, 200p.
- ARAA, 2007.** <http://www.araa-agronomie.org/> (consulté le 18 juillet 2011)
- ARMAND, R., 2009.** Étude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol. Mise au point d'un indicateur de ruissellement. Thèse de doctorat de l'université de Strasbourg, 209p.
- AUZET, A.V., HEITZ, C., ARMAND, R., GUYONNET, J., MOQUET, J.S., 2005.** Les « coulées de boue » dans le Bas-Rhin : analyse à partir des dossiers de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle. 26p.
- BOERS, Th.M., Van DEURZEN, F.J.M.P., EPPINK, L.A.A.J., RUYTENBERG, R.E., 1992.** Comparison of infiltration rates measured with an infiltrometer, a rainulator and a permeameter for erosion research in SE Nigeria. *Soil Technology*, Volume 5, Issue 1, Pages 13-26
- BOTTINELLI, N., 2010.** Evolution de la structure et de la perméabilité d'un sol en contexte de non labour associé à l'apport d'effluent d'élevage : rôle de l'activité lombricienne. Thèse de doctorat de l'université européenne de Bretagne, 152p.
- CALVET, R., 2003.** *Le sol : Propriétés et fonctions, Tome 2 : Phénomènes physiques et chimiques, Applications agronomiques et environnementales.* Dunod et éditions France Agricole, 511p.
- CHOSSAT, J.C., 2005.** *La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols : choix des méthodes.* Lavoisier et édition TEC&DOC, 720p.
- COQUET, Y., BOUCHER, A., LABAT, C., VACHIER, P., ROGER-ESTRADE, J., 2000.** Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques : Aspects théoriques et pratiques. *Etude et Gestion des Sols*, 7, 1, pages 7 à 24.
- DREAL ALSACE, 2007.** <http://www.alsace.developpement-durable.gouv.fr/etude-de-sensibilite-potentielle-a-r173.html>
- EIJKELKAMP, 1999.** OPERATING INSTRUCTIONS: 09.04 Double ring infiltrometer set, 9p.
- EXPLOITATION D'OBERNAI,** http://www.exploitation-obernai.epl67.fr/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=35&Itemid=57 (consulté le 21/07/2011)
- HILLEL, D., 1974.** *L'eau et le sol : principes et processus physiques.* Vander Editeur,

- IFEN, INRA, Ministère de l'Environnement, 1998.** Cartographie de l'aléa « Erosion des sols » en France. Etudes et Travaux n°18. 63 p. + annexes.
- KWAAD, F.J.P.M., 1982.** Bodemerosie, processen, meetmethoden, factoren. Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium, Universiteit van Amsterdam, 73 p.
- LABORATOIRE D'ECOHYDROLOGIE ECHO,** <http://echo2.epfl.ch/ehydrologie/chapitres/chapitre5/chapitre5.html> (consulté le 15 mars 2011)
- LABREUCHE, J., LE SOUDER, C., CASTILLON, P., OUVRY J.F., REAL B., GERMON J.C., de TOURDONNET. S., 2007.** Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturales Sans Labour (TCSL) en France. 390p.
- LASSABATERE, L., ANGULO-JARAMILLO, R., SORIA UGALDE, J.M., CUENCA, R., BRAUD, I., HAVERKAMP, R., 2006.** Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments-BEST. Soil Sci. Soc. Am. J. 70:521–532. Soil Physics doi:10.2136/sssaj2005.0026
- MASSON, S., 2011.** Comparaison des paramètres physiques de la surface du sol au printemps en fonction des techniques culturales. Rapport de licence GAA, UHA, 19p + annexes.
- MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT.** <http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/donnees-essentielles/sol/le-sol/l-erosion-des-sols.html> (consulté le 27 mai 2011)
- MOEYS, J., 2007.** Variabilité spatiale et déterminismes agro-pédologiques du devenir d'un herbicide dans l'horizon de surface application au cas de l'isoproturon dans un secteur agricole de Beauce chartraine. Thèse de doctorat l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech), 308p.
- MUSY, A., SOUTTER, M., 1991.** *Physique du sol*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 335 p.
- NIMMO, J.R., SCHMIDT, K.M., PERKINS, K.S., STOCK, J.D., 2009.** Rapid Measurement of Field-Saturated Hydraulic Conductivity for Areal Characterization. Vadose Zone J. 8:142–149 doi:10.2136/vzj2007.0159.
- PHILIP, J.R., 1957.** The theory of infiltration : 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Sci., 84, 257-264.
- SOUTTER, M., MERMOUD, A., MUSY, A., 2007.** *Ingénierie des eaux et du sol : Processus et aménagements*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 294 p.
- VANDERVAERE, J.P., VAUCLIN, M., ELRICK, D.E., 2000a.** Transient Flow from Tension Infiltrimeters: I. The Two-Parameter Equation. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:1263–1272.
- VANDERVAERE, J.P., VAUCLIN, M., ELRICK, D.E., 2000b.** Transient Flow from Tension Infiltrimeters: II. Four Methods to Determine Sorptivity and Conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:1272–1284.

VAN DIJK, P., KOLLER, R., LASSERRE, D., GAUDILLAT, D., 2007. L'impact du non labour sur la quantité et la qualité du ruissellement et de la production végétale: résultats de la campagne 2007 sur le site de Geispitzen. 35p.

VAN DIJK, P., KOLLER, R., LASSERRE, D., GAUDILLAT, D., 2008. L'impact du non labour sur la quantité et la qualité du ruissellement et de la production végétale: résultats de la campagne 2008 sur le site de Geispitzen. 28p.

VAN DIJK P., SAUTER J., KOLLER R. & AUZET A-V., 2009. Cartographie de la sensibilité à l'érosion des sols et du risque potentiel de coulées d'eaux boueuses en Alsace. Dans : Actes des 10èmes JES (Journées d'Etude des Sols), 11 à 15 mai 2009, Strasbourg, 369-370.

VIAN J.F., 2009. Comparaison de différentes techniques de travail du sol en agriculture biologique: effet de la structure et de la localisation des résidus sur les microorganismes du sol et leurs activités de minéralisation du carbone et de l'azote. Thèse de doctorat de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech), 204p.

REYNOLDS, W.D., ELRICK, D.E., 1990. Poned infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. Published in Soil sci.Soc. Am. J. 54:1233-1241.

SCHAUB, A., BLATZ, A., RAPP, O., 2010. Essais systèmes de culture innovants en Alsace, mise en place des essais et campagne 2009 : rapport synthétique. 40p.

STRUDLEY, M.W., GREEN, T.R., Ascough, J.C., 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. Soil & Tillage Research 99 ; 4-48

Webographie

XU, X., LEWIS, C., LIU, W., ALBERTSON, J.D., ET KIELY, G.(2010). Analysis of single-ring infiltrometer data: comparison of BEST and Wu method. Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-9627-1, EGU General Assembly 2010.

ANNEXES

<u>ANNEXE 1 : Feuille de terrain TRIMS</u>	A
<u>ANNEXE 2 : Feuille de terrain Beerkan</u>	B
<u>ANNEXE 3 : Valeurs des paramètres S et K_f</u>	C
<u>ANNEXE 4 : Valeur des paramètres DA_i, θ_i</u>	D
<u>ANNEXE 5 : Cinétique d'infiltration (méthode TRIMS) présentant le phénomène de remontée de la vitesse d'infiltration</u>	E

ANNEXE 3 : Valeurs des paramètres S et K_f

Tableau 1 : Valeurs de la sorptivité ($\text{mm/s}^{0,5}$) obtenues par la méthode Beerkan

Sorptivité ($\text{mm/s}^{0,5}$) (méthode Beerkan)						
Site	Groupe de culture	Campagne	Modalité	Moyenne	N	Ecart-type
Geispitzen	culture de printemps	1	labour	2,19	6	,23
			TCSL	3,44	6	,54
		2	labour	2,80	6	,52
			TCSL	4,50	6	1,36
Muntzenheim	culture d'hiver	1	labour	4,97	6	,45
			Total	4,97	6	,45
	culture de printemps	1	labour	5,37	6	,95
			semis direct	4,08	6	,69
			semis direct avec sous-semis	4,74	6	2,10
Obernai	culture d'hiver	1	labour	3,50	6	,45
			TCSL	5,13	6	1,55
			semis direct	4,04	6	1,08
		2	labour	3,95	5	1,17
			TCSL	3,90	6	1,47
semis direct	3,12	6	1,38			
Rouffach	culture d'hiver	1	TCSL	3,38	6	,95
			labour	4,46	6	1,34
	culture de printemps	1	TCSL	3,07	6	,24
			labour	2,14	6	,65
		2	TCSL	2,02	6	,55

moyenne de S pour CP **3,53** **1,254185**
 moyenne de S pour CH **4,11** **0,745742**

Tableau 2 : Valeurs de la sorptivité ($\text{mm/s}^{0,5}$) obtenues avec le TRIMS

Sorptivité ($\text{mm/s}^{0,5}$) (méthode TRIMS)						
Site	Groupe de culture	Campagne	Modalité	Moyenne	N	Ecart-type
Geispitzen	culture de printemps	1	labour	1,51	2	,11
			TCSL	1,54	1	.
		2	labour	,21	2	,00
			TCSL	,20	3	,03
Muntzenheim	culture d'hiver	1	labour	,31	2	,03
	culture de printemps	1	labour	,80	2	,21
Obernai	culture d'hiver	1	labour	,42	3	,10
			TCSL	,36	3	,09
			semis direct	,41	2	,11
		2	labour	,28	2	,02
			TCSL	,22	2	,07
semis direct	,30	2	,01			
Rouffach	culture d'hiver	1	TCSL	,50	2	,05
			labour	,49	3	,11
	culture de printemps	1	TCSL	,59	2	,04
			labour	,24	2	,05
		2	TCSL	,16	2	,00

moyenne de S pour CP ,64 0,545568
 moyenne de S pour CH ,35 0,089441

Tableau 3 : Valeurs de la conductivité hydraulique finale (mm/h) obtenues par le Beerkan

Conductivité hydraulique finale (mm/h) (méthode Beerkan)						
Site	Groupe de culture	Campagne	Modalité	Moyenne	N	Ecart-type
Geispitzen	culture de printemps	1	labour	52,5	6	7,5
			TCSL	82,6	6	9,6
		2	labour	65,0	6	18,3
			TCSL	89,0	6	23,1
Muntzenheim	culture d'hiver	1	labour	387,1	6	52,8
			labour	242,4	6	47,0
	culture de printemps	1	semis direct	262,4	5	44,7
			semis direct avec sous-semis	192,1	6	81,1
Obernai	culture d'hiver	1	labour	111,8	6	11,2
			TCSL	109,7	6	33,5
			semis direct	70,3	6	15,3
	2	labour	169,0	5	142,1	
		TCSL	58,7	6	37,0	
		semis direct	40,6	6	23,1	
Rouffach	culture d'hiver	1	TCSL	143,0	6	89,1
	culture de printemps	1	labour	136,3	6	19,9
			TCSL	97,9	6	7,4
			2	labour	71,7	6
TCSL	59,2	6		18,9		

moyenne de Kf pour CP 122,8 75,56077
moyenne de Kf pour CH 136,3 110,0912

Tableau 4 : Valeurs de la conductivité hydraulique finale (mm/h) obtenues par le TRIMS

Conductivité hydraulique finale (mm/h) (méthode TRIMS)						
Site	Groupe de culture	Campagne	Modalité	Moyenne	N	Ecart-type
Geispitzen	culture de printemps	1	labour	50,7	2	52,4
			labour	24,2	2	5,9
		2	TCSL	16,7	3	6,1
Muntzenheim	culture d'hiver	1	labour	18,2	2	13,6
			labour	31,7	1	.
Obernai	culture d'hiver	1	labour	54,8	3	21,1
			TCSL	25,6	3	4,4
			semis direct	17,9	2	2,6
	2	labour	23,9	2	4,8	
		TCSL	11,3	1	.	
		semis direct	7,5	2	4,1	
Rouffach	culture d'hiver	1	TCSL	6,2	2	6,4
	culture de printemps	1	labour	31,9	3	8,9
			TCSL	5,2	2	3,1
			2	TCSL	2,5	1

moyenne de Kf pour CP 23,3 16,81784
moyenne de Kf pour CH 20,7 15,51838

ANNEXE 4 : Valeur des paramètres DA, θ_i

Tableau 5 : Valeurs des densités apparentes

Densité apparente (g/cm ³)									
Site	Groupe de culture	Campagne	Modalité	Moyenne	N	Ecart-type			
Geispitzen	culture de printemps	1	labour	,97	8	,04			
			TCSL	,96	7	,01			
		2	labour	1,15	8	,03			
			TCSL	1,02	9	,03			
Muntzenheim	culture d'hiver	1	labour	1,05	8	,01			
			labour	1,11	8	,03			
	culture de printemps	1	semis direct	1,19	6	,00			
			semis direct avec sous-semis	1,15	6	,00			
			Obernai	culture d'hiver	1	labour	,98	9	,10
						TCSL	,98	9	,04
2	semis direct	1,10			8	,04			
	labour	1,08			8	,04			
Rouffach	culture de printemps	1	TCSL	1,19	8	,08			
			semis direct	1,21	8	,01			
		2	labour	1,22	8	,01			
			TCSL	1,03	8	,01			
	culture d'hiver	1	TCSL	1,18	8	,04			
			labour	1,15	9	,01			

Tableau 6: Valeurs des teneurs en eau initiale (cm³/cm³)

Teneur en eau initiale (cm ³ /cm ³)									
Site	Groupe de culture	Campagne	Modalité	Moyenne	N	Ecart-type			
Geispitzen	culture de printemps	1	labour	6,08%	8	,002			
			TCSL	5,84%	7	,005			
		2	labour	29,41%	8	,029			
			TCSL	27,02%	9	,012			
Muntzenheim	culture d'hiver	1	labour	14,02%	8	,005			
			labour	9,00%	8	,011			
	culture de printemps	1	semis direct	9,84%	6	,000			
			semis direct avec sous-semis	15,85%	6	,000			
			Obernai	culture d'hiver	1	labour	8,58%	9	,007
						TCSL	9,90%	9	,010
2	semis direct	12,26%			8	,020			
	labour	9,80%			8	,042			
Rouffach	culture de printemps	1	TCSL	12,64%	8	,048			
			semis direct	18,14%	8	,034			
		2	labour	10,54%	8	,004			
			TCSL	12,94%	9	,010			
	culture d'hiver	1	labour	12,53%	8	,012			
			TCSL	18,70%	8	,012			
culture de printemps	2	labour	15,76%	8	,022				
		TCSL	15,76%	8	,022				

ANNEXE 5 : Cinétique d'infiltration (méthode TRIMS) présentant le phénomène de remontée de la vitesse d'infiltration

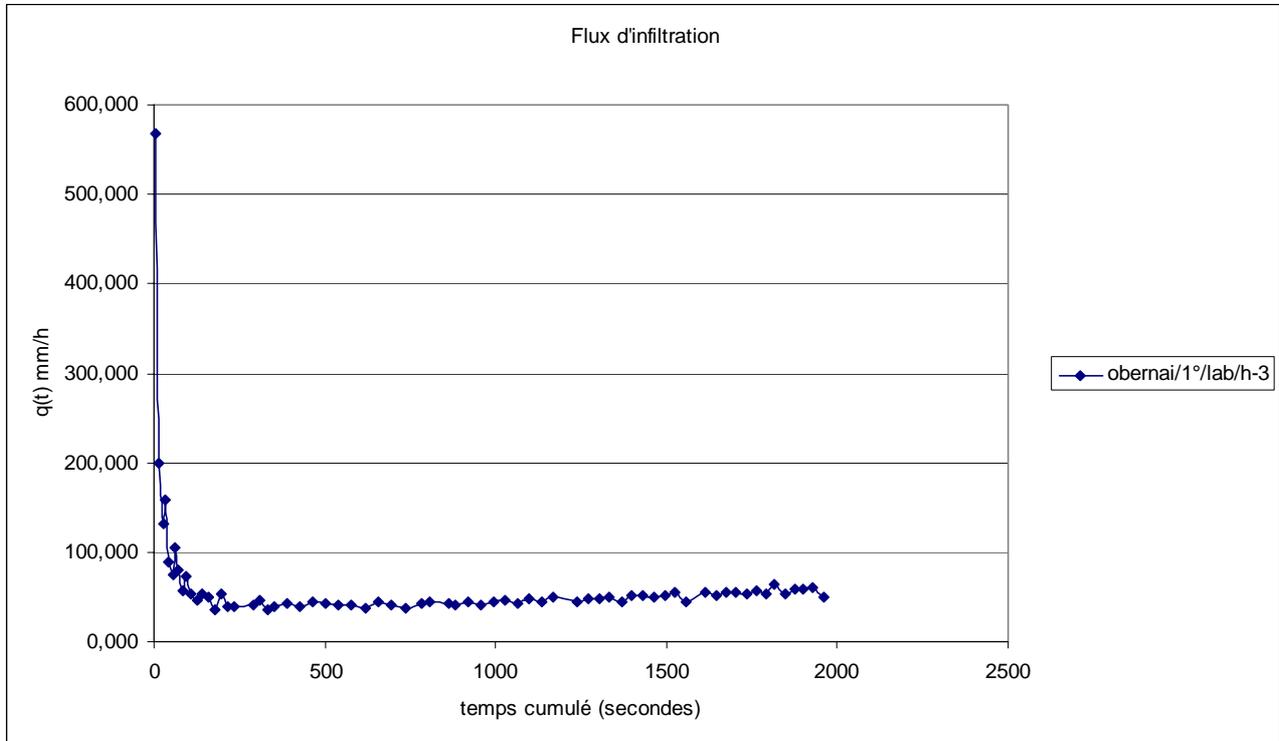


Figure 1 : Cinétique d'infiltration remontante (exemple pour Obernai en labour blé au potentiel h-3cm en première campagne)

Abstract

Soil erosion by water is a natural process which modifies the surface of the soil and leads to sediment transport. Overland flow in the Alsace mainly occurs during high intensity rainfall in spring and early summer. In agricultural landscapes in the Alsace, sloping fields with loess-derived soils cultivated with summer crops are most sensitive to soil erosion, because they are hardly protected from the rain by the crop cover during the early summer storms. The infiltration capacity of the soil, however, varies between fields. Parameters such as the saturated hydraulic conductivity and the sorptivity permit the quantitative description of the infiltration process. These two parameters were measured in situ using a tension disk infiltrometer (TRIMS) and a single-ring semi-constant head infiltrometer (Beerkan). Several cropping systems have been tested: winter crops (wheat and barley) and summer crops (maïs) under various tillage variants (conventional ploughing, and conservation tillage without ploughing such as mulching and direct drilling). Two measuring campaigns were conducted in order to assess the evolution during the period mid-may to mid-june. Results show that the saturated hydraulic conductivity decreases during this period. Direct drilling had lower infiltration than the mulch and conventional tillage. The measurements confirm the dependence of sorptivity from initial soil moisture content: the dryer the soil, the higher the sorptivity. The obtained data will be used for parameterizing a soil erosion model and an overland flow indicator.

Résumé

L'érosion hydrique des sols est un phénomène naturel provoquant la modification des surfaces et le transport de particules. En Alsace, les principaux épisodes de ruissellement ont lieu lors des forts orages de printemps et de début d'été. Les parcelles sensibles à l'érosion sont des parcelles limoneuses cultivées en pente avec des cultures de printemps (maïs) ayant une faible couverture du sol lors des orages. Les parcelles n'ont pas toutes la même capacité à infiltrer l'eau. Les paramètres hydrodynamiques du sol comme la conductivité hydraulique à saturation et la sorptivité permettent de caractériser l'infiltrabilité des sols. La détermination *in situ* de ces deux paramètres a été réalisée avec un infiltromètre à disque (TRIMS) et un infiltromètre simple disque à charge semi-constante (Beerkan). Différentes modalités ont été testées : culture d'hiver (blé ou orge) et culture de printemps (maïs) et conduites selon différentes techniques de travail du sol (labour, techniques culturales sans labour et semis direct). Deux campagnes de mesures ont été effectuées afin de suivre l'évolution des paramètres. Les résultats des mesures montrent une diminution de la conductivité hydraulique entre les deux campagnes. La conductivité hydraulique en semis direct est plus faible que celle des techniques culturales sans labour et celle du labour. Mes mesures ont mis en avant la dépendance de la sorptivité à la teneur en eau initiale, plus la teneur en eau d'un sol est faible plus la valeur de la sorptivité sera grande. Les données obtenues seront utilisées pour le paramétrage d'un modèle d'érosion et d'un indicateur de ruissellement.