

Ministère de l'Agriculture et de la Pêche

ECOLE NATIONALE d'INGENIEURS des TRAVAUX AGRICOLES  
de BORDEAUX  
1, cours du Général de Gaulle - 33170 GRADIGNAN

MEMOIRE de fin d'études

pour l'obtention du titre

d'Ingénieur des Techniques Agricoles

**Construction et validation d'un indicateur  
« Ruissellement » (IRU) basé sur un modèle dans  
le cadre de la méthode INDIGO®**

*TRIBOUILLARD Caroline*

Option : *Gestion Durable des Espaces*

Etude réalisée à l'Unité Mixte de Recherche Nancy-Colmar

## *Remerciements*

*Je tiens tout d'abord à remercier Christian Bockstaller qui a su me communiquer sa passion de la Recherche, m'a montré sa rigueur scientifique tout en faisant preuve de patience et de gentillesse. Je me souviens de sa phrase pour me rassurer : "Fait partie de la Recherche que de ne pas trouver".*

*Merci aussi à Anne-Véronique Auzet de l'Institut géographique de Strasbourg, à Philippe Martin de l'Institut National d'Agronomie Paris-Grignon ainsi qu'à l'ensemble des chercheurs rencontrés lors de réunions, pour leurs conseils avisés et leur patience lorsqu'ils répondaient avec intérêt à mes questions parfois naïves.*

*Je pense aussi à Romain Armand, stagiaire à l'Institut Géographique de Strasbourg, qui m'a présenté un aspect ensoleillé de l'Alsace, lors de notre sortie sur le terrain.*

*Je n'oublie pas non plus l'œil expert de notre technicien, Aimé Blatz.*

*Merci enfin à toute l'équipe "agronomie durable" et plus généralement à tout le personnel de l'INRA de Colmar qui ont constitué un environnement épanouissant et rassurant.*

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>- 1 -</b>
<b>PARTIE 1 : LES PHENOMENES DE RUISSELLEMENT ET D'EROSION HYDRIQUE SUR PARCELLES AGRICOLES : SITUATION DU PROBLEME ET ETAT DES CONNAISSANCES</b> .....	<b>- 2 -</b>
<b>1 LES DIFFERENTES FORMES DE RUISSELLEMENT ET D'EROSION HYDRIQUE</b> .....	<b>- 3 -</b>
1.1    GENESE DU RUISSELLEMENT.....	- 3 -
1.1.1    Les différents processus de genèse du ruissellement.....	- 3 -
1.1.2    La genèse du ruissellement dans le contexte des sols limoneux du nord de l'Europe .....	- 4 -
1.2    LES FACTEURS DU RUISSELLEMENT .....	- 5 -
1.2.1    Influence des états de surface (EDS) sur l'infiltration et le ruissellement .....	- 5 -
1.2.2    Influence de la rugosité.....	- 6 -
1.2.3    Influence du couvert végétal et les résidus de cultures.....	- 8 -
1.2.4    Le système de culture.....	- 8 -
1.3    EROSION HYDRIQUE DANS UN CONTEXTE LIMONEUX.....	- 9 -
1.3.1    Définition .....	- 9 -
1.3.2    Les formes de l'érosion.....	- 9 -
<b>2 LES DEGATS ENGENDRES PAR LE RUISSELLEMENT ET L'EROSION HYDRIQUE</b> .....	<b>- 10 -</b>
2.1    LES CONSEQUENCES SUR LE TERRITOIRE AGRICOLE.....	- 10 -
2.2    A L'AVAL : LES CONSEQUENCES POUR LES INSTALLATIONS HUMAINES.....	- 11 -
2.3    A L'ECHELLE REGIONALE : LA POLLUTION DE L'EAU .....	- 11 -
<b>3 QUELLES METHODES D'EVALUATION ?</b> .....	<b>- 13 -</b>
3.1    LORSQUE LA REALITE DEVIENT TROP COMPLEXE POUR FAIRE L'OBJET DE MESURES DIRECTES, LES OUTILS DISPONIBLES .....	- 13 -
3.1.1    Les mesures directes du ruissellement .....	- 14 -
3.1.2    Les modèles.....	- 15 -
3.1.3    Les indicateurs .....	- 15 -
3.2    LES INDICATEURS INDIGO® : UN COMPROMIS ENTRE DISPONIBILITE DE L'INFORMATION, FIABILITE DES SORTIES ET PERTINENCE POUR L'UTILISATEUR.....	- 16 -
3.2.1    Définition des utilisateurs et des objectifs.....	- 16 -
3.2.2    Construction de l'indicateur .....	- 16 -
3.2.3    Détermination des normes et des seuils de veto .....	- 16 -
3.2.4    Test de sensibilité.....	- 17 -
3.2.5    Validations .....	- 17 -
3.3    TRAVAUX DEJA EFFECTUES DANS LE CADRE D'INDIGO® SUR LE RUISSELLEMENT .....	- 18 -
<b>PARTIE 2 : CONSTRUCTION DE L'INDICATEUR I<sub>RU</sub></b> .....	<b>- 19 -</b>
<b>1 STRUCTURE DE L'INDICATEUR I<sub>RU</sub></b> .....	<b>- 20 -</b>
1.1    PRINCIPE DE L'INDICATEUR I <sub>RU</sub> .....	- 20 -
1.2    RELATIONS ENTRE LES VARIABLES .....	- 22 -
1.2.1    L'état de surface du sol : facteur décisif dans la détermination du coefficient de ruissellement.....	- 22 -
1.2.2    Impact de la couverture du sol sur le coefficient de ruissellement.....	- 25 -
1.2.3    Impact de traces de roues sur le coefficient de ruissellement.....	- 26 -
<b>2 DETAIL DE LA CONSTRUCTION : DETERMINATION DES PARAMETRES ET DES REGLES DE DECISION</b> .....	<b>- 27 -</b>
2.1    DETERMINATION DU CUMUL DE PLUIE NECESSAIRE POUR ATTEINDRE LES FACIES F1 ET F2 .....	- 28 -
2.1.1    Présentation du cumul de pluie théorique pour atteindre les faciès F1 et F2 .....	- 28 -
2.1.2    Les facteurs correcteurs du cumul de pluie théorique .....	- 28 -
2.2    DETERMINATION DU COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT LORS D'UNE DECADE I (CR <sub>i</sub> ) .....	- 36 -
2.2.1    Présentation du coefficient de ruissellement maximal hors traces de roues.....	- 36 -
2.2.2    Les facteurs correcteurs du coefficient de ruissellement maximal hors traces de roues.....	- 37 -
2.2.3    Détermination du coefficient de ruissellement sur traces de roues .....	- 41 -

2.3	CALCUL DE L'INDICATEUR $I_{RU}$ AU COURS D'UNE DECADE I .....	- 41 -
2.3.1	Calcul du pourcentage de la surface parcellaire tassée lors d'une décade i .....	- 41 -
2.3.2	Calcul de $I_{RU}$ dans le cas où le faciès F1 ou F2 n'est pas atteint lors de la décade .....	- 42 -
2.3.3	Calcul de $I_{RU}$ dans le cas où le faciès F1 ou F2 est atteint lors de la décade .....	- 42 -
<b>PARTIE 3 : EVALUATION DE L'INDICATEUR <math>I_{RU}</math> PRESENTATION DES RESULTATS .....</b>		<b>- 44 -</b>
<b>1</b>	<b>RESULTATS DU TEST DE SENSIBILITE.....</b>	<b>- 45 -</b>
<b>2</b>	<b>RESULTATS DE LA VALIDATION : COMPARAISON DES SORTIES DE L'INDICATEUR A DES DONNEES MESUREES .....</b>	<b>- 47 -</b>
2.1	COMPARAISON DES SORTIES DE $I_{RU}$ A DES MESURES REALISEES SUR MICROPARCELLES EXPERIMENTALES.....	- 47 -
2.2	COMPARAISON DES SORTIES DE $I_{RU}$ A DES MESURES REALISEES A L'ECHELLE DE LA PARCELLE AGRICOLE.....	- 50 -
<b>3</b>	<b>DISCUSSION ET UTILISATIONS POSSIBLES .....</b>	<b>- 51 -</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>		<b>- 53 -</b>

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

---

**Figure 1 :** Les stades de dégradation de la surface du sol sous l'action des pluies

**Figure 2 :** Evolution des EDS d'un sol limoneux : formation d'une croûte de battance

**Figure 3 :** Mécanismes de la désagrégation des mottes

**Figure 5 :** Dégâts suite à une coulée boueuse. Commune de Bloitzheim

**Figure 2 :** Placette expérimentale (15 m<sup>2</sup>) de mesure du ruissellement.

**Figure 7 :** Schéma conceptuel de construction de l'indicateur

**Figure 8 :** Influence du couvert végétal sur l'évolution de l'état structural du sol

**Figure 9 :** Diagrammes dynamiques de l'évolution du cumul de pluie (A), du coefficient de ruissellement et de l'état structural du sol entre deux opérations de travail du sol (B)

**Figure 10 :** Diagramme dynamique du cumul de pluie nécessaire au changement de faciès en fonction de la teneur en matière organique

**Figure 11 :** Exemple de calcul du taux de résidus en surface du sol

**Figure 12 :** Diagramme dynamique du cumul de pluie nécessaire au changement de faciès en fonction du taux de recouvrement du sol par les résidus de récolte

**Figure 13 :** Diagramme dynamique de l'évolution des EDS en fonction du couvert végétal vivant

**Figure 14 :** Diagramme dynamique de l'évolution des EDS en fonction de la rugosité

**Figure 15 :** Diagramme dynamique de l'évolution du coefficient de ruissellement en fonction de la rugosité

**Figure 16 :** Diagramme dynamique de l'évolution du coefficient de ruissellement en fonction de la couverture du sol

**Figure 17 :** Comparaison entre les volumes ruisselés mesurés et calculés ( $I_{RU}$ ) sur placettes expérimentales à Limburg

---

**Tableau 1 :** Formes d'érosion en fonction des processus de détachement des particules et de la localisation des pertes en terre

**Tableau 2 :** Classes de rugosité

**Tableau 3 :** Détermination du faciès du sol (d'après Boiffin, 1984)

**Tableau 4 :** Mesure des coefficients de ruissellement en rapport avec le taux de recouvrement du sol par les végétaux

**Tableau 5 :** Notation des facteurs correcteurs de  $PF_{2th}$

**Tableau 6 :** Hauteur de pluie nécessaire non corrigée pour atteindre le faciès F2 ( $PF_{2th}$ ) par date de semis et par type de sol

**Tableau 7 :** Coefficients correcteurs appliqués à  $PF_{2th}$  en fonction de la teneur en matière organique

**Tableau 8 :** Taux de recouvrement de la surface du sol par les résidus après récolte et avant travail du sol selon le type de précédent cultural

**Tableau 9 :** Part de résidus de culture conservés à la surface du sol en fonction de l'outil de travail du sol

**Tableau 10 :** Coefficients correcteurs appliqués à  $PF_{2th}$  en fonction du taux de résidus en surface

**Tableau 11 :** Coefficients correcteurs appliqués à  $PF_{2th}$  en fonction du type de système racinaire du végétal et de son taux de recouvrement du sol (issu de l'analyse des résultats de Gallien et al., 1995 et Roose, 1994)

**Tableau 12 :** Coefficients correcteurs appliqués à  $PF_{2th}$  en fonction de la classe de rugosité initiale du sol

**Tableau 13 :** Valeur du coefficient de ruissellement maximal ( $CR_{i\ Max}$ ) hors traces de roues

**Tableau 14 :** Notation des facteurs correcteurs de  $CR_{i\ Max}$

**Tableau 15 :** Influences combinées de la rugosité et de l'intensité des précipitations sur le coefficient de ruissellement en fonction du faciès atteint : valeurs du coefficient  $f_{F,R}$

**Tableau 16 :** Hauteur de pluie nécessaire au passage d'une classe de rugosité à la classe inférieure

**Tableau 17 :** Valeur du coefficient de ruissellement sur traces de roues

**Tableau 18 :** Test de sensibilité : intervalles de variation des variables d'entrée de  $I_{RU}$

**Tableau 19 :** Test de sensibilité : valeurs des variables fixes dans les trois cas envisagés

**Tableau 20 :** Comparaison des valeurs obtenues à l'aide des indices retenus pour les données de Limburg pour  $I_{Ru}$  et RUIS

**Tableau 21 :** Comparaison des sorties de l'indicateur aux valeurs mesurées sur parcelle sur le site de Geispitzen.

# Introduction

Depuis les vingt dernières années, l'érosion hydrique des terres cultivées, et plus particulièrement des sols limoneux des régions de grande culture, connaît un fort accroissement en France et devient de ce fait, un enjeu majeur pour la protection des sols agricoles. Outre les problèmes d'ordre strictement agronomique entraînant une baisse de rendement supportée par l'agriculteur, l'érosion hydrique peut également avoir des impacts néfastes sur la qualité des eaux (augmentation de la turbidité et de la teneur en phosphore responsable de l'eutrophisation, risque de contamination par résidus de produits phytosanitaires...) ou occasionner des frais importants de déblaiement et de nettoyage des routes, chemins et canaux.

Pourtant, à l'heure actuelle, les sols ne bénéficient d'aucune politique spécifique de préservation. Ils relèvent d'une réglementation générale et sont intégrés souvent de façon implicite dans les dispositifs de réglementation, d'incitation ou de contractualisation (Stengel, 1999). La mise en place de mesures préventives contre l'érosion hydrique devient donc un enjeu important pour la préservation de la ressource et l'accompagnement d'un progrès respectueux de l'environnement. Des outils d'évaluation s'avèrent alors nécessaires pour aider à cette mise en place.

L'équipe "Agriculture Durable" de l'UMR, INPL, ENSAIA, INRA Nancy-Colmar a développé, en collaboration avec l'ARAA, une méthode visant à évaluer les impacts des pratiques agricoles sur les différentes composantes de l'environnement et à aider les acteurs à prendre des décisions respectueuses du milieu. Cette méthode, dite méthode INDIGO<sup>®</sup>, basée sur des indicateurs, n'intègre pas encore les problèmes de ruissellement et d'érosion.

Etant donné les enjeux économiques, sociaux, environnementaux et agronomiques de ces processus, l'équipe agronomie-environnement de l'INRA Nancy-Colmar en collaboration avec l'Institut de Mécanique des Fluides et des Solides (IMFS) a entrepris la création d'indicateurs qui, à terme, permettront de fournir un diagnostic des systèmes de culture relatif aux questions du ruissellement et des pertes en terre générées par l'érosion hydrique.

L'objectif de ce stage sera donc de participer à l'élaboration d'un indicateur du ruissellement selon la méthodologie INDIGO<sup>®</sup> proposée par Girardin et al. (1999).

La construction de cet indicateur a été amorcée par Steffan (2001) et Flaitz (2003). Notre travail consistera donc à finaliser ce projet. Une fois opérationnel, cet indicateur devra faire l'objet d'une validation

Dans un premier temps, nous situerons le problème dans son contexte en présentant les mécanismes du ruissellement, l'état actuel des connaissances à ce sujet et les enjeux soulevés. Nous présenterons ensuite les étapes de la construction de l'indicateur  $I_{RU}$  avant de procéder à son évaluation qui fera l'objet d'une troisième et dernière partie.

## **Partie 1 :**

**Les phénomènes de ruissellement et d'érosion  
hydrique sur parcelles agricoles :**

**Situation du problème et état des connaissances.**

# 1 Les différentes formes de ruissellement et d'érosion hydrique

## 1.1 Genèse du ruissellement

### 1.1.1 Les différents processus de genèse du ruissellement

- Ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration

Le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration ou ruissellement hortonien se produit lorsque l'intensité de la pluie est supérieure à la capacité d'infiltration du sol. Cette capacité d'infiltration décroît au cours du temps jusqu'à une valeur constante à saturation : la conductivité hydraulique à saturation. Cependant, *in situ*, cette valeur est très variable dans le temps et dans l'espace. Tout d'abord, l'état structural de surface qui évolue sous l'effet de facteurs climatiques, biologiques et anthropiques est responsable d'une très importante variation temporelle de la capacité d'infiltration (Boiffin, 1984). Par ailleurs, le microrelief induit non seulement un retard au ruissellement mais également une différence de capacité d'infiltration, entre les creux et les bosses, liée à une différence de développement de la croûte de battance. (Fox et Le Bissonnais, 1998).

- Ecoulement de subsurface

L'écoulement de subsurface peu profond ou ruissellement hypodermique se produit lorsque la conductivité latérale est beaucoup plus importante que la conductivité verticale. Des conditions favorables existent, à la faveur de changements de texture ou de structure dans le sol, quand un horizon perméable recouvre un horizon quasi imperméable sur des terrains à fortes pentes.

- Ruissellement sur sols saturés

Le ruissellement sur sols saturés se produit lorsque la capacité du sol à stocker et à transmettre latéralement le flux d'eau est dépassée par la pluie. La remontée de la nappe alimentée par les précipitations coïncidant avec une section verticale concave du talweg, et une faible pente constituent des conditions favorables à la genèse du ruissellement sur surfaces saturées.

Dans certaines situations, des ruissellements de différentes natures peuvent coexister et le type de ruissellement prédominant peut varier au cours d'une année. Sur les plateaux cachois, le ruissellement est essentiellement de type hortonien mais des écoulements hypodermiques peuvent également être envisagés sur des semelles de labour très marquées. Le ruissellement sur sols saturés n'est pas à exclure dans les fonds de vallées mais ne peut concerner les zones de plateau où les sols sont naturellement bien drainés.

### 1.1.2 La genèse du ruissellement dans le contexte des sols limoneux du nord de l'Europe

Les sols cultivés du nord de l'Europe présentent une très faible stabilité structurale du fait de leur texture et de leur faible teneur en matière organique. Ils sont donc très sensibles à la battance. (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

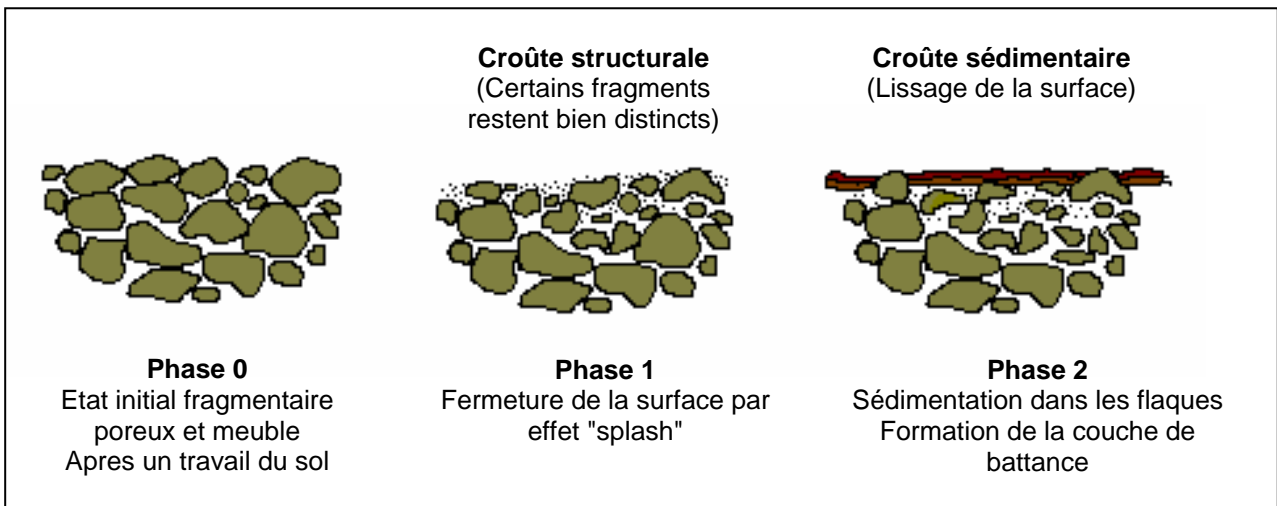


Figure 3 : Les stades de dégradation de la surface du sol sous l'action des pluies (d'après Boiffin, in Auzet, 1987)

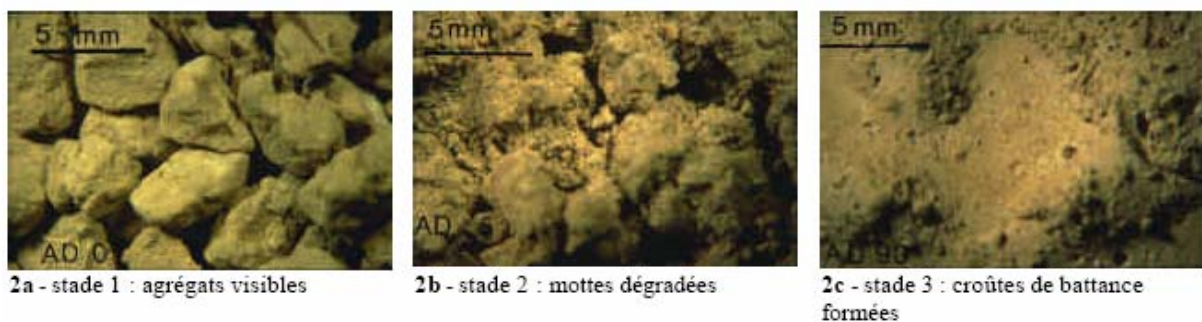


Figure 4 : Evolution des EDS d'un sol limoneux : formation d'une croûte de battance  
Clichés : Le Bissonnais, 2002

Après un travail du sol, l'état de surface d'une parcelle est fragmentaire. L'infiltrabilité est de l'ordre de **30 à 60 mm/h** (Boiffin et al., 1986) ce qui est nettement supérieur aux intensités pluvieuses moyennes en France.

Sous l'action des pluies, les agrégats se désagrègent et de petites particules rejaillissent, colmatant la porosité de surface. Les mécanismes de désagrégation des mottes et agrégats sont la désagrégation mécanique, l'éclatement, la microfissuration et la dispersion physico-chimique (Figure 5) (Le Bissonnais et Le Souder, 1995).

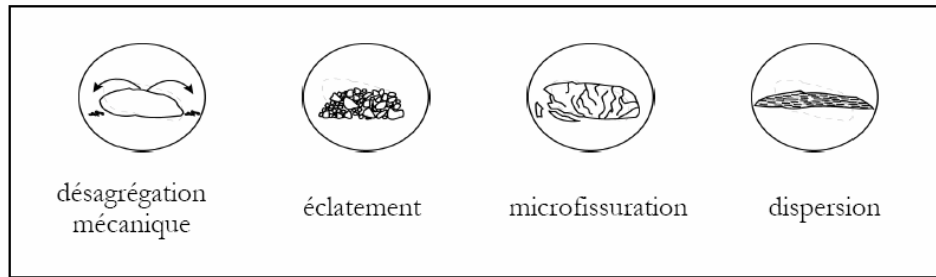


Figure 5 : Mécanismes de la désagrégation des mottes  
(d'après Le Bissonnais et Le Souder, 1995)

La désagrégation mécanique dépend de l'énergie cinétique de la pluie. La désagrégation par éclatement est liée à la compression de l'air lors de l'entrée d'eau. La microfissuration consiste en une désagrégation modérée produite par un gonflement différentiel. Enfin, la dispersion physico-chimique résulte de la réduction des forces d'attraction entre les particules du sol.

Une **croûte structurale** se forme par réorganisation, in situ, des fragments et des particules produits par la désagrégation, réduisant la capacité d'infiltration à moins de **6 mm/h** (Boiffin *et al.*, 1986).

Lorsque l'intensité des pluies dépasse l'infiltration ainsi réduite, un excès d'eau se manifeste par flaquage puis débordement. Les particules détachées par la pluie sont transportées sélectivement sur de faibles distances. Dans les dépressions, la succession des dépôts entraîne la formation de **croûtes sédimentaires**. A ce stade, même les faibles intensités pluvieuses dépassent la capacité d'infiltration du sol qui est alors de l'ordre de **1 à 2 mm/h** (Boiffin *et al.*, 1986).

## 1.2 Les facteurs du ruissellement

### 1.2.1 Influence des états de surface (EDS) sur l'infiltration et le ruissellement

Nous l'avons vu, la **capacité d'infiltration** – ou potentiel d'infiltration - d'un sol dépend étroitement de l'état d'avancement de formation des croûtes structurale et sédimentaire. Autrement dit, le **faciès** est un facteur déterminant dans le déclenchement du processus de ruissellement. Or l'évolution des états de surface du sol à partir d'un état ouvert, poreux et meuble (F0) est principalement contrôlée par deux facteurs : la pluie et la stabilité structurale du sol.

#### 1.2.1.1 La pluie

La pluie en tant qu'agent érosif est bien évidemment un facteur prépondérant. La pluie cumulée depuis le dernier travail du sol jusqu'à l'évènement considéré détermine, en partie, l'état de dégradation de la surface du sol. Si le climat des grandes régions de culture du nord de l'Europe n'est pas très agressif en terme d'intensité, l'action de la pluie est complexe et se situe à différentes échelles de temps (saison culturale, décennie, séquence ou évènement pluvieux,...)

#### 1.2.1.2 La stabilité structurale du sol

Elle correspond à l'aptitude des mottes et des agrégats à résister à l'action dégradante de l'eau. Elle est principalement influencée par la **texture** du sol, la **nature minéralogique** de ses

constituants, sa **teneur en matière organique**, ainsi que par son **état et histoire hydrique** (Auzet, 1987). La stabilité structurale d'un sol renseigne sur sa sensibilité à la battance et donc sur le risque de ruissellement.

La texture joue un rôle non négligeable sur la stabilité structurale. L'action dégradante de la pluie est maximale pour des texture dont le diamètre médian est compris entre 63 et 250  $\mu\text{m}$  (Poesen, 1983, in Auzet, 1987), c'est-à-dire pour une large gamme de sol limoneux et limono-sableux (Auzet, 1987). La Figure 6 illustre ce propos : ce sont les textures limoneuses et limono-sableuses qui résistent le moins à l'action dégradante de l'eau.

Favorisant l'agrégation des particules entre elles, les matières organiques tendent à augmenter la stabilité structurale des mottes et agrégats. Cet effet s'exprime surtout lorsque la teneur en matière organique atteint une valeur seuil de 7/100<sup>ème</sup> de la teneur en argile. Les sols de grandes cultures sont relativement pauvres en matière organique (environ 2%). Ils présentent par conséquent une stabilité structurale réduite et une forte sensibilité à la battance, et ce d'autant plus que leur teneur en argile est faible (Le Bissonnais et Papy, 1997). Cependant, à l'échelle locale, une faible variation de la teneur en matière organique peut se ressentir de façon non négligeable sur le volume ruisselé.

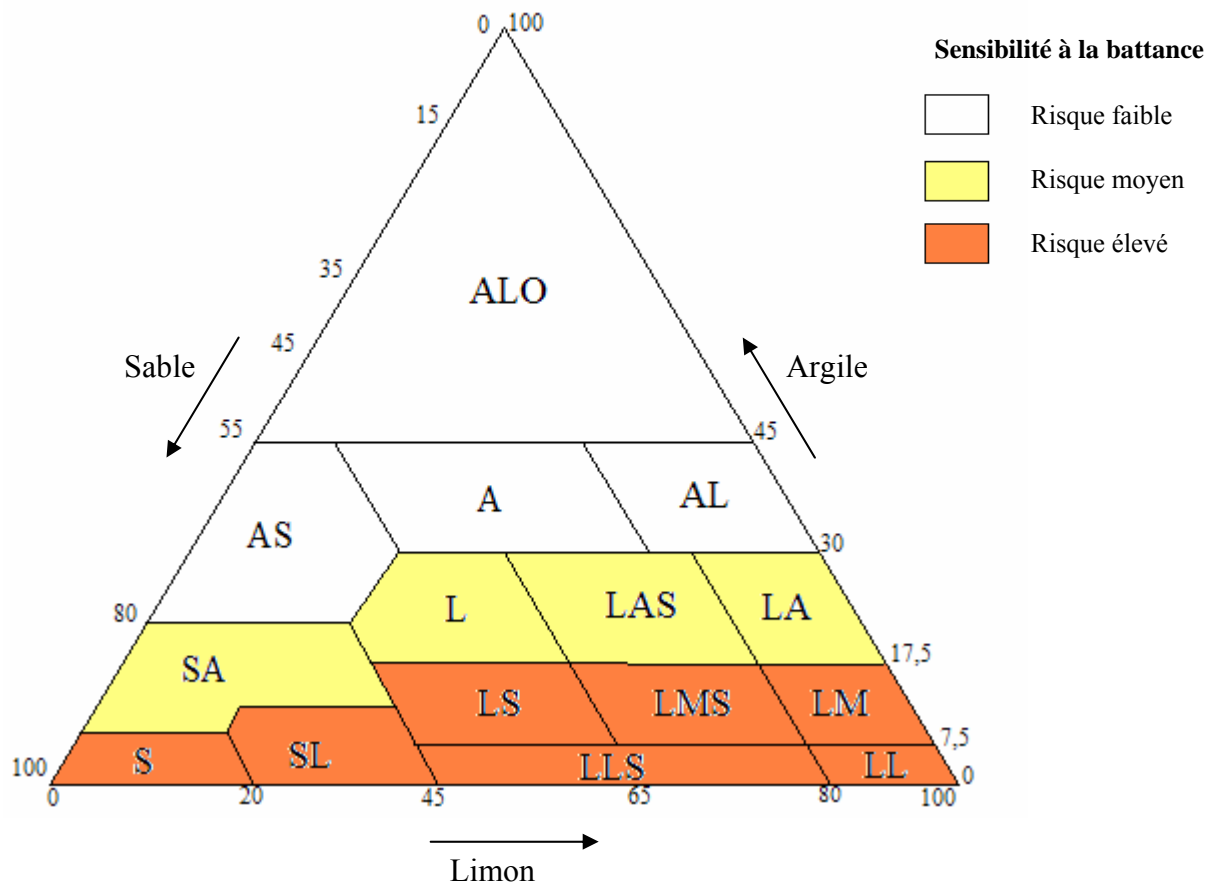
L'état et l'histoire hydriques du sol jouent également un rôle important. En effet, la stabilité des agrégats tend à diminuer lors d'une phase de dessiccation et à croître lors d'une phase d'humectation.

### **1.2.2 Influence de la rugosité**

La rugosité de surface du sol correspond aux irrégularités du sol. Elle est le résultat combiné des opérations culturales menées sur une parcelle et de l'action des précipitations. Cette rugosité peut être aléatoire - et dans ce cas résulter de la disposition des mottes et agrégats de surface - ou orientée, c'est-à-dire déterminée par les motifs linéaires de travail du sol (dérayures, traces de roues...) (Gascuel-Odoux et Heddadj, 2000).

Cette rugosité, si elle est suffisamment prononcée, peut assurer le stockage temporaire de l'eau non infiltrée et générer un retard dans le déclenchement du ruissellement. D'autre part une rugosité importante favorise l'infiltration de l'eau parce qu'elle introduit des hétérogénéités à la surface du sol : l'eau lorsqu'elle entre en contact avec des surfaces plus perméables telles que les parois des dépressions, a tendance à s'infiltrer (Martin, 1997).

Enfin, la rugosité joue un rôle antagoniste vis-à-vis de la pluie laquelle, en favorisant le développement de croûtes de battance, tend à lisser la surface du sol (Martin, 1997).



**Classes texturales :**

A	: argile	LM	: limon moyen
AL	: argile-limoneuse	LMS	: limons moyen sableux
ALO	: argile lourde	LSA	: limon sablo-argileux
AS	: argile sableuse	LS	: limon sableux
LAS	: limon argilo-sableux	S	: sable
LL	: limons léger	SA	: sable argileux
LLS	: limon léger sableux	SL	: sable limoneux

*Figure 6 : Triangle des textures de l'Aisne selon la sensibilité à la battance (d'après Ludwig, 1992)*

### **1.2.3 Influence du couvert végétal et les résidus de cultures**

Les parties aériennes du couvert végétal comme les résidus de culture agissent sur la dynamique des EDS. La couverture du sol par les végétaux, morts ou vivants, retarde l'apparition de la croûte de battance dans la mesure où, en interceptant les gouttes d'eau, elle réduit leur énergie cinétique et par conséquent leur pouvoir dégradant.

Par ailleurs, l'ensemble tiges-feuilles-racines dirige les eaux de pluie vers des lieux d'infiltration préférentielle (Gallien *et al.*, 1995). De même, les résidus de récolte créent une rugosité pérenne qui barre la propagation du ruissellement et favorise l'infiltration de l'eau dans le sol (Gascuel-Odoux et Heddadj, 1995).

Une étude expérimentale réalisée *in situ* et destinée à étudier l'effet du mode de gestion des parcelles en jachère, a montré que les deux principaux couverts testés (moutarde et mélange rey-grass/trèfle) réduisent le ruissellement par rapport à un sol nu. Cependant, il ressort de ces expérimentations que l'influence du couvert végétal sur la quantité d'eau ruisselée est limitée, le sol subissant une dégradation avant que ces couverts ne soient suffisamment développés pour constituer une protection efficace (Gallien *et al.*, 1995).

### **1.2.4 Le système de culture**

La mise en œuvre d'un système de culture sur des parcelles détermine d'une part une évolution cyclique d'opérations culturales induisant des discontinuités dans l'évolution des propriétés physiques des sols, et d'autre part fixe le calendrier d'occupation et de recouvrement du sol pour chaque culture. Par ses actions, l'exploitant peut contribuer à l'accélération ou au contraire au ralentissement de la dégradation superficielle des sols.

Pour de nombreux auteurs, l'évolution des structures agraires lors des dernières décennies serait responsable de l'aggravation des manifestations du ruissellement. La diminution des prairies permanentes qui assurent la meilleure protection des sols est le premier facteur incriminé. Par ailleurs, l'introduction de cultures de printemps augmente le pourcentage d'intercultures longues qui, si elles ne sont ni couvertes par des cultures dérobées ni déchaumées, augmentent le risque de ruissellement.

Les opérations culturales modifient l'état structural du sol de façon plus ou moins importante et durable selon les techniques utilisées et leur date de réalisation par rapport aux périodes pluvieuses. Tout travail du sol visant à l'implantation d'une culture, tel que le labour et les semis, ou la lutte contre les adventices tel que le déchaumage et le binage, ont pour conséquence un accroissement de la capacité d'infiltration. Les principales opérations mises en cause sont les passages liés aux traitements phytosanitaires, aux apports d'engrais après semis et à la récolte (Boiffin et Eimberk, 1988, in Scrodo, 2001). Les traces de roues laissées par les outils aggravent en effet les risques de ruissellement puisqu'elles constituent des zones tassées où le potentiel d'infiltration est très réduit.

## 1.3 Erosion hydrique dans un contexte limoneux

### 1.3.1 Définition

L'érosion hydrique est un phénomène complexe résultant de plusieurs processus : détachement, transport et dépôt de particules, sous l'action en général combinée, de la pluie et du ruissellement.

Le **détachement** de particules peut résulter des différents processus de dégradation par la pluie ou du cisaillement par le ruissellement.

Le **transport** des particules s'effectue par leur mise en suspension par la pluie ou l'écoulement de l'eau ou encore par saltation.

La **sédimentation** se produit lorsque la compétence du ruissellement n'est plus suffisante pour maintenir les particules en mouvement.

### 1.3.2 Les formes de l'érosion

Les formes de l'érosion peuvent se distinguer par le caractère diffus ou concentré des dépôts de terres, par la densité et la localisation des incisions, par leur date d'apparition ou par les différentes combinaisons des processus élémentaires de détachement et de transport des particules solides comme le montre le tableau (Auzet *et al.*, 1990). Dans cet exemple, les auteurs raisonnent sur une unité constituée de deux domaines: le talweg et les versants.

Tableau 1 : Formes d'érosion en fonction des processus de détachement des particules et de la localisation des pertes en terre (d'après Auzet *et al.* 1990)

		PROCESSUS SUR LES VERSANTS					
		Absence de ruissellement		Présence de ruissellement			
				Vitesse de l'écoulement (Ve) inférieure au seuil critique (Vc)		Vitesse de l'écoulement (Ve) supérieure au seuil critique (Vc)	
		Détachement des particules par la pluie :		Détachement des particules par la pluie :			
		Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui
PROCESSUS DANS LE TALWEG	Absence de ruissellement	PAS D'EROSION	FORMATION D'UNE CROÛTE DE BATTANCE	PAS D'EROSION	<b>EROSION DIFFUSE SUR VERSANT</b>	RIGOLES SUR VERSANT	
	$V_e < V_c$	CAS IMPOSSIBLES		EROSION CONCENTREE DANS LE TALWEG			
	$V_e > V_c$						

L'**érosion linéaire** se produit lorsque le ruissellement se concentre et que sa force de cisaillement dépasse la résistance du sol. Dans cette situation, le ruissellement va pouvoir non seulement transporter mais aussi arracher des particules. En fonction de la localisation et de la date d'apparition des rigoles, l'érosion linéaire peut être divisée en deux sous groupes. Sur les versant, des rigoles parallèles peuvent se développer sur les fortes pentes en suivant les motifs agraires (lignes de semis et traces de roues). Cette forme d'érosion appelée **érosion de versant** ou érosion en rigoles et inter-rigoles apparaît surtout après des épisodes pluvieux de forte intensité, c'est-à-dire au printemps. La surface de collecte du ruissellement nécessaire à l'incision est généralement réduite et située juste en amont des rigoles. D'autres ravines prennent naissance dans les talwegs. Elles peuvent se produire dans des régions de faibles pentes et suite à des événements pluvieux qui ne sont pas forcément violents mais à l'aval d'une importante zone de collecte des eaux. L'**érosion de talweg** apparaît aussi bien en hiver qu'au printemps.

## 2 Les dégâts engendrés par le ruissellement et l'érosion hydrique

L'érosion hydrique des terres cultivées est susceptible de causer des dommages importants en amont, c'est-à-dire sur les parcelles agricole mais aussi en aval, hors du territoire agricole.

### 2.1 Les conséquences sur le territoire agricole

Sur le territoire agricole, les dégâts causés par l'érosion hydrique incombent essentiellement aux agriculteurs, puisqu'il s'agit principalement de pertes de culture. Sous l'action du ruissellement, des **plants peuvent être arrachés**, les **jeunes pousses détruites**, les **semis ensevelis** sous la boue.

Les **ravines**, même en dehors de leur période d'activité, constituent une gêne pour le passage des engins agricoles. Lorsque les ravines sont trop profondes pour être franchies, les agriculteurs doivent travailler leurs parcelles morceau par morceau, ce qui augmente le temps de travail et les coûts de production.

D'autres types de dégâts sont plus insidieux car moins visibles et conduisent à une **perte de capital sol**. L'importance de l'érosion peut être localement quantifiée en tonnes de sol perdues par hectare et par an. A long terme et à l'échelle de la région agricole, ce processus peut conduire à une **perte de terroir** très préoccupante.

**L'impact de la perte de sol sur la fertilité** varie selon la profondeur du sol. Ainsi, sur un sol très épais, l'impact du décapage passera longtemps inaperçu. En effet, l'impact agronomique de cette perte de sol est faible, tant que l'érosion ne met pas à nu les calcaires situés sous la couche de dépôts limoneux. Par contre, un décapage similaire peut entraîner une perte de fertilité définitive lorsque la vitesse de pédogenèse est très lente, par exemple s'il s'agit d'un sol peu épais sur une roche-mère de calcaire. Souvent, cette érosion insidieuse reste inaperçue et donc peu mobilisatrice en régions de grandes cultures.

L'amincissement du sol conduit à une diminution de sa fertilité d'autant plus marquée que l'érosion est sélective : la terre fine exportée est riche en éléments fertilisants et en matière organique.

## 2.2 A l'aval : les conséquences pour les installations humaines

Les dégâts à l'aval peuvent être de trois types :

- Les **écoulements boueux catastrophiques**, qui se concentrent dans les bassins agricoles, dévalent le long du réseau de vallées et de vallons secs et provoquent des dégâts à l'encontre **des bâtiments, des ouvrages d'art et des routes**.  
Les écoulements boueux catastrophiques sont déclenchés par des précipitations exceptionnelles et peuvent entraîner des dégâts matériels importants, indemnisables sous certaines conditions, au titre des catastrophes naturelles. Ces "coulées boueuses" sont différentes des inondations provoquées par la crue d'un cours d'eau lorsqu'il envahit son lit majeur, ou par le débordement d'une nappe phréatique. Ces phénomènes surviennent toutefois souvent conjointement. Compte tenu de cette définition, **l'érosion hydrique des sols cultivés joue un rôle central** dans leur déclenchement.
- **Dans les paysages de grandes cultures**, caractérisés par l'importance des vallées sèches, le ruissellement émis lors des longues périodes de pluies hivernales par les surfaces imperméabilisées par une croûte de battance est acheminé rapidement vers le réseau hydrographique superficiel et participe à la **formation des crues**.
- **En dehors des catastrophes naturelles liées à des pluies exceptionnelles**, l'érosion chronique provoque aussi des dégâts moins spectaculaires, en particulier sur les routes. La terre exportée des parcelles par le ruissellement **se dépose sur la chaussée et comble les réseaux de collecte des eaux**, ce qui nécessite des interventions pour leur remise en état. Les ravines creusées en bordure de voirie provoquent le **sapement des chaussées**.

## 2.3 A l'échelle régionale : la pollution de l'eau

La perte en sol est un facteur de pollution des eaux superficielles. Les eaux de ruissellement sont chargées en matières en suspension qui sont des vecteurs d'éléments chimiques (fertilisants tels le phosphore, adsorbé sur les particules de terre, produits phytosanitaires, etc.) et augmentent la **turbidité des cours d'eau** ainsi que leur teneur en **éléments eutrophisants** (phosphore).

Ces polluants dégradent la qualité des eaux superficielles utilisées pour l'alimentation en eau potable, ce qui peut ensuite se répercuter sur le prix de l'eau, ou entraîner provisoirement l'interruption de la distribution d'eau potable.

Quand les eaux ruisselées peuvent s'infiltrer rapidement par des voies préférentielles (cas des bétouilles ou dolines en milieu karstique), elles participent directement à la **dégradation de la qualité des eaux souterraines**.



*Figure 7 : Dégâts suite à une coulée boueuse. Commune de Bloitzheim.  
Source : Lemel et Armad, 2003*

La dégradation de la qualité des eaux liée à l'entraînement de particules du sol conduit à investir dans des ouvrages de traitement pour maintenir la qualité de l'eau potable, ainsi que dans la création de réseaux d'adduction pour alimenter ces ouvrages, les unités créées devant être de grande taille.

Les fortes turbidités sont aussi à l'origine d'une dégradation de la **qualité biologique** du milieu aquatique par :

- réduction de la pénétration de la lumière dans l'eau et donc diminution de l'activité photosynthétique ;
- envasement du lit modifiant les équilibres écologiques ;
- perturbation de la faune piscicole pouvant entraîner des mortalités importantes des poissons autochtones ;
- apports d'éléments nutritifs pouvant favoriser l'eutrophisation ;
- apport d'éléments polluants.

La gravité de cette pollution des eaux est due à la fois à son caractère chronique et à des épisodes érosifs exceptionnels induits par des pluies de faible fréquence de retour.

Les dommages engendrés par le ruissellement et l'érosion hydrique des sols cultivés sont de taille. Dans une optique de développement durable, la mise en place de mesures préventives contre l'érosion hydrique devient donc un enjeu important pour la préservation de la ressource et l'accompagnement d'un progrès respectueux de l'environnement. Des outils d'évaluation s'avèrent alors nécessaires pour aider à cette mise en place.

### **3 Quelles méthodes d'évaluation ?**

#### **3.1 Lorsque la réalité devient trop complexe pour faire l'objet de mesures directes, les outils disponibles**

Il existe plusieurs approches possibles pour appréhender un processus de manière indirecte, lorsque le recours aux mesures directes est inenvisageable. Dans le cas du ruissellement, le volume d'eau ruisselé peut être quantifié directement. Les travaux de Martin (1997), puis ceux de Scrodo (2001) et de Armand (2003) en témoignent. Cependant, de par la lourdeur du dispositif de mesure et l'important investissement humain que nécessite ce type d'études, celles-ci ne peuvent être envisagées que ponctuellement dans l'espace et dans le temps. Une mise en œuvre de ce type de mesure au niveau de l'exploitation agricole ou à des échelle plus petites (bassin versant) est impossible. Il faut par conséquent recourir à des méthodes d'estimation indirectes.

### 3.1.1 Les mesures directes du ruissellement

#### 3.1.1.1 A l'échelle de la microparcelle

Afin d'évaluer la sensibilité au ruissellement d'une parcelle agricole, divers auteurs ont quantifié le ruissellement sur des surfaces réduites, en supposant que ces microparcelles ont le même comportement hydraulique que la parcelle agricole dans son ensemble – ou d'une moins, qu'une partie de la parcelle – sur laquelle elles ont été positionnées.

Ces placettes expérimentales, de l'ordre d'une dizaine de mètres carrés sont installées dans le sens de la pente et isolées hydrauliquement par des bordures en plastique. Le ruissellement est collecté à l'aval par une gouttière en PCV.

Ce genre de dispositif est notamment utilisé depuis plusieurs années, par l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages (ITCF) sur le site expérimental de Geispitzen (Haut-Rhin), afin d'étudier l'efficacité des bandes enherbées dans le piégeage des nitrates et des produits phytosanitaires mobilisés par ruissellement. Romain Armand (2003) a travaillé sur des dispositifs similaires afin d'étudier l'influence des Techniques Culturelles Simplifiées (TCS) sur le ruissellement.

Cependant, une étude réalisée par Lecomte *et al.* (1997) montre que les mesures sur microparcelles ont tendance à induire une surestimation du ruissellement par rapport au ruissellement réel à l'échelle de la parcelle agricole. Les placettes sont en effet de taille insuffisante pour intégrer les mécanismes de réinfiltration se développant à l'échelle de la parcelle.



*Figure 8 : Placette expérimentale (15 m<sup>2</sup>) de mesure du ruissellement.  
Source : Armand, 2004*

#### 3.1.1.2 A l'échelle de la parcelle agricole

Des mesures de ruissellement peuvent également être réalisées à l'échelle de la parcelle agricole. L'institut du végétal du Haut-Rhin, par exemple, a mené de telles expérimentations à l'occasion d'une action pilote dans le Sundgau en vue de réduire la contamination des eaux par les produits phytosanitaires (2002). L'étude a été réalisée sur une parcelle de 9 hectares et divisées en 3 sous parcelles de 3 hectares chacune, isolées hydrauliquement par des barrage en taule galvanisée. L'eau qui ruisselle sur la parcelle est dirigée vers un système de collecteurs et de tuyaux d'écoulement. A l'extrémité des tuyaux, d'écoulement, un débitmètre permet de connaître le volume d'eau de ruissellement pour un épisode pluvieux mesuré.

Ces mesures nous ont été communiquées et nous serons utile ultérieurement, lors de la phase de validation de l'indicateur.

Cependant, la mise en place de tels dispositifs nécessite d'importants investissements et il est évident que ce type d'expériences ne peut être étendu à l'ensemble des parcelles d'une exploitation ou d'un bassin versant.

Il existe plusieurs possibilités pour appréhender un processus complexe sans passer par la mesure directe de ses manifestations.

### 3.1.2 Les modèles

La modélisation est basée sur une simulation de la réalité et est largement utilisée dans la recherche. Généralement, les modèles, de conception complexe nécessitent un grand nombre de variables d'entrée qui ne sont pas toujours facilement accessibles. Ces outils ne sont pas opérationnels dans la mesure où ils ne sont pas suffisamment synthétiques pour permettre le diagnostic et plus particulièrement l'aide à la décision.

### 3.1.3 Les indicateurs

Un indicateur peut se définir de la façon suivante :

*« Les indicateurs sont des variables [...] qui fournissent des renseignements sur d'autres variables plus difficiles d'accès [...]. Les indicateurs servent de repère pour prendre une décision »* (Gras *et al.*, 1989).

*« Ils fournissent des informations au sujet d'un système complexe en vue de faciliter sa compréhension [...] aux utilisateurs de sorte qu'ils puissent prendre des décisions appropriées qui mènent à la réalisation des objectifs »* (Mitchell *et al.*, 1995).

*« Un indicateur est une valeur calculée ou estimée statistiquement [...], une observation brute par rapport à une référence »* (Riley, 2001)

Il peut être construit à partir d'une seule variable, il s'agit alors d'un **indicateur simple**. Dans ce cas, la variable est dite indicatrice. Généralement, il faut une multitude d'indicateurs simples pour évaluer tout un système. Un autre inconvénient est le manque de données explicatives sur les résultats ou la faible validité des indicateurs pris individuellement. Par exemple, le nombre de passage d'outils n'est pas relié de manière satisfaisante au risque de tassement. D'autres facteurs entrent en jeu.

Un indicateur peut également être construit à partir de plusieurs variables. Il est obtenu par agrégation des variables indicatrices et fournit une information synthétique et globale (Girardin *et al.*, 1999). Cette agrégation peut reposer sur une démarche de modélisation simple qui tiendra compte de la disponibilité des données. Dans ce cas l'indicateur fournira une information sur l'impact ou le risque (potentiel, car dans la majorité des cas, tous les facteurs ne peuvent être intégrés pour des raisons de faisabilité) lié à un ensemble de pratiques culturales sur le milieu

Les indicateurs ont deux vocations. La première consiste en un **outil de diagnostic** qui va mettre à jour des dysfonctionnements éventuels et des points forts soit en faisant un état des lieux à un instant donné de l'exploitation, soit en faisant le suivi sur une période plus longue. L'autre utilisation est un **outil d'aide à la décision** qui évaluera les effets potentiels d'un changement dans une pratique agricole ou l'atteinte des objectifs en fournissant des éléments explicatifs pour alimenter le conseil.

Le ruissellement est un processus complexe qui met en jeux, nous l'avons vu, de nombreuses variables. Nous avons choisi de construire un indicateur composite qui intègre un maximum de ces variables en suivant la méthodologie INDIGO<sup>®</sup> proposée par Girardin *et al.* (1999).

### **3.2 Les indicateurs INDIGO<sup>®</sup> : un compromis entre disponibilité de l'information, fiabilité des sorties et pertinence pour l'utilisateur.**

La méthodologie d'élaboration des indicateurs INDIGO suit une démarche d'élaboration en plusieurs étapes qui tiennent compte des qualités des indicateurs : lisibilité, sensibilité aux variations du milieu, pertinence pour l'utilisateur.

#### **3.2.1 Définition des utilisateurs et des objectifs**

Le choix du public cible (scientifiques, politiques, agriculteurs,...) est important car il déterminera l'utilisation qu'on veut en faire. Cette utilisation déterminera directement la construction de l'indicateur ou le type d'indicateur à sélectionner. Suivant le public cible, la condensation des données et la simplification de l'information devront être plus ou moins importantes afin que la lisibilité de l'indicateur le rende attractif et utilisable.

L'indicateur est élaboré en fonction de l'objectif qui a été fixé. Si cet objectif n'est pas mesurable directement, il est nécessaire de le décomposer en sous-objectifs qui eux devront être quantifiables. Ceux-ci seront agrégés pour fournir un indicateur synthétique qui réponde à l'objectif principal.

#### **3.2.2 Construction de l'indicateur**

L'élaboration de l'indicateur est un compromis entre l'information disponible, la connaissance scientifique du moment et les exigences de simplicité des utilisateurs. Sa construction peut prendre des parties de modèles ou être originale. Elle peut également se faire à partir d'une ou plusieurs variables, qu'elles soient quantitatives, semi-quantitatives ou qualitatives.

Par souci de lisibilité, on peut mettre en classes les valeurs des variables mais aussi de l'indicateur en le rapportant sur une échelle décimale par exemple. L'agrégation peut se faire à l'aide de systèmes experts simples ou de fonctions simples (minimum, produit, moyenne pondérée, etc...). Les auteurs de la méthode INDIGO ont cherché à éviter le piège de la somme de points et de la moyenne qui souvent posent de sérieux problèmes méthodologiques comme la compensation de critères. Le tableau 1 (Bockstaller et Girardin, 1997) reprend les différents modes de construction pour les indicateurs de la méthode INDIGO.

#### **3.2.3 Détermination des normes et des seuils de veto**

Comme défini par Riley (2001), un indicateur se distingue d'une valeur brute par une référence qui lui donnera un sens. Cette référence peut être absolue (seuil ou valeur à atteindre) ou relative (valeur initiale ou de l'année précédente). Dans la pratique, cette référence n'est pas toujours clairement explicitée. Dans ce cas, la référence sous-entendue peut être une valeur extrême ou nulle. Ceci peut susciter des problèmes pratiques. La fixation de la référence peut aussi résulter d'une négociation entre les acteurs avec de ce fait, une part de subjectivité.

Quelquefois, il peut être important de déterminer des seuils de veto, seuils minima sous lesquels l'objectif ne sera pas atteint. Cela aura comme conséquence lors de l'agrégation de plusieurs indicateurs de pouvoir atteindre l'objectif uniquement si aucun d'eux ne se trouve en dessous du seuil et de limiter ainsi les compensations possibles entre indicateurs.

### **3.2.4 Test de sensibilité**

Cette étape a pour but de vérifier si l'indicateur permet de distinguer des situations qui sont différentes dans la réalité. Dans le cas d'un indicateur composite, un tel test servira à déterminer le poids d'une variable ou d'un paramètre dans le calcul de l'indicateur en observant les conséquences sur la valeur finale de l'indicateur d'une variation simulée d'une variable d'entrée. Cette variation doit rester dans une gamme de variation réaliste.

### **3.2.5 Validations**

Un indicateur est validé s'il atteint les objectifs qu'on lui a assignés au départ, à savoir s'il rend compte de l'état d'un système (outil de diagnostic) et s'il permet une prise de décision ou d'aide à la décision. Au vu de la définition des indicateurs, trois types de validation sont possibles (Bockstaller et Girardin, 2003).

#### **3.2.5.1 Validation de la construction de l'indicateur**

C'est la première étape de validation des indicateurs (Girardin et Bockstaller, 2000). Elle consiste à soumettre la construction des indicateurs à un panel d'experts. Cette méthode a déjà été utilisée pour évaluer l'impact des pesticides sur l'eau (Van der Werf et Zimmer, 1998). Elle peut avoir une grande importance dans la validation des indicateurs et principalement quand aucune autre possibilité n'existe, du fait, par exemple, de l'impossibilité d'obtenir des mesures de terrain fiables.

#### **3.2.5.2 Validation des sorties de l'indicateur ou test de vraisemblance**

Pour rendre compte de l'état du système, les valeurs de l'indicateur sont reliées à des valeurs mesurées de « terrains » ou estimées par modèles. Si cela n'est pas possible, elles sont comparées aux valeurs obtenues par d'autres indicateurs ou fournies par des experts.

#### **3.2.5.3 Valeur d'usage**

Pour vérifier si l'indicateur est réellement utilisé comme outil d'aide à la décision, on fait un test d'usage. La valeur d'usage sert donc à apprécier si l'objectif est atteint c'est à dire si l'indicateur est utilisé et s'il permet à l'utilisateur de prendre des décisions.

Les indicateurs rendent possible l'évaluation de systèmes complexes que l'on ne peut pas encore réaliser à l'aide de modèles. La méthode par indicateurs s'expose tout de même à deux critiques, la simplification et la justification de sa valeur scientifique. Cette étape nécessaire de simplification consiste à condenser l'information à partir des données de base et doit, si on ne veut pas porter le flanc à la critique, être élaborée avec soin pour que la perte d'information ne « déforme pas de façon significative la réponse à la question ». (Girardin et Bockstaller, 1996).

### 3.3 Travaux déjà effectués dans le cadre d'INDIGO® sur le ruissellement

L'élaboration d'un indicateur du ruissellement sur parcelles agricole a déjà fait l'objet de travaux dans le cadre de la méthode INDIGO®. Ebauchée en 2001 par Steffan, la construction de cet indicateur a ensuite été reprise et approfondie par Flaitz (2003) qui a également entamé le travail de validation.

Cet indicateur, nommé "RUIS", nous donne une estimation quantitative du ruissellement à **l'échelle de la parcelle** et au **pas de temps de la décade**. D'après Flaitz (2003), l'estimation du ruissellement potentiel pour une décade correspond à la **somme des précipitations non infiltrées** ( $PNI_i$ ) de la décade  $i$ , retranchée de la **capacité de stockage temporaire** ( $CST_i$ ) de la décade  $i$ . L'indicateur RUIS sera donc calculé d'après la formule suivante :

$$RUIS_i = [PNI_i - CST_i]$$

Nous pouvons d'ores et déjà formuler une critique à l'égard de cette formule : la **capacité de stockage temporaire** du sol correspond à la capacité d'un sol à conserver de façon transitoire l'eau de pluie au sein de dépressions liées à la rugosité du sol, or ce paramètre n'intervient pas de façon systématique mais ponctuellement lors d'un événement pluvieux : il ne peut donc être pris en compte si l'on raisonne à l'échelle de temps décadaire.

Il s'agira donc pour nous de retravailler l'indicateur « ruissellement », d'en réviser la structure si nécessaire, en déterminant les variables et paramètres dont dépend le ruissellement, pertinents à l'échelle d'espace et de temps choisie.

Nous conserverons l'échelle parcelle (échelle d'évaluation du programme INDIGO®) et le pas de temps de la décade. Certes le ruissellement se caractérise au niveau de l'évènement pluvieux (quantité de pluie et intensité) et non de la décade, cependant un exploitant ne peut fournir ces caractéristiques. Elles nécessiteraient des mesures de terrain précises et contraignantes. Nous avons préféré les données météo moyenne par décade enregistrées par Météo France aux données journalières. Ce choix a été fait par rapport aux coûts, ceux des données journalières étant plus importants. Ce choix s'est également fait par rapport aux contraintes de saisie. L'exploitant devra donner des dates et des caractéristiques de passage d'outil. Il sera plus facile pour lui de replacer son intervention dans une décade plutôt que d'en indiquer le jour précis, a fortiori si la saisie des informations concerne les années antérieures. Nous ne considérerons plus la capacité de stockage temporaire, en revanche l'importance de la rugosité sera réévaluée.

L'indicateur mis au point sera noté  $I_{RU}$ .

## **Partie 2 :**

### **Construction de l'indicateur $I_{Ru}$**

# 1 Structure de l'indicateur $I_{RU}$

## 1.1 Principe de l'indicateur $I_{RU}$

Le ruissellement correspond, nous l'avons vu, à l'eau de pluie non infiltrée dans le sol. Il existe un paramètre qui décrit la part de l'écoulement de surface par rapport à la hauteur de précipitations : il s'agit du **coefficient de ruissellement** (CR).

Cette grandeur est très utilisée par les pédologues pour caractériser un sol ou l'ensemble d'un bassin versant mais elle a également d'autres domaines d'application. Le coefficient de ruissellement peut en effet être calculé pour tout type de surface et est en rapport direct avec la perméabilité de la surface considérée. Il peut être calculé pour un type de sol donné comme pour l'ensemble d'un bassin versant : il correspondra alors au rapport entre le volume d'eau ruisselée à l'exutoire du bassin versant et la hauteur de précipitations. Dès lors nous pouvons écrire la formule suivante :

$$\text{Ruis} = \text{CR} \times P$$

Ruis : volume d'eau ruisselé  
CR : coefficient de ruissellement  
P : hauteur de précipitations

Nous nous baserons sur cette formule pour calculer notre indicateur  $I_{RU}$ . Pour une parcelle, au cours d'une décade  $i$ , nous aurons donc la relation :

$$I_{RU i} = \text{CR}_i \times P_i$$

$\text{CR}_i$  : coefficient de ruissellement  $i$   
 $P_i$  : hauteur de précipitations au cours de la décade  $i$

La hauteur de précipitations décadaire  $P_i$  étant connue (données Météo-France), le calcul de  $I_{RU}$  revient à déterminer la valeur de **CR** pour la décade considérée.

Dans un premier temps, nous avons recensé l'ensemble des variables impliquées dans la genèse et/ou la régulation du ruissellement. En nous appuyant sur un important travail bibliographique, nous avons ensuite étudié dans le détail les relations qui lient ces variables entre elles ainsi que la manière dont elles interviennent dans le processus de ruissellement.

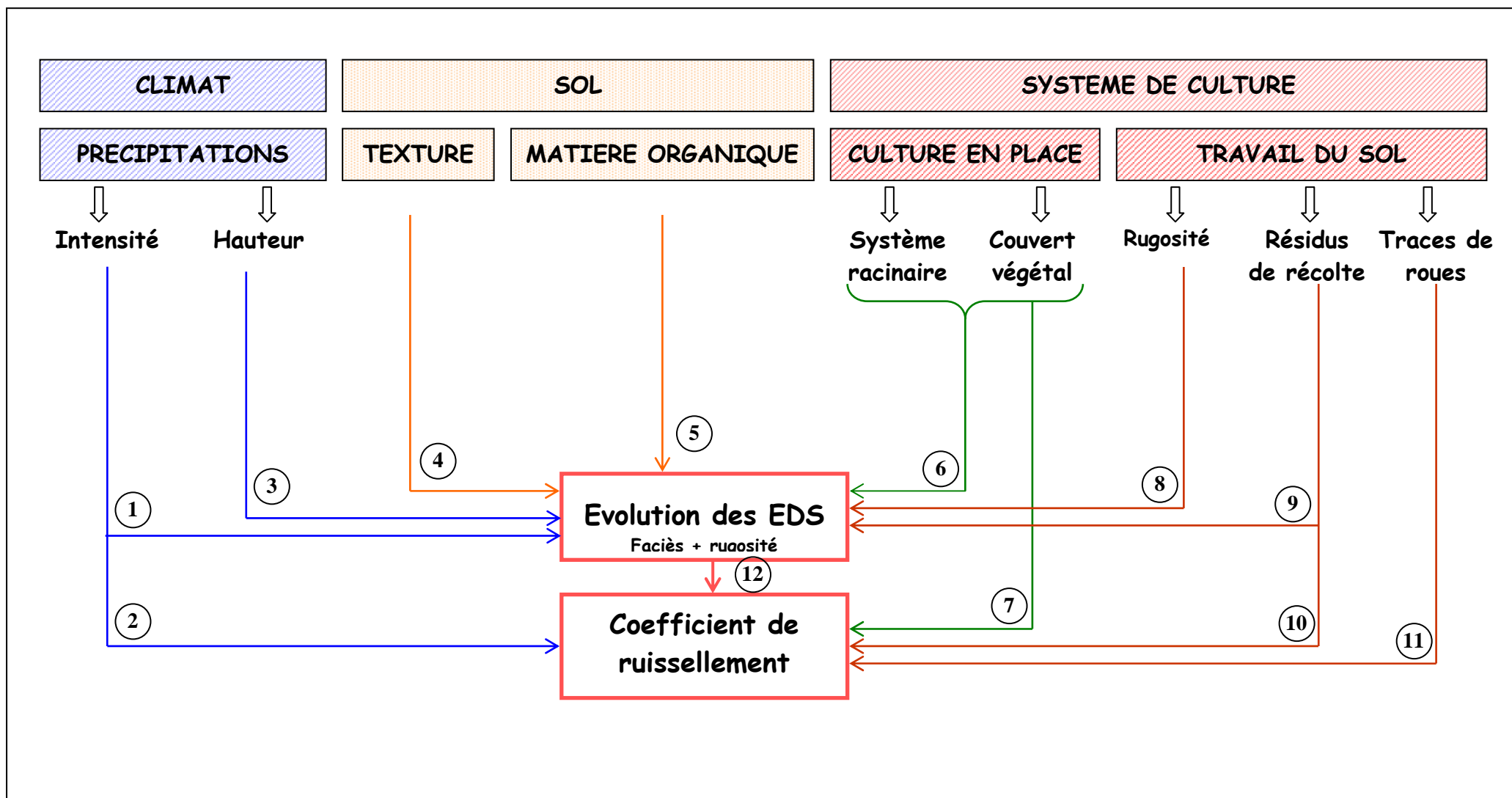


Figure 9 : Schéma conceptuel de construction de l'indicateur

- 1- Influence de l'intensité des précipitations sur l'évolution des EDS
- 2- Influence de l'intensité des précipitations sur le coefficient de ruissellement
- 3- Influence de la hauteur de précipitations sur l'évolution des EDS
- 4- Influence de la texture du sol sur l'évolution des EDS
- 5- Influence de la teneur en matière organique du sol du sol sur l'évolution des EDS
- 6- Influence du couvert végétal sur l'évolution des EDS
- 7- Influence du couvert végétal sur le coefficient de ruissellement
- 8- Influence de la rugosité initiale après travail du sol sur l'évolution des EDS
- 9- Influence du taux de résidus de culture en surface du sol sur l'évolution des EDS
- 10- Influence du taux de résidus de culture en surface du sol sur le coefficient de ruissellement
- 11- Influence de la surface tassée sur le coefficient de ruissellement
- 12- Influence de l'EDS sur le coefficient de ruissellement

## 1.2 Relations entre les variables

Le coefficient de ruissellement peut être décrit par une **combinaison complexe de variables climatiques, pédologiques et anthropiques** (choix du système de culture) (Figure 9).

### 1.2.1 L'état de surface du sol : les facteurs décisifs dans la détermination du coefficient de ruissellement

**L'évolution de l'état de surface (EDS)** du sol est un facteur déterminant du ruissellement (Armand, 2003). Autrement dit, le coefficient de ruissellement au cours d'une décade *i* dépend étroitement de l'EDS du sol lors de cette décade.

L'EDS d'un sol peut être décrit par ses deux composantes, à savoir la **rugosité** et le **faciès**, c'est-à-dire le stade de développement des croûtes structurale et, ou, sédimentaire. Les surfaces seront d'autant plus aptes à ruisseler que leur rugosité sera faible et le développement des croûtes de battance élevé.

#### 1.2.1.1 Les composantes de l'EDS

- **La rugosité**

Selon le type de travail du sol qui aura été effectué et les outils employés, le sol présentera une rugosité initiale plus ou moins importante. Ludwig (1992) définit cinq classes de rugosité, la classe R0 correspondant au microrelief le plus faible observable, par exemple, sur les chantiers de récolte tassés (Tableau 2). Un labour au contraire, induit une forte rugosité de l'ordre de 5 à 10 cm : un sol fraîchement labouré s'inscrira donc dans la classe R3.

Tableau 2 : Classes de rugosité (d'après Ludwig, 1992)

Classes de rugosité	Dénivelé	Exemple de situations caractéristiques
<b>R4</b>	Plus de 10 cm	
<b>R3</b>	De 5 à 10 cm	Labour grossier
<b>R2</b>	De 2 à 5 cm	Semis très motteux, labour fins
<b>R1</b>	De 1 à 2 cm	Semis battus ou roulés, lits de semences très affinés
<b>R0</b>	De 0 à 1 cm	Semis très battus, chantiers de récolte

Les reprises de labour au moment du semis affinent le sol en rompant les plus grosses mottes. Il en résulte une diminution notable de la rugosité : nous nous situons alors dans des classes de rugosité R2 à R0.

Après travail du sol, l'action dégradante de la pluie engendre une diminution progressive de la rugosité.

La composante "rugosité" de l'EDS du sol lors de la décade **i** est donc fonction de deux facteurs : d'une part la **rugosité initiale**, résultat du type de travail du sol effectué (relation **8** de la Figure 9), et d'autre part du **cumul des précipitations** depuis le dernier travail du sol (relation **1** de la Figure 9).

- **Le faciès ou stade de développement des croûtes**

Nous l'avons vu (§ 1.1.2), l'état d'avancement de formation des croûtes structurale et sédimentaire est un facteur déterminant dans le déclenchement du processus de ruissellement. Boiffin (1984) distingue trois faciès traduisant les phases structurales et sédimentaires (Tableau 3) :

- une première phase, nommée **F0**, correspond à l'état structural du sol obtenu après travail du sol, peu ou pas encore altéré par les précipitation. L'infiltrabilité du sol est alors maximale (**entre 60 et 30 mm/h**) du fait de l'état fragmentaire, poreux et meuble du sol. Nous considérons que l'on est en faciès F0 dès lors que la part de la surface du sol recouverte par la croûte structurale n'excède pas les 50% ;
- une seconde phase appelée **F1** correspond à un sol majoritairement recouvert par une croûte structurale de quelques millimètres d'épaisseur et dont la capacité d'infiltration atteint des valeurs faibles comprises entre **6 et 2 mm/h** ;
- une troisième phase appelée **F2** apparaît dès lors que la part de la surface du sol recouverte par la croûte sédimentaire dépasse les 60%. La structure de cette croûte, formée de micro-strates quasi-imperméables limite la capacité d'infiltration à parfois moins de **1mm/h**.

Une quatrième phase -dite **F3**- a été définie par l'auteur qui correspond à un retour à un état fragmentaire sous l'action d'agents climatiques, tels que les phénomènes de dessiccation ou d'éclatement des agrégats par le gel. L'apparition de fentes de dessiccation, plus ou moins

pérennes selon le contexte dans lequel elles apparaissent, rehausse la capacité d'infiltration du sol à des valeurs proches de celles observées pour l'état F0.

L'éventualité d'apparition de cette phase ne sera pas prise en compte dans notre raisonnement lors de la construction de l'indicateur, faute d'informations disponibles à ce sujet. Il serait cependant important, pour la cohérence du modèle, d'envisager cette éventualité et de l'intégrer dans la construction de  $I_{RU}$ .

Tableau 3 : Détermination du faciès du sol (d'après Boiffin, 1984)

Notation	Description	% surface recouvert par les croûtes	
		structurale	sédimentaire
<b>F0</b>	Tous les fragments sont parfaitement distincts	< 50%	0%
<b>F1</b>	Croûte structurale	> 50%	< 60%
<b>F2</b>	Croûte sédimentaire	< 40%	> 60%

Pour atteindre les faciès F1 ou F2, une certaine quantité de pluie est nécessaire. Ce cumul nécessaire dépend de la stabilité structurale du sol déterminé par **sa texture** et **sa teneur en matière organique** (relations 4 et 5 de la Figure 9), mais aussi de l'intensité des épisodes pluvieux (relation 1 de la Figure 9).

Les données fournies par Météo-France que nous utilisons, précisent uniquement les quantités et non les intensités des précipitations décennales. En revanche, Météo France répertorie le nombre moyen d'orage par décennie. Afin de prendre en compte le facteur "intensité", nous considérerons donc la **présence d'évènement orageux pendant la décennie** au cours desquels l'intensité des pluies dépasse en général les 20 mm/h..

Si nous récapitulons, régime des précipitations, rugosité initiale, texture et teneur en matière organique de sol, sont autant de facteurs qui interviennent dans l'évolution des EDS. Cependant, d'autres facteurs jouent un rôle non négligeable dans cette évolution.

### 1.2.1.2 Rôle de la couverture du sol dans l'évolution des EDS

Les résidus de récolte et couvert végétal vivants, constituent un écran de protection du sol contre l'impact des gouttes de pluie. Au contact du feuillage des végétaux ou des résidus en surface du sol, les gouttes de pluie voient leur énergie cinétique diminuer considérablement et perdre une part de leur pouvoir dégradant. Plus la couverture du sol représente une part importante de la surface parcellaire, plus le passage en faciès F1 puis F2 sera retardé (relation 6 de la Figure 9).

Le traitement de résultats, issus de l'étude menée par Gallien *et al.* (1995), met en évidence l'existence de seuils en deçà desquels le couvert végétal vivant n'a pas d'influence sur l'évolution des EDS (Figure 10) : le développement des croûtes est sensiblement identique dans le cas d'un semis de moutarde et dans le cas d'un sol nu. Au-delà de ces seuils (70% dans

le cas de la moutarde), l'évolution des EDS est stoppée. Ces seuils diffèrent en fonction du type de système racinaire des végétaux.

De même, en ce qui concerne les résidus de récolte, Armand (2003) démontre que ce n'est qu'au-delà de 30% de couvert que l'on observe un net ralentissement du développement des croûtes.

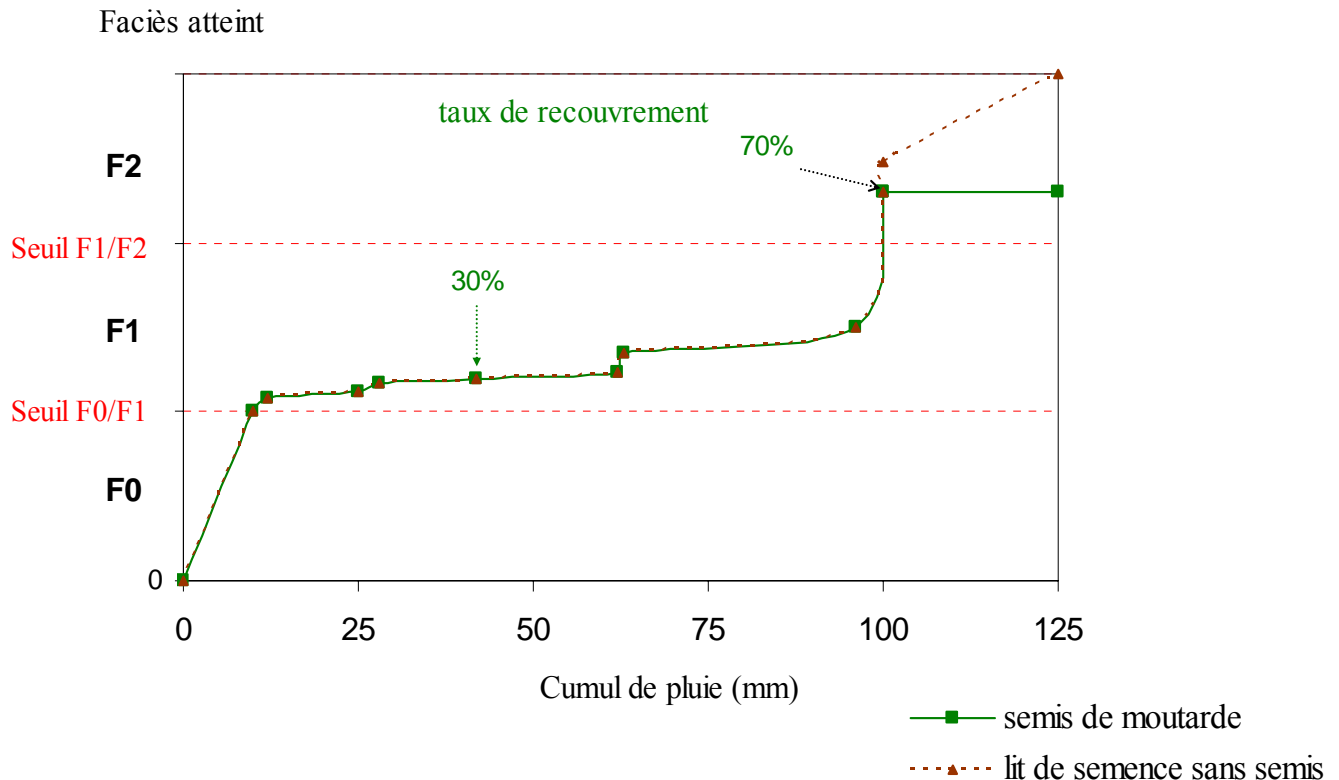


Figure 10 : Influence du couvert végétal sur l'évolution de l'état structural du sol (d'après Gallien et al, 1995)

Les résidus de culture et végétaux vivants, nous l'avons vu, limitent, voire en stoppent la progression des croûtes structurale et sédimentaire de par ce que l'on nomme leur "effet parapluie". Elles contribuent aussi indirectement à la stabilisation de la capacité d'infiltration et donc à celle du coefficient de ruissellement. D'autre part, la couverture du sol a une influence directe sur l'infiltrabilité.

### 1.2.2 Impact de la couverture du sol sur le coefficient de ruissellement

Au fur et à mesure qu'il se développe, le couvert végétal favorise la pénétration de l'eau dans le sol en créant des zones d'infiltration préférentielle au niveau du collet. L'eau est acheminée des feuilles jusqu'aux racines en s'écoulant le long de la tige. Le coefficient de ruissellement s'en trouve alors abaissé (relations 7 et 10 de la Figure 9).

Les travaux de Gallien (1995) ainsi que ceux de Roose (1994) corroborent cette hypothèse théorique. Les coefficients de ruissellement qu'ils mesurent sont d'autant plus faibles que le couvert végétal est développé (Tableau 4).

De même, les résidus de culture, constituent un microrelief pérenne qui, favorisent l'infiltration de l'eau dans le sol.

*Tableau 4 : Mesure des coefficients de ruissellement en rapport avec le taux de recouvrement du sol par les végétaux (d'après Gallien et al., 1995)*

date	Sol nu		Treffle/Ray-grass		Moutarde	
	CR	% recouvrement	CR	% recouvrement	CR	% recouvrement
16-mai	0,01	0	0,01	0	0,01	30
17-mai	0,05	0	0,02	2	0,02	33
24-mai	0,04	0	0,04	10	0,04	50
25-mai	0,06	0	0,04	16	0,04	54
05-juil	0,20	0	0,14	100	0,14	90
19-juil	0,23	0	0,10	100	0,05	75

### 1.2.3 Impact de traces de roues sur le coefficient de ruissellement

Le ruissellement est beaucoup plus important dans les traces de roue que sur un état de surface dégradé par les pluies (Ouvry, 1989-1990 in Flaitz, 2003) (relation 11 de la Figure 9). Le potentiel d'infiltration y est de l'ordre de 5 mm/h. Dans le cas de travaux remaniant le sol, les traces de roues du tracteur disparaissent sous l'action de l'outil. Pour un passage de pulvérisateur, les empreintes ne sont pas effacées, elles représentent de l'ordre de 2 à 4% de la surface de la parcelle selon la largeur du pulvérisateur, le nombre de roues et leur largeur. Les interventions de récolte et d'amendement laissent également un fort pourcentage de traces de roues. Dans le cas du semis, il faut distinguer les traces de roues par type de culture. En effet, dans le cas de semis de céréales, de pois, de colza et de lin, les empreintes de roue du tracteur sont en général effacées par un outil à dents flexibles intercalé entre le tracteur et le semoir. Cette technique permet de réduire le pourcentage de traces à 5-7% au lieu de 20-27% pour les préparations classiques. Pour les autres cultures, le pourcentage de traces laissé après un semis dépend de la largeur du semoir utilisé, du nombre de roues et leur largeur.

## 2 Détail de la construction : détermination des paramètres et des règles de décision

La Figure 11 représente l'évolution du coefficient de ruissellement entre deux opérations de travail du sol (B), parallèlement à celle du cumul de pluie et celle de l'EDS (A). L'indicateur étant calculé à la décade, nous avons représenté l'évolution du coefficient de ruissellement par pallier, chaque pallier correspondant à la valeur du coefficient pour une décade.

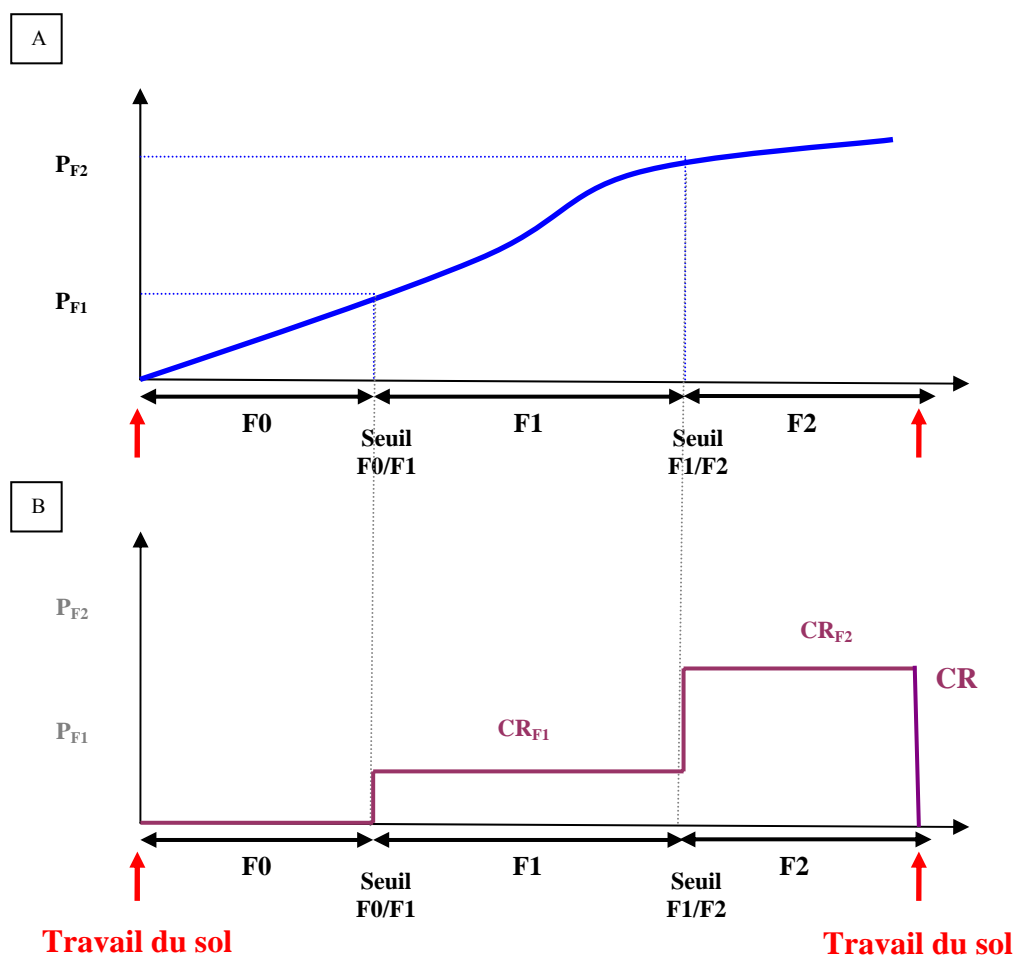


Figure 11 : Diagrammes dynamiques de l'évolution du cumul de pluie (A), du coefficient de ruissellement et de l'état structural du sol entre deux opérations de travail du sol (B)

## 2.1 Détermination du cumul de pluie nécessaire pour atteindre les faciès F1 et F2

### 2.1.1 Présentation du cumul de pluie théorique pour atteindre les faciès F1 et F2

Steffan (2001) a analysé les résultats expérimentaux de Ludwig (1992) : ce dernier expose les hauteurs de pluies cumulées entre la date de semis et la date d'apparition du faciès F2 selon la texture du sol et la nature des cultures.

Les données du Tableau 6 proviennent du traitement et de la synthèse de ce travail. Les cumuls de pluie nécessaires sont compris entre 60 et 500 mm selon le type de sol, la date de semis et l'intensité des précipitations. Ce dernier aspect n'avait pas été pris en compte par Steffan ; il nous a cependant paru nécessaire de l'intégrer aux règles de décision. En effet, si les précipitations sont de forte intensité, la désagrégation des mottes et la fermeture de la surface nécessite un moindre apport d'eau.

Si un ou plusieurs orage(s) surviennent durant la décade, nous attribuons pour une classe texturale donnée, la valeur la plus faible de hauteur de pluie sans prendre en compte la date de semis.

Cependant, les conditions de validité des ces valeurs sont importantes à préciser. Nous nous plaçons ici dans le cas où la rugosité initiale est la plus faible possible (R0) et où le sol n'est protégé ni par un couvert végétal, ni par d'éventuels résidus de récolte. Le taux de matière organique du sol est supposé très faible. Or nous l'avons vu, toutes ces variables ont une influence sur la précocité de passage en faciès F2. Il est donc nécessaire de corriger ces cumuls théoriques en les multipliant par des coefficients qui traduisent l'influence de ces variables

### 2.1.2 Les facteurs correcteurs du cumul de pluie théorique

Tableau 5 : Notation des facteurs correcteurs de  $PF2_{th}$

Facteurs corrigeant le cumul de pluie théorique	Coefficients correcteurs
Taux de MO du sol	$f_{MO}$
Résidus de récolte	$f_{rés}$
Couvert végétal + type de système racinaire	$f_{CVi}$
Rugosité initiale du sol	$f_R$
$PF2 = (f_{MO} \times f_{rés} \times f_{CVi} \times f_R) \times PF2_{th}$	

Tableau 6 : Hauteur de pluie nécessaire non corrigée pour atteindre le faciès F2 ( $PF2_{th}$ ) par date de semis et par type de sol (d'après Ludwig, 1992)

Texture	Date de semis	$PF2_{th}$ (en mm)	
		Pas d'orage	Orage(s)
ALO, AL, A, AS	01/01 – 31/12	500	500
LA	01/02 – 01/04	250	250
	02/04 – 01/06	300	
	02/06 – 01/11	325	
	02/11 – 31/01	250	
	01/02 – 01/04	200	
LAS, LSA, SA	02/04 – 01/06	250	200
	02/06 – 01/11	350	
	02/11 – 31/01	200	
	01/02 – 01/04	120	
LM pour A>14%	02/04 – 01/06	160	120
	02/06 – 01/10	240	
	02/10 – 01/11	160	
	02/11 – 31/01	120	
	01/02 – 01/04	60	
LM pour A<14%	02/04 – 01/06	120	60
	02/06 – 01/10	180	
	02/10 – 01/11	120	
	02/11 – 31/01	60	
	01/02 – 01/04	80	
LMS pour A>14%	02/04 – 01/06	110	80
	02/06 – 01/10	140	
	02/10 – 01/11	110	
	02/11 – 31/01	80	
	01/02 – 01/04	60	
LMS pour A<14%	02/04 – 01/06	80	60
	02/06 – 01/10	140	
	02/10 – 01/11	80	
	02/11 – 31/01	60	
	01/01 – 31/12	150	
LS	01/01 – 31/12	150	150
SL	01/01 – 31/12	250	250

### 2.1.2.1 Prise en compte de la matière organique

Les matières organiques, au stade ultime de leur évolution avant minéralisation, favorisent l'agrégation des particules entre elles et ont ainsi une influence positive sur la stabilité structurale du sol. (Auzet, 1987).

Une très faible variation de la teneur en matière organique dans un sol peut induire une modification notable de la sensibilité à la battance du sol en question : on observe par exemple un retard de formation des croûtes de battance pour un sol limoneux, présentant un taux de matière organique de 2,8% par rapport à un sol de même texture mais dont la teneur en humus est moitié moindre (1,4%) (Martin *et al.*, 2004).

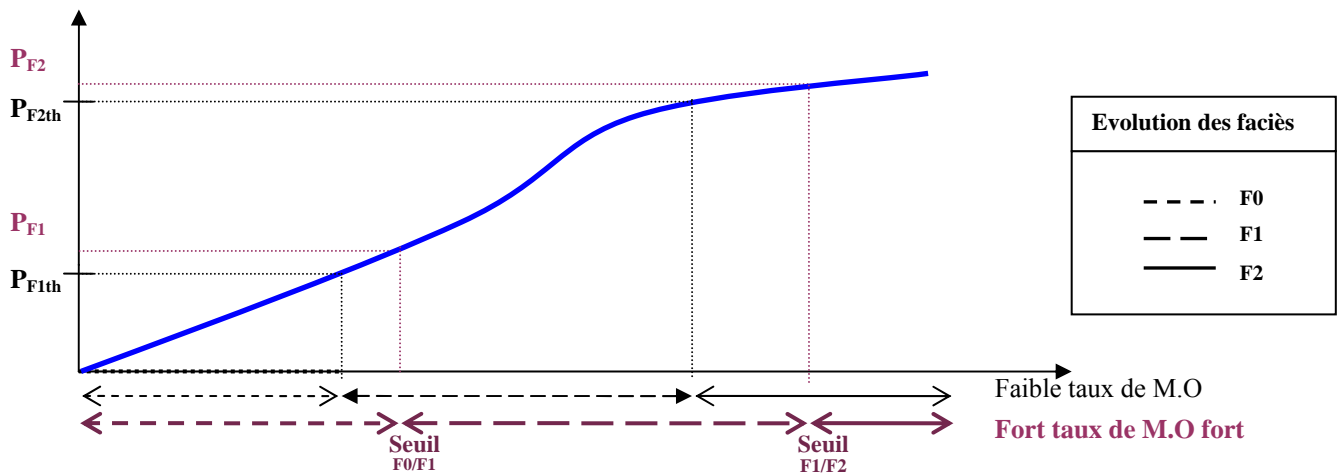


Figure 12 : Diagramme dynamique du cumul de pluie nécessaire au changement de faciès en fonction de la teneur en matière organique

Le cumul de pluie nécessaire pour passer d'un faciès à l'autre sera donc supérieur pour un sol présentant une teneur élevée en matière organique (Figure 12). Il est donc nécessaire d'appliquer une correction au cumul de pluie théorique défini précédemment (§ 2.1.1.), lequel n'intègre pas l'influence de la matière organique sur la stabilité structurale du sol.

Nous avons définis des valeurs seuils qui délimitent quatre classes d'influence du taux de matière organique sur la stabilité structurale des sols. A chacune de ces classes est associé un coefficient destiné à rectifier le cumul de pluie nécessaire au passage en faciès F2. Ces coefficients correcteurs ont été définis sur la base de dires d'experts (Tableau 7).

Tableau 7 : Coefficients correcteurs appliqués à  $PF_{2th}$  en fonction de la teneur en matière organique (d'après Martin, 2004)

Taux de M.O (%)	Facteur correcteur $f_{MO}$
< 2	1
[2 ; 2,5]	1,10
[2,5 ; 3]	1,25
> 3	1,50

### 2.1.2.2 Prise en compte des résidus de récolte

- **Calcul du taux de résidus de récolte en surface du sol**

Les résidus de récolte qui nous intéressent, sont ceux **présents à la surface du sol**. Ce sont eux qui auront un effet dit "parapluie" et qui retarderont l'apparition de croûtes sédimentaires. Il s'agit donc dans un premier temps, d'évaluer le taux de résidus en surface du sol, lequel dépend de **l'outil de travail du sol** utilisé ainsi que du **précédent cultural**.

Le Tableau 8 nous indique, qu'après récolte de colza, les résidus de culture couvrent la totalité de la surface du sol tandis que ceux de pomme de terre n'en recouvrent que la moitié.

*Tableau 8 : Taux de recouvrement de la surface du sol par les résidus après récolte et avant travail du sol selon le type de précédent cultural (Soltner, 2000)*

<b>Précédent cultural</b>	<b>Taux de résidus (en %)</b>
Céréales à paille	100
Maïs grain	100
Colza	100
Pois, Soja	60
Pomme de terre	35
Maïs ensilage	10
Betterave	10

Après récolte, le sol est travaillé à l'aide de plusieurs outils dont la nature dépend du précédent cultural, de la culture à venir et de l'itinéraire technique choisi par l'agriculteur. A chaque passage d'un outil, le taux de résidus en surface du sol se voit modifier. Le tableau 9 nous donne, pour la plupart des outils agricoles utilisés, le pourcentage de résidus conservés en surface après passage.

Tableau 9 : Part de résidus de culture conservés à la surface du sol en fonction de l'outil de travail du sol (d'après dires d'expert)

Outils	Résidus en surface (%)
Bêche roulante	50
Charrue	5
Chisel	50
Cultivateur à dents léger	50
Cultivateur à dents lourd	50
Cultivateur rotatif à axe horizontal	30
Cultivateur rotatif à axe vertical	30
Cultivateur rotatif lourd	30
Décompacteur (bâti droit ou en V)	100
Décompacteur animé	90
Décompacteur dent oblique	100
Décompacteur rotatif	90
Herse à dents vibrantes	90
Herse alternative	70
Herse classique	90
Herse rotative	60
Machine à bêcher	50
Outil à dents autoanimées	50
Pulvérisateur à disque	50
Rouleaux	100
Semoir classique (type céréales)	100
Semoir mono-graine (type maïs)	90
Vibroculteur	90

Prenons un exemple pour illustrer la façon dont sera calculé le taux de résidus au cours d'une décade : la récolte du maïs grain a lieu le premier jour de la décade  $i$ . L'agriculteur laboure quarante jours plus tard, ce qui correspond au premier jour de la décade  $(i+3)$ . Au cours de la décade suivante  $(i+4)$ , il prépare le sol au semis en passant à deux reprises une herse classique.

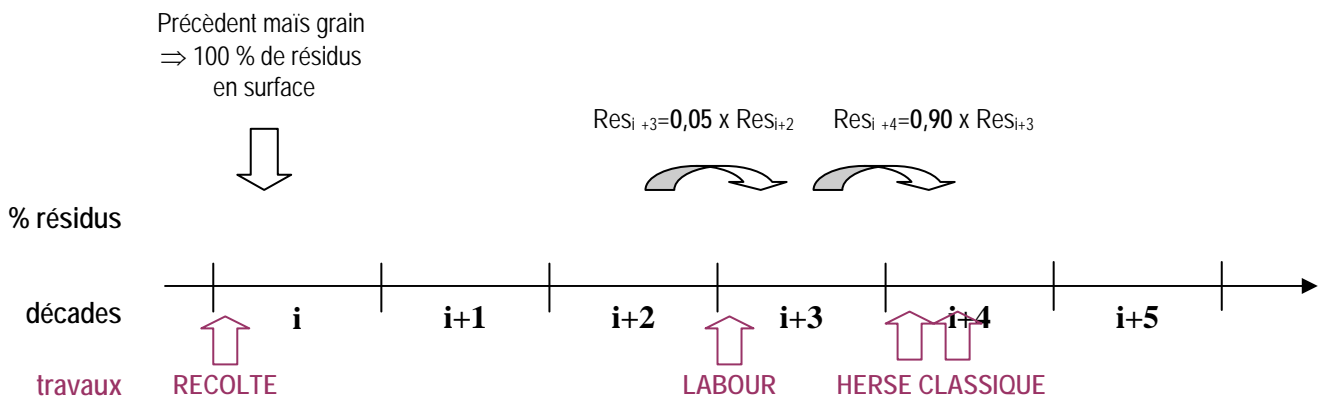


Figure 13 : Exemple de calcul du taux de résidus en surface du sol

- Règle de décision : valeurs de  $f_{rés}$

L'étude menée par Armand sur le risque de ruissellement des terres agricoles met en évidence l'existence de valeurs charnières autour desquelles les sols ont des comportements différents en termes de sensibilité à la battance. En deçà de 30% de recouvrement, les résidus n'auront aucun effet sur la sensibilité globale à la battance. Leur rôle protecteur vis-à-vis de l'effet splash semble négligeable. Au contraire, au-delà de 65% de recouvrement, la protection est telle que l'état structural du sol n'évolue pas sous l'impact des gouttes. Entre ces deux valeurs seuils, le passage en F2 est retardé (Figure 14).

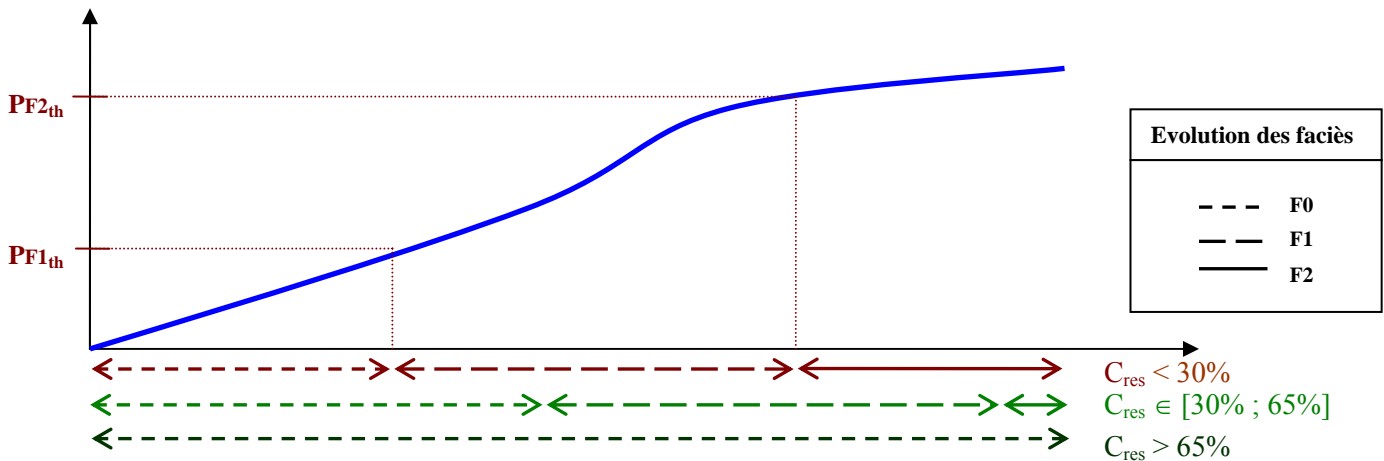


Figure 14 : Diagramme dynamique du cumul de pluie nécessaire au changement de faciès en fonction du taux de recouvrement du sol par les résidus de récolte

De même que nous l'avons fait pour la matière organique, nous affectons des coefficients correcteurs aux trois classes délimitées par les valeurs seuils de 30 et 65 % (Tableau 10).

Tableau 10 : Coefficients correcteurs appliqués à  $PF2_{th}$  en fonction du taux de résidus en surface (d'après Armand, 2003)

Taux de résidus de récolte ( $C_{rés}$ )	$f_{rés}$
$C_{i\ rés} < 30\%$	1
$C_{i\ rés} \in [30\% ; 65\%]$	$(1 + C_{i\ rés})$
$C_{i\ rés} > 65\%$	$+ \infty^*$

\*Pas d'évolution

### 2.1.2.3 Prise en compte du couvert végétal vivant

Contrairement au taux de résidus de récolte en surface ou à la teneur en matière organique du sol que nous supposons stable au cours du semis à la récolte, le couvert végétal vivant varie au cours du temps passant de 0% au semis à des valeurs souvent proches de 100% au moment de la récolte. Le cumul de pluie nécessaire pour atteindre F2 devra donc être **calculé pour chaque décade**.

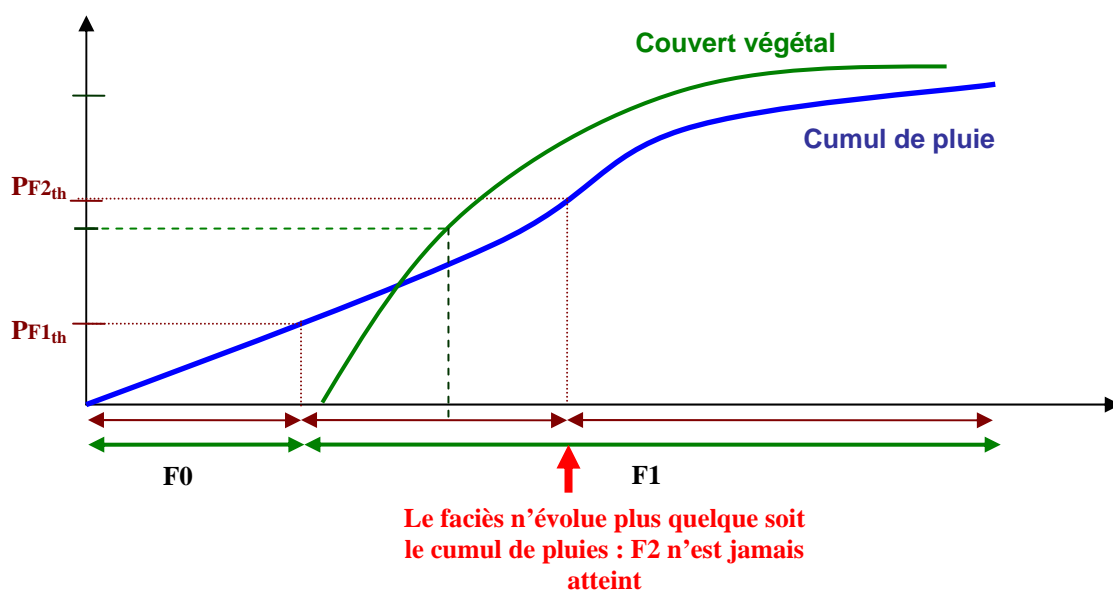


Figure 15 : Diagramme dynamique de l'évolution des EDS en fonction du couvert végétal vivant

- Règle de décision : valeurs de  $f_{cv}$

A partir de l'analyse des travaux de Gallien et al. (1995) et ceux de Roose (1994), nous avons pu constater que l'efficacité du couvert végétal, en matière de stabilisation de la structure du sol, dépend de la forme du système racinaire, un système pivotant se révélant plus performant qu'un système racinaire fasciculé.

En outre, nous avons remarqué l'existence de valeurs seuils du taux de couverture (30% et 70%) en deçà desquelles le couvert végétal ne semble jouer qu'un rôle négligeable dans la stabilisation des EDS. Au-delà de ces valeurs seuils, nous considérons que l'état de surface du sol n'évolue plus, quelque soit le régime des précipitations (Figure 15).

Ces valeurs ont été soumises à des experts (Auzet & Martin, 2004) et ont été jugées pertinentes.

Le Tableau 11 résume les résultats de nos recherches.

Tableau 11 : Coefficients correcteurs appliqués à PF2th en fonction du type de système racinaire du végétal et de son taux de recouvrement du sol (issu de l'analyse des résultats de Gallien et al., 1995 et Roose, 1994)

Type de système racinaire	Taux de couverture du sol	$f_{CV}$
Fasciculé (ex : céréales)	< 70%	1
	> 70%	+ $\infty^*$
Pivotant (ex : moutarde)	< 30%	1
	> 30%	+ $\infty^*$

\* pas d'évolution

#### 2.1.2.4 Prise en compte de la rugosité initiale

Lorsque la rugosité créée par le travail du sol est importante, l'apparition de la croûte de battance est retardée par rapport à un sol affiné par les outils (Figure 16). Gallien *et al.* (1995) montrent qu'un labour (classe de rugosité R3) nécessite environ 15% de précipitations supplémentaires par rapport à un lit de semence (R0) pour atteindre le faciès F2. Les coefficients correcteurs à appliquer sont présentés dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Coefficients correcteurs appliqués à PF2th en fonction de la classe de rugosité initiale du sol

Rugosité initiale*	$f_R$
R4	1,20
R3	1,15
R2	1,10
R1	1,05
R0	1,00

\*Après travail du sol

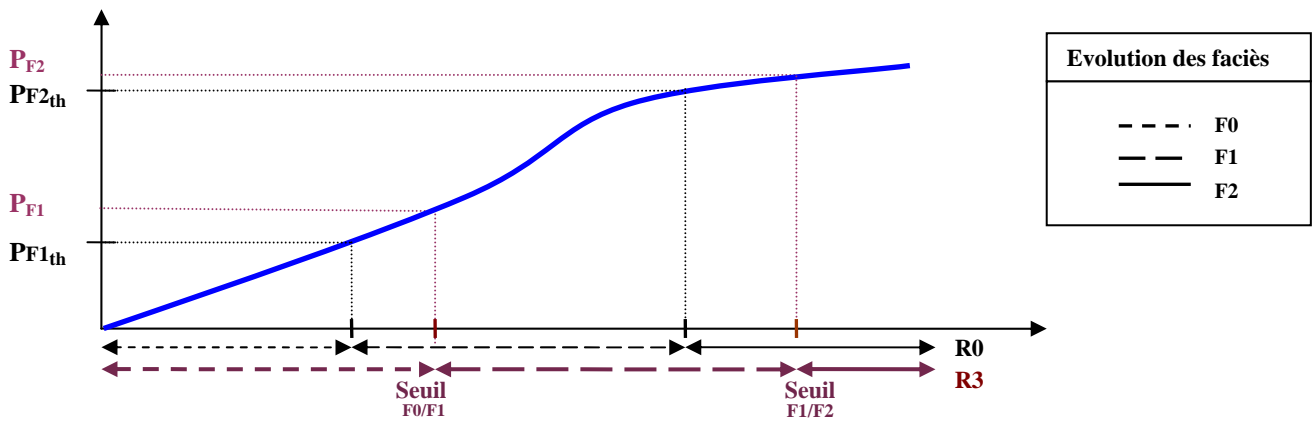


Figure 16 : Diagramme dynamique de l'évolution des EDS en fonction de la rugosité

## 2.2 Détermination du coefficient de ruissellement lors d'une décade $i$ ( $CR_i$ )

### 2.2.1 Présentation du coefficient de ruissellement maximal hors traces de roues

Nous définissons un coefficient de ruissellement que nous nommerons "coefficient de ruissellement maximal" (noté  $CR_{i \text{ Max}}$ ). Ce coefficient est déterminé pour chaque faciès (F0, F1 ou F2), en l'absence de couvert végétal et de résidus de récolte et pour la classe de rugosité la plus faible (R0).

Les valeurs de ce coefficient sont mentionnées dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Valeur du coefficient de ruissellement maximal ( $CR_{i \text{ Max}}$ ) hors traces de roues

$CR_{i \text{ Max}}$ (en %)	Intensité	
	Faible (< 20 mm/h) Pas d'orage	Forte (> 20 mm/h) Orage(s)
En faciès <b>F0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
En faciès <b>F1</b>	<b>2</b>	<b>12</b>
En faciès <b>F2</b>	<b>25</b>	<b>40</b>

Flaitz (2003) avait défini, lors de la construction de l'indicateur RUIS, des coefficients de ruissellement pour chacun des cas de figure du tableau 13. Cependant, après avoir été soumis à avis d'experts, les valeurs de ce coefficient ont été jugées trop faibles. Cette sous-estimation

trouve une explication dans le choix des données expérimentales. Les coefficients de ruissellement ont en effet été déterminés à partir d'un jeu de mesures de ruissellement réalisées une année où les précipitations avaient été exceptionnellement faibles.

Pour prévenir ce genre d'aléas, nous avons choisi de travailler à partir du tableau d'évaluation de l'infiltration issu du **modèle de ruissellement STREAM** (Sealing and Transfert by Runoff and Erosion in relation with Agricultural Managment) (Cerdan, 2001). Ce tableau ainsi que le détail des calculs sont présentés en annexe.

A partir de ce tableau, nous avons pu calculer les coefficients de ruissellement pour six évènements pluvieux de 20 millimètres ayant des intensités et des durées différentes. Cette simulation nous a permis de déterminer les coefficients de ruissellement dans le cas d'évènements pluvieux à caractère orageux (intensité supérieure à 20 mm/h) ou non, et pour chaque faciès et sur traces de roues.

Nous nous sommes placés dans des conditions de rugosité minimale et de couverture du sol nulle. Comme nous 'avons fait pour PF2th, il est nécessaire de corriger  $CR_{i \text{ Max}}$  par des facteurs traduisant l'effet de la rugosité et celui de la couverture du sol sur le potentiel d'infiltration.

### 2.2.2 Les facteurs correcteurs du coefficient de ruissellement maximal hors traces de roues

Tableau 14 : Notation des facteurs correcteurs de  $CR_{i \text{ Max}}$

Paramètres conditionnant l'infiltrabilité du sol	Coefficient correcteur du $CR_{\text{max}}$
<b>Rugosité</b> (en fonction du faciès F et de l'intensité des pluies)	$f_{F,R}$
<b>Couverture du sol</b> (résidus + couvert végétal)	$f_C$
$CR_i = (f_{iF,R} \times f_{iC}) \times CR_{i \text{ max}}$	

### 2.2.2.1 Prise en compte de la rugosité en début de décade

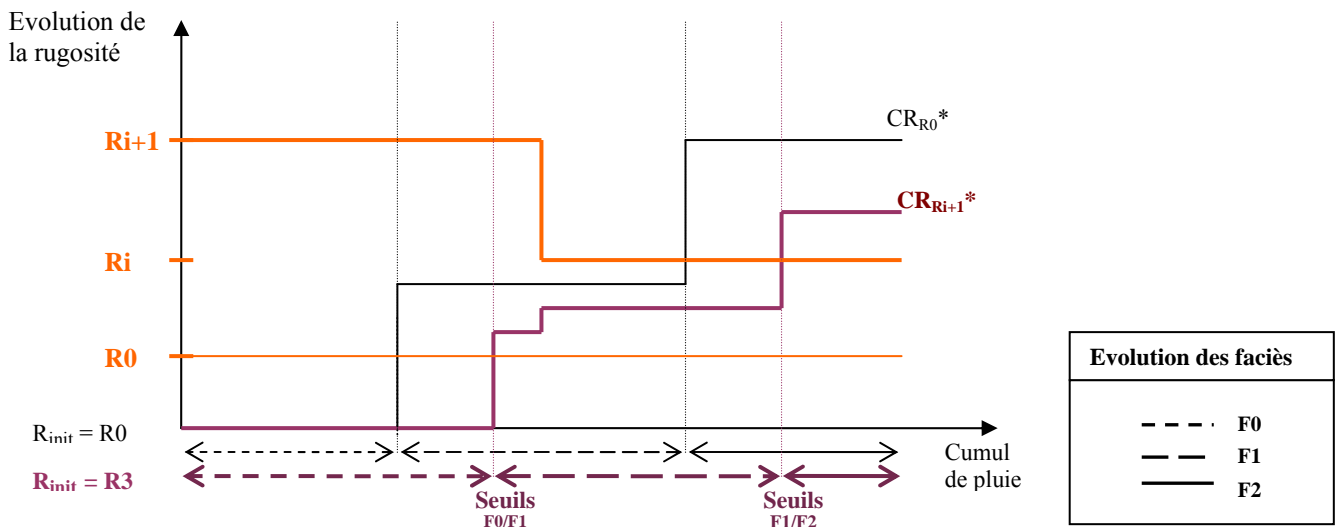


Figure 17 : Diagramme dynamique de l'évolution du coefficient de ruissellement en fonction de la rugosité

De la rugosité et du faciès dépend directement le potentiel d'infiltration du sol et par conséquent, le coefficient de ruissellement (Figure 17). Or le coefficient de ruissellement maximal a été déterminé dans le cas où la rugosité est la plus faible possible. Il convient donc de corriger ce coefficient en fonction de la classe de rugosité dans laquelle on se trouve au cours de la décade  $i$ .

Certes le  $CR_{i \text{ Max}}$  a été déterminé pour les différents faciès, cependant la rugosité n'aura pas le même effet sur le ruissellement selon le stade de formation de la croûte de battance. Son rôle dans l'amélioration de l'infiltrabilité du sol est en effet d'autant plus notable que la dégradation de la structure du sol est peu avancée et que l'intensité des pluies sera faible.

Par exemple, lorsque les précipitations atteignent de fortes intensités, la rugosité même si elle est très prononcée, aura un faible impact sur la réduction du ruissellement et le coefficient correcteur se rapprochera de la valeur 1.

Afin de déterminer dans quelle mesure l'augmentation de la rugosité modifie le coefficient de ruissellement, nous avons exploité encore une fois le tableau issu du modèle STREAM (Cerdan, 2001) à partir duquel nous avons calculé les coefficients de ruissellement pour des événements pluvieux d'intensités et de durées variables et ce, pour chacune des cinq classes de rugosité définies.

Tableau 15 : Influences combinées de la rugosité et de l'intensité des précipitations sur le coefficient de ruissellement en fonction du faciès atteint : valeurs du coefficient  $f_{F,R}$

$f_{F,R}$		Classes de rugosité				
Intensité	Faciès	R4	R3	R2	R1	R0
Absence d'orage	F2	0	0,2	0,2	1	1
	F1	0	0	0	0	1
Orage(s)	F2	0,5	0,7	0,7	1	1
	F1	0,4	0,5	0,5	1	1

Il est important de noter que la rugosité qui nous intéresse dans ce cas n'est pas la rugosité initiale mais la rugosité que présente le sol au cours de la décade considérée. En effet, la rugosité générée par le travail du sol est altérée au fil du temps par les précipitations. Ainsi, la rugosité à un instant donné dépend à la fois de la rugosité initiale et du cumul de précipitations jusqu'à cet instant. Steffan (2001) définit la quantité de pluie nécessaire au passage d'une classe de rugosité à une classe inférieure. Nous reprendrons ses résultats pour notre travail (Tableau 16).

Tableau 16 : Hauteur de pluie nécessaire au passage d'une classe de rugosité à la classe inférieure (d'après Steffan, 2001)

$P_{R_n/R_{n-1}}$ * (en mm)	100	50	50	50
Classes de rugosité	R4	→ R3	→ R2	→ R1 → R0

\* cumul de pluie nécessaire en millimètre pour passer de la classe de rugosité  $n$  à la classe de rugosité  $(n-1)$

Afin de faciliter les calculs, nous admettrons que la rugosité au cours de la décade  $i$ , correspond à la classe de rugosité atteinte en fin de décade précédente.

#### 2.2.2.2 Influence de la couverture du sol, résidus de récoltes et couvert végétal : détermination du coefficient correcteur $f_c$

Nous l'avons vu, outre leur effet "parapluie", résidus et couvert végétal améliorent le potentiel d'infiltration du sol. Les résidus constituent une rugosité pérenne qui favorise l'infiltration de l'eau dans la mesure où elle introduit des discontinuités de la croûte battance. Le continuum feuilles-tiges-racines du végétal crée des zones d'infiltration préférentielle au niveau de la base de la tige. Le coefficient de ruissellement diminue donc au fur et à mesure qu'augmente la couverture du sol (Figure 18).

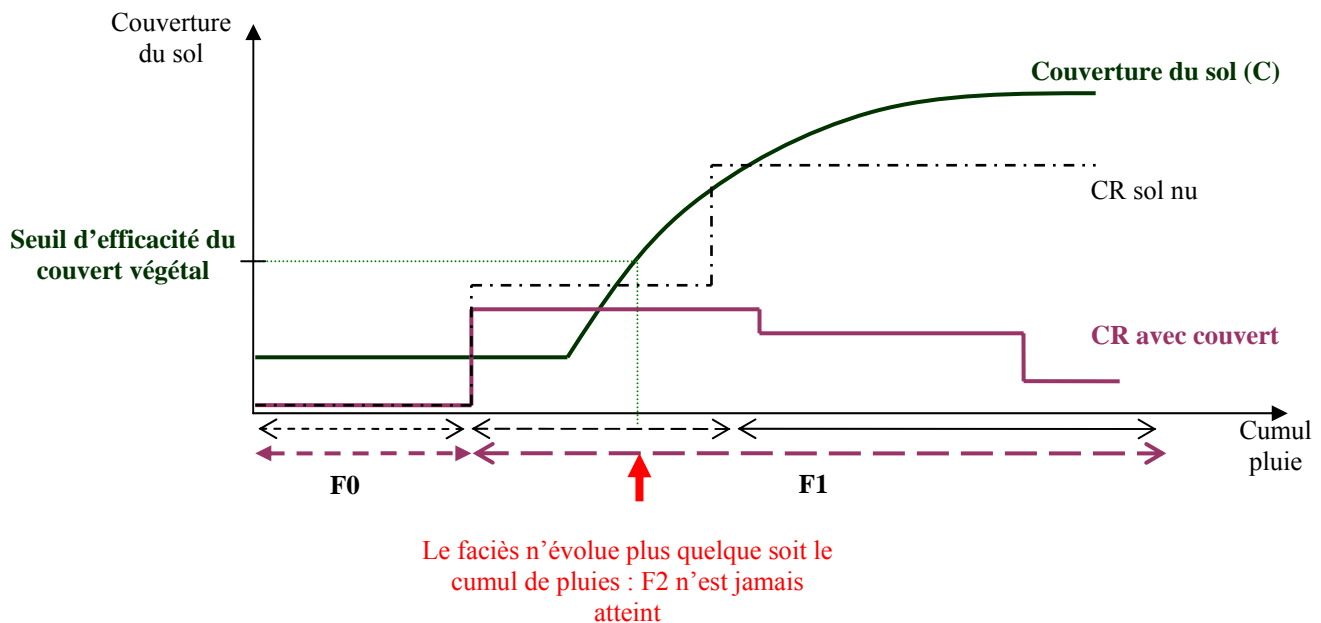


Figure 18 : Diagramme dynamique de l'évolution du coefficient de ruissellement en fonction de la couverture du sol

Nous ne faisons pas de distinction entre taux de résidus de récolte et taux de couverture végétale en considérant le taux global de couverture du sol durant la décade  $i$  que nous noterons  $C_i$ .

D'après l'analyse des expériences de Gallien et al. (1995) et de Roose (1994), nous avons estimé la valeur du coefficient correcteur  $f_C$  en fonction du taux de recouvrement du sol par la végétation et les résidus.

$$f_C = 1 - \frac{C_i}{2}$$

L'indicateur RUIS (Flaitz, 2003) intégrait déjà le rôle modérateur de la couverture du sol : le coefficient correcteur choisi était  $(1 - C_i)$ . Cependant, nos recherches bibliographiques nous ont conduit à penser qu'un tel coefficient correcteur surestimait le rôle de la couverture du sol dans l'amélioration de la capacité d'infiltration.

Il est important de souligner que le coefficient  $\frac{1}{2}$ , introduit afin de limiter l'influence de la couverture du sol par rapport aux travaux antérieurs, a été déterminé de façon intuitive en se basant sur l'observation et l'analyse des résultats issus des deux études précédemment citées. Or ces études ne visaient pas directement à déterminer l'impact du couvert végétal sur le coefficient de ruissellement. Il est sans doute possible d'améliorer la précision de ce facteur correcteur à condition toutefois de mettre en place des expérimentations plus ciblées, ce qui n'a pas été le cas jusqu'à présent.

### 2.2.3 Détermination du coefficient de ruissellement sur traces de roues

Le ruissellement est beaucoup plus important sur les traces de roue que sur un état de surface dégradé par les pluies (Ouvry, 1989-1990). L'infiltrabilité est de l'ordre de 5 mm/h.

Nous supposons par ailleurs, que les zones tassées par le passage d'engins constituent un état de surface à part entière qui n'évolue pas dans le temps, sous l'action des précipitations. Il a donc été défini des coefficients de ruissellement ( $CR_{TR}$ ) propres à ces zones, en fonction de l'intensité des précipitations.

Tableau 17 : Valeur du coefficient de ruissellement sur traces de roues (d'après Flaitz, 2003)

$CR_{TR}$ (en %)	Intensité	
	Faible (< 20 mm/h) Pas d'orage	Forte (> 20 mm/h) Orage(s)
Sur traces de roues (ou chantier de récolte tassé)	10	50

Nous présumons également que les traces de roues sont peu recouvertes par les végétaux vivants et que les résidus de récoltes, s'ils sont présents en surfaces de ces zones tassées, ont été incrustés dans le sol de sorte qu'ils ne constituent plus de barrage au ruissellement. La rugosité de ces surfaces étant par ailleurs très faible, aucun facteur n'améliore le potentiel d'infiltration.

La quantité d'eau ruisselée sur ces zones correspond donc tout simplement à la hauteur de précipitations multipliée par le coefficient de ruissellement  $CR_{TR}$ .

## 2.3 Calcul de l'indicateur $I_{RU}$ au cours d'une décade $i$

Nous considérons que la parcelle agricole est constituée de deux entités : une surface hors traces de roues qui évolue au cours du temps et une surface tassée qui elle, ne subit aucune évolution et pour laquelle, le CR ne varie qu'en fonction de l'intensité des pluies. Il est donc nécessaire de calculer dans un premier temps la part de la surface tassée par le passage d'engins agricoles.

### 2.3.1 Calcul du pourcentage de la surface parcellaire tassée lors d'une décade $i$

La fraction de traces de roues (TR) est calculée par décade dès lors qu'il y a un passage d'outil créant de nouvelles traces, après le passage d'un outil fragmentant le sol au moins en surface (ex : passage d'un pulvérisateur après le semis). Si aucun outil n'est passé pendant la décade, on garde la fraction de traces de roues de la décade précédente.

Pour le calcul de TR, il faut connaître la largeur des pneus du tracteur, la largeur de l'outil et le nombre de roues à l'arrière (roues jumelées ou simples). Pour nos calculs, seules les roues arrières sont prises en compte, elles roulent en général sur les traces des roues avant. On obtient donc la formule suivante :

$$TR = \frac{\text{Largeur des pneus} \times \text{Nombre de pneus}}{\text{Largeur de travail de l'outil}}$$

$TR$  : pourcentage de traces de roues

Nous disposons maintenant de tous les éléments nécessaires au calcul de l'indicateur pour une décade donnée. Il faut toutefois envisager deux cas de figure : le cas où, au cours de la décade, le cumul de pluie nécessaire au changement de faciès est atteint doit être traité à part.

### 2.3.2 Calcul de $I_{RU}$ dans le cas où le faciès F1 ou F2 n'est pas atteint lors de la décade

Si le cumul de pluie nécessaire au changement de faciès n'est pas atteint au cours de la décade, le calcul de l'indicateur peut alors se faire simplement en ajoutant le ruissellement hors traces de roues à celui estimé sur zones tassées.

Imaginons que nous nous trouvons en faciès F1. Nous aurons alors :

$$I_{RU} = (1 - TR_i) \cdot CR_{iF1} \cdot P_i + TR_i \cdot CR_{iTR} \cdot P_i$$

Avec :

$P_i$  : Précipitation de la décade  $i$  en mm

$TR_i$  : fraction de traces de roues sur la parcelle lors de la décade  $i$

$CR_{iF1}$  : Coefficient de ruissellement corrigé de la décade  $i$  en faciès F1

$CR_{iTR}$  : Coefficient de ruissellement de la décade  $i$  sur traces de roues

$i$  : Numéro de la décade,  $i$  varie entre 1 et  $n$

### 2.3.3 Calcul de $I_{RU}$ dans le cas où le faciès F1 ou F2 est atteint lors de la décade

Dans un premier temps, il s'agit de déterminer la part des précipitations de la décade qu'il reste après avoir atteint le faciès F1. Il faut pour cela considérer la pluviosité de la décade  $P_i$  à laquelle on soustrait la pluviosité de la décade qui a contribué à la formation du faciès F1 ( $P_{i \rightarrow F1}$ ).

$P_{i \rightarrow F1}$  est déterminé à partir de la relation suivante au moment où le faciès F1 est atteint :

$$P_{F1} = \sum_{k=1}^{i-1} \left[ P_k + P_{i \rightarrow F1} \right]$$

$$\Leftrightarrow P_{i \rightarrow F1} = \sum_{k=1}^{i-1} \left[ P_{F1} - \sum_{k=Wsol}^{i-1} P_k \right]$$

Avec :

$P_k$  : Précipitations de la décade  $k$  en mm

$P_{i \rightarrow F1}$  : Précipitations de la décade  $i$  qui a contribué à la formation du faciès F1

$P_{F1}$  : Quantité d'eau nécessaire pour atteindre le faciès F1 en mm

$\sum_{k=1}^{i-1} P_k$  : Somme des précipitations de la décade 1 (correspondant à la première décade après travail du sol) à la décade  $i-1$

Dans le cas où le faciès F1 est atteint au cours de la décade, on ne résonne plus sur  $P_i$  pour estimer les pluies non infiltrées mais sur  $P_{i \rightarrow F1}$ . On obtient la formule suivante :

$$I_{RU} = (1 - TR_i) \cdot (P_i - P_{i \rightarrow F1}) \cdot CR_{iF1} + TR_i \cdot P_i \cdot CR_{iTR}$$

$TR_i$  : Fraction de traces de roues de la décade  $i$  sur la parcelle  
 $CR_{iF1}$  : Coefficient de ruissellement de la décade  $i$  en faciès F1  
 $CR_{iTR}$  : Coefficient de ruissellement de la décade  $i$  sur traces de roues

Lorsque l'on atteint le faciès F2 au cours de la décade, une quantité d'eau de la décade ruisselle encore sur le sol en faciès F1, le reste ruisselle en faciès F2. La formule pour déterminer  $P_{i \rightarrow F1}$  est réadaptable pour déterminer la pluviosité de la décade qui a contribué à la formation du faciès F2 ( $P_{i \rightarrow F2}$ ).

$$P_{i \rightarrow F2} = P_{F2} - \sum_{k=1}^{i-1} P_k$$

$P_{i \rightarrow F2}$  : Précipitations de la décade  $i$  qui a contribué à la formation du faciès F2

$P_{F2}$  : Quantité d'eau nécessaire pour atteindre le faciès F2 en mm

$\sum_{k=1}^{i-1} P_k$  : Somme des précipitations de la décade 1 (correspondant à la première décade après travail du sol) à la décade  $i-1$

L'eau de la décade qui ruisselle encore sur le faciès F1 est égale aux précipitations de la décade qui a contribué à la formation du faciès F2,  $P_{i \rightarrow F2}$ .

D'où :

$$I_{RU} = (1 - TR_i) \cdot [P_{i \rightarrow F1} \cdot CR_{iF1} + (P_i - P_{i \rightarrow F2}) \cdot CR_{iF2}] + TR_i \cdot P_i \cdot CR_{iTR}$$

$CR_{iF1}$  : Coefficient de ruissellement corrigé de la décade  $i$  en faciès F1

$CR_{iF2}$  : Coefficient de ruissellement corrigé de la décade  $i$  en faciès F2

$CR_{iTR}$  : Coefficient de ruissellement de la décade  $i$  sur traces de roues

Nous avons tous les éléments pour calculer  $I_{RU}$ . L'indicateur doit maintenant être validé.

## **Partie 3 :**

# **Evaluation de l'indicateur $I_{Ru}$**

## **Présentation des résultats**

# 1 Résultats du test de sensibilité

Afin d'évaluer la sensibilité de l'indicateur  $I_{RU}$  à la variation des différentes variables entrant dans son calcul, nous procédons à un test de sensibilité.

Nous ferons donc varier les six variables d'entrée, à savoir :

- le pourcentage de zones tassées par le passage d'engins,
- le pourcentage de résidus de récolte à la surface du sol,
- le taux de couverture du sol par les végétaux vivants,
- le taux de matière organique,
- le cumul de pluie nécessaire pour atteindre le faciès F2,
- la hauteur de précipitations décadaire.

Pour chacune de ces variables, nous avons déterminé un **intervalle de valeurs réaliste** que la variable est susceptible de prendre. En effet, la teneur en matière organique par exemple, ne peut être inférieure à 1% et ne peut guère dépasser les 5%. Ces intervalles sont présentés dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Test de sensibilité : intervalles de variation des variables d'entrée de  $I_{RU}$

	Minimum absolu	Maximum absolu
<b>% Traces de roues</b>	0%	80%
<b>% Résidus</b>	0%	100%
<b>% Couvert végétal vivant</b>	0%	100%
<b>% Matière organique</b>	1%	5%
<b>Rugosité initiale</b>	R0	R3
<b>Cumul de pluie théorique pour atteindre F2</b>	60 mm	300 mm
<b>Hauteur des précipitations de la décade</b>	0 mm	120 mm

Il s'agit de faire varier tour à tour chacune des variables, les cinq autres étant fixées.

Le test a été réalisé pour trois cas de figure (Tableau 19) :

- le cas où les variables sont fixées à des valeurs considérées comme favorables,
- le cas où les variables sont fixées à des valeurs considérées comme défavorables
- le cas où les variables sont fixées à des valeurs considérées comme intermédiaires

Nous nous sommes placés dans le cas où le faciès **F1 est atteint en début de décade** afin de pouvoir observer un ruissellement dans tous les cas.

L'influence des variables varie selon la situation dans laquelle on se place. Globalement, les variables ont toutes un poids plus important dans le cas le plus défavorable. Dans le cas favorable, seuls la hauteur des précipitations décadaires, le pourcentage de traces de roues et, dans une moindre mesure, la rugosité initiale du sol font varier  $I_{RU}$ .

Dans le cas défavorable, toutes les variables ont une influence sur la valeur du ruissellement.

La fraction de traces de roues a une forte influence sur le ruissellement. Dans le cas favorable, une diminution de 60% de la surface tassée induit une baisse de 150% du volume d'eau ruisselé. Dans le cas défavorable, la même réduction du pourcentage de traces réduit le volume ruisselé d'environ 40%.

De même, l'augmentation du volume des pluies au cours de la décade induit dans les trois cas un accroissement important du volume ruisselé. S'il n'y a pas de changement de faciès lors de la décade, la relation entre la variation du cumul de pluie et le volume ruisselé est linéaire. Dans le cas contraire, la courbe est constituée de deux segments de pentes différentes qui correspondent chacun à un état de surface donné.

L'influence de la variation de la couverture du sol est faible. On note dans le cas défavorable uniquement, une faible diminution du ruissellement avec l'augmentation du couvert. Le couvert végétal agit uniquement sur la fraction de précipitations hors traces de roues, or dans ce cas la surface couverte par les zones tassée est importante (80%) ce qui explique en partie la faible influence de la couverture du sol.

La matière organique n'a d'influence que dans le cas défavorable où une augmentation de 40% de la matière organique provoque une baisse du ruissellement de 5%.

La rugosité a un poids relativement important dans le calcul de notre indicateur. Dans le cas défavorable, si la rugosité initiale passe de R1 à R3, le volume ruisselé diminue de 11%. Dans le cas favorable, lorsque l'on passe de la classe R3 à R0, le ruissellement est réduit de 50%, mais si l'on passe de R3 à R1, il n'y a aucune réduction du volume ruisselé. Ce problème est inhérent à la mise en classe de valeurs. En effet, la discrétisation liée à la définition des classes de rugosité entraîne une approximation sur la caractérisation des surfaces dont les rugosités seraient intermédiaires par rapport aux seuils retenus.

*Tableau 19 : Test de sensibilité : valeurs des variables fixes dans les trois cas envisagés*

	<b>Cas favorable</b>	<b>Cas intermédiaire</b>	<b>Cas défavorable</b>
<b>% Traces de roues</b>	10%	40%	80%
<b>% Résidus</b>	50%	25%	10%
<b>% Couvert végétal vivant</b>	75%	50%	10%
<b>% Matière organique</b>	3%	2,5%	1,5%
<b>Rugosité initiale</b>	R3	R2	R1
<b>Cumul de pluie théorique pour atteindre F2</b>	300 mm	120 mm	60 mm
<b>Hauteur des précipitations de la décade</b>	10 mm	40 mm	80 mm

## **2 Résultats de la validation : comparaison des sorties de l'indicateur à des données mesurées**

Afin de procéder à la validation de l'indicateur, nous avons utilisé quatre jeux de données de terrains, résultats d'expérimentations menées par trois auteurs : Armand (2004) à Neewiller et Landser, en Alsace, Van Dijk (sur la période de 1990-1993) à Limburg (Pays-Bas) et Meinrad et Koller (2001) à Geispitzen (Alsace). Sur trois des sites (Landser, Neewiller et Limburg), les mesures de ruissellement ont été réalisées sur microparcelles tandis que sur le dernier (Geispitzen) les mesures ont été effectuées à l'échelle d'une parcelle agricole.

Le but de cette étape de notre travail est de comparer les sorties de notre indicateur à ces données de terrain.

Dans cette partie, nous ne détaillerons que le traitement des données concernant les sites de Limburg et de Geispitzen. Le premier jeu de données a été choisi du fait de l'abondance des mesures réalisées sur trois années consécutives. Le second jeu mérite d'être étudié avec soin car il présente une originalité intéressante : il existe en effet peu de mesures du ruissellement réalisées à l'échelle parcellaire, du fait de la lourdeur du dispositif à mettre en place.

### **2.1 Comparaison des sorties de $I_{RU}$ à des mesures réalisées sur microparcelles expérimentales**

Les données de terrain nous ont été fournies par l'Institut de Géographie de Strasbourg sous forme de fichier informatique. Elles indiquaient, sur la période estivale de trois années consécutives, la quantité d'eau ayant ruisselé sur des placettes expérimentales disposées sur plusieurs parcelles. Parallèlement à cette donnée, le fichier indiquait les itinéraires techniques associés à ces parcelles, la texture du sol de chaque parcelle ainsi que la pluviométrie par événement pluvieux de la région d'étude. Ces données sont indispensables pour effectuer les différents calculs, mais nous n'avons pas eu accès aux données pluviométriques moyennes, nous avons donc utilisé les données précises de terrain.

Ce jeu de données avait servi à la validation de l'indicateur RUIS, ce qui nous permettra de faire une comparaison avec notre indicateur.

Pour l'évaluation quantitative de notre indicateur, nous avons choisi de représenter sur un graphique les valeurs calculées (ou sorties) en fonction de données mesurées (Figure 19). Cette méthode présente l'avantage de laisser le lecteur décider pour lui-même de la validité des résultats, le degré de précision d'un modèle pouvant être satisfaisant pour un utilisateur et inutilisable pour un autre selon leurs besoins (Quinton, 1994).

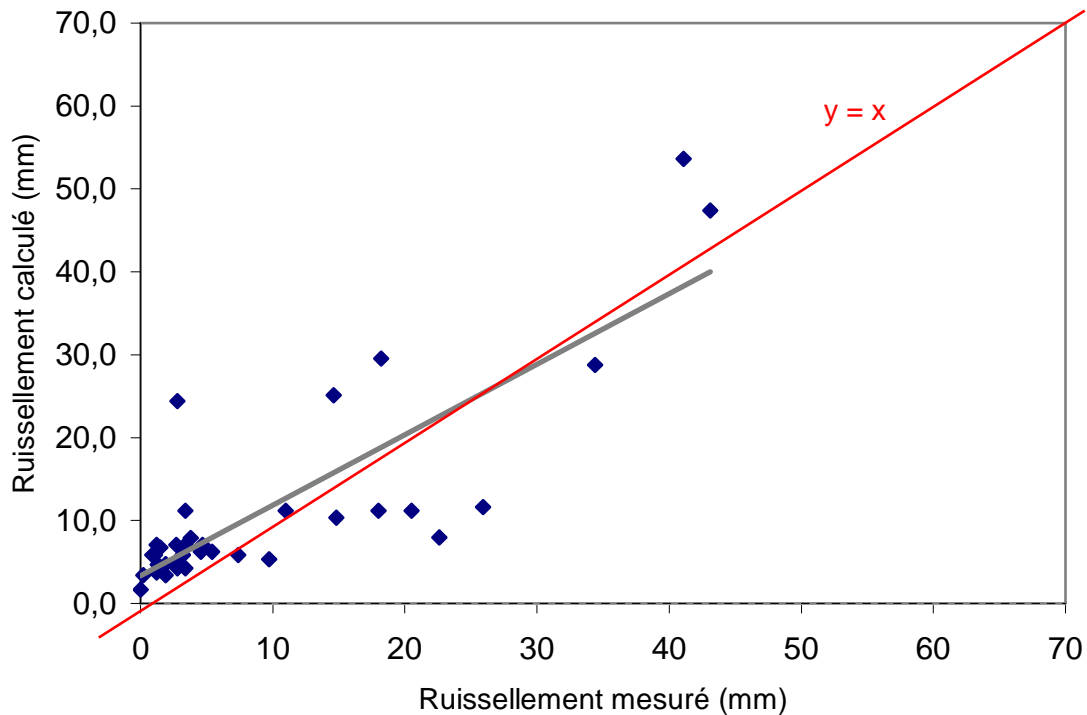


Figure 19 : Comparaison entre les volumes ruisselés mesurés et calculés ( $I_{RU}$ ) sur placettes expérimentales à Limburg

Il nous apparaît cependant nécessaire de quantifier les écarts pour évaluer la pertinence relative de l'indicateur et également, afin de pouvoir procéder à une comparaison avec l'indicateur élaboré au cours des précédents travaux.

A cet égard plusieurs indices ont été retenus.

- **Le coefficient de corrélation (r)** qui permet de mesurer la part linéaire de l'association entre deux variables :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}}$$

$n$  : nombre d'observation ;  $x_i$  : ruissellement simulé ;  $y_i$  : ruissellement mesuré

- **L'erreur moyenne (ME)**, qui permet de mesurer le biais d'estimation :

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - x_i]$$

- **La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)** qui permet de mesurer la précision de l'estimation :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n [y_i - x_i]^2 \right)}$$

- **L'efficience (EF)** qui donne une information sur la capacité prédictive du modèle :

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y_i - x_i]^2}{\sum_{i=1}^n [y_i - \bar{y}_i]^2}$$

- **Le coefficient de corrélation de rang – dit coefficient de Spearman - ( $r_s$ )** qui permet de déterminer s'il y a bien une relation entre le rang des variables mesurées et celui des valeurs calculées

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum (R_x - R_y)^2}{N(N^2 - 1)}$$

R<sub>x</sub> : rang des données mesurées  
 R<sub>y</sub> : rang des données calculées  
 N : nombre de couples de données

Les résultats sont présentés dans le Tableau 20.

Les coefficients de corrélation dans les deux cas sont similaires, nous n'avons donc pas amélioré la linéarité de l'indicateur. Toutefois, l'interprétation du coefficient de corrélation est difficile. Celui-ci peut indiquer une tendance mais ne suffit pas à valider ou non la relation. En effet, le couple de points correspondant à l'évènement extrême suffit à créer la linéarité en lissant les différences entre les points situés près de l'origine. C'est pourquoi nous avons choisi de l'associer avec les autres indices qui fournissent des valeurs moyennes.

La prédiction pour I<sub>RU</sub> est biaisée avec une surestimation de 2 mm ce qui est assez satisfaisant surtout si l'on se réfère aux résultats obtenus avec RUIS (sous estimation de 6,7 mm).

Nous pouvons formuler une hypothèse qui expliquerait cette surestimation du ruissellement. Les mesures ont été effectuées durant la période estivale. Or durant cette période, il est fréquent que surviennent des phases de dessiccation du sol responsables de l'apparition de fentes dans le sol – dites fentes de dessiccation. C'est ce que Boiffin (1984) appelle l'état F3. Le sol retrouve un état fragmentaire et voit son potentiel d'infiltration accru jusqu'à ce qu'un nouvel évènement pluvieux entraîne la fermeture des fentes. Or nous n'avons pas pris en compte cette éventualité dans la construction de notre indicateur, ce qui pourrait expliquer cette surestimation.

La précision a été améliorée, passant de 11,32 mm à 7,07 mm. Cette valeur reste cependant trop élevée.

Le coefficient de Spearman reste très satisfaisant, surtout étant donné le nombre important de points.

Nous situant dans une optique de prévention, il est préférable de surestimer le ruissellement, plutôt que de ne pas prévoir de ruissellement alors qu'il survient en réalité.

L'efficacité de l'indicateur a été nettement améliorée et une efficacité de 0,62 peut être considérée comme acceptable mais doit pouvoir être améliorée en calibrant mieux les paramètres du modèle.

Tableau 20 : Comparaison des valeurs obtenues à l'aide des indices retenus pour les données de Limburg (Van Dijk, 2001) pour  $I_{Ru}$  et RUIS

	$I_{Ru}$	RUIS	Comparaison $I_{Ru}/RUIS$
<b>r</b>	0,685	0.689	Pas d'amélioration notable
<b>ME (mm)</b>	-1.94	6,70	Nette amélioration
<b>Efficacité</b>	0,62	0,02	Nette amélioration
<b>RMSE (mm)</b>	7,07	11,32	Amélioration
<b><math>r_s</math></b>	0,86	0,82	Amélioration sensible

## 2.2 Comparaison des sorties de $I_{RU}$ à des mesures réalisées à l'échelle de la parcelle agricole

Les mesures de ruissellement ont été réalisées en 2002 par l'Institut du Végétal sur le site pilote de Geispitzen, dans le but d'évaluer l'impact des techniques culturales simplifiées sur le ruissellement et le transfert de résidus.

Le ruissellement est mesuré sur une parcelle de 9 hectares occupant un versant de colline. Le sol y est essentiellement de type loessique ayant des teneurs en argile inférieures à 14%. Cependant la carte pédologique du site nous révèle la présence de plusieurs unités ayant des sensibilités potentielles au ruissellement différentes. En bas de pente notamment, nous trouvons des sols bruns colluvionnés dont les taux d'argile sont voisins de 20% et les taux de matière organique compris entre 2 et 2,5%.

Le ruissellement a été collecté durant la période qui va de la préparation du sol (01 avril 2002) à celle de la campagne suivante (31 mars 2003) : les mesures des volumes ruisselés sont réalisées après les principaux événements pluvieux. Nous n'avons cependant exploité que les mesures de ruissellement correspondant à la période qui va de la préparation du sol à la récolte car nous manquons d'informations concernant la période après récolte.

Nous avons procédé de plusieurs manières pour calculer le ruissellement : dans un premier temps nous avons considéré que la parcelle était homogène d'un point de vue pédologique, nous nous sommes placé dans les cas où la parcelle était uniquement constituée :

- du sol le plus sensible à la battance, présentant des teneurs en argile inférieures à 14% et des taux de matière organique de 1,5%,
- du sol le moins sensible à la battance avec des taux d'argiles de l'ordre de 20% et des teneurs en matière organique supérieures à 2%

Nous avons ensuite calculé le volume ruisselé au prorata de la surface réelle des différents types de sols. Il paraît en effet plus logique de procéder de cette façon car nous prenons en compte ainsi l'ensemble des sols qui constituent la parcelle. Si la pluie ou la lame d'eau ruisselante rencontre un sol moins sensible au ruissellement, nous pouvons supposer que le ruissellement global à l'échelle de la parcelle sera d'autant plus réduit que la surface de ce sol est importante.

Nous obtenons ainsi trois valeurs calculées de ruissellement que nous confrontons à la valeur mesurée (Tableau 21)

*Tableau 21 : Comparaison des sorties de l'indicateur aux valeurs mesurées sur parcelle sur le site de Geispitzen.*

	Ruissellement calculé ( $I_{RU}$ ) (mm)	Ruissellement mesuré (mm)
Sol le moins sensible à la battance	8,13	1,4
Sol le plus sensible à la battance	16,51	
Au prorata des surfaces des différents types de sols	11,10	

Même lorsque l'on se place dans la situation la plus favorable (sol le moins sensible au ruissellement), le ruissellement est largement surestimé par le calcul. Cette surestimation, qui n'était pas aussi importante dans le cas précédent, peut trouver une explication dans les conditions de mesures du ruissellement. Dans le cas de Lanser, le ruissellement était mesuré sur microparcelles or nous savons que cette technique de mesure conduit à une surestimation des volumes réellement ruisselés à l'échelle de la parcelle.

### 3 Discussion et utilisations possibles

Une des limites de l'indicateur est la prise en compte approximative de l'intensité des pluies alors qu'elle joue un rôle primordial dans le processus de déclenchement du ruissellement. Or cette donnée nécessiterait des mesures de terrain précises et répétées, ce qui va à l'encontre du principe de la méthode INDIGO<sup>®</sup> selon lequel l'exploitant ne doit pas être amené à réaliser de mesure pour calculer les indicateurs. Cette exigence de disponibilité et de facilité d'accès des données nous amène à faire des approximations qui peuvent être préjudiciables. Cependant, il est nécessaire de respecter ce principe car l'outil INDIGO<sup>®</sup> doit avant tout être **opérationnel**, ce qui nous oblige à faire des concessions.

L'aspect dynamique de l'indicateur  $I_{RU}$  calculé à la décade est intéressant et original. Toutefois, raisonner à l'échelle décadaire pour les raisons précitées, nous conduit encore une fois à des imprécisions. Nous l'avons vu, les mécanismes impliqués dans la genèse du ruissellement interviennent à l'échelle de temps de l'évènement pluvieux. Raisonner au pas de temps de la décade revient à assimiler la hauteur d'eau tombée au cours des dix jours à un évènement pluvieux. Nous n'avons pas d'informations concernant le régime des précipitations

or il est clair que 20 millimètres de pluie n'auront pas les mêmes conséquences sur la dégradation des EDS et sur le ruissellement s'ils tombent dans l'espace d'une heure ou s'ils sont répartis sur dix jours.

Par ailleurs, nous n'avons pas tenu compte de la capacité de stockage temporaire du sol, laquelle ne peut être raisonnée qu'à l'échelle de l'évènement pluvieux. Or il est probable que la surestimation du ruissellement provienne en partie de l'omission volontaire et légitime de ce facteur. L'eau retenue dans les dépressions du sol peut en effet s'infiltrer ou s'évaporer entre deux évènements. En raisonnant au pas de temps décadaire, nous ne pouvons tenir compte de ces mécanismes dans la construction de  $I_{RU}$ .

Nous n'avons pas pris en compte l'effet des éléments grossiers présents à la surface du sol. Ils jouent pourtant un rôle dans la protection des états de surface mais il est complexe et dépend de nombreux paramètres (forme, taille, enfoncement du caillou). En effet, selon que l'élément grossier est posé sur le sol ou incrusté dans celui-ci, il a des effets opposés sur le ruissellement. Dans le premier cas, il constitue, tout comme les résidus de culture, une rugosité pérenne et contribue à l'amélioration du potentiel d'infiltration tandis que dans le cas où l'élément est incrusté dans le sol il constitue une zone imperméable susceptible de générer du ruissellement. Nous ne disposons pas de suffisamment de données pour prendre en compte cette variable.

Nous l'avons évoqué dans la partie validation, l'éventualité d'un retour en F3 n'a pas été envisagée lors de la construction de l'indicateur, faute de temps et de sources de renseignement. Il serait important de corriger l'indicateur en établissant des règles de décisions supplémentaires concernant cette possibilité de retour à l'état fragmentaire du sol, susceptible de survenir lors de périodes de sécheresse.

# CONCLUSION GENERALE

Le ruissellement est le résultat d'une combinaison complexe de facteurs qui interagissent. Alors que certains ne sont pas maîtrisables, comme la texture du sol ou le régime des précipitations, il est possible d'agir sur d'autres. La couverture du sol par exemple, qui a pour effet de réduire le ruissellement, peut être raisonnée par l'exploitant sur les parcelles à risques. L'utilisation de techniques culturales simplifiées peut être une solution pour l'exploitant. En effet, de telles pratiques aurait un effet positif dans la réduction du ruissellement en augmentant le taux de résidus en surface, et en améliorant la stabilité structurale des sol.

Ceci reste cependant à démontrer, ce que tentera de faire Romain Armand, à l'occasion d'une thèse visant à évaluer l'impact des TCS sur le ruissellement. Il est question d'utiliser l'indicateur  $I_{RU}$  dans ce travail, notamment en tant qu'outil de prévision des états de surfaces du sol.

L'indicateur « Ruissellement » a été construit sous la haute contrainte de disponibilité des données, afin d'être facilement calculable et interprétable par les exploitants. S'il subsiste quelques imprécisions, liées aux impératifs que nous nous sommes fixés, l'outil n'est pas inutilisable pour autant. La validation a montré que l'indicateur, s'il a tendance à surestimer les volumes ruisselés, permet cependant d'identifier assez précisément les situations à risques.

$I_{RU}$  pourra également servir d'outil pédagogique destiné à sensibiliser les agriculteurs aux problèmes qui concernent la « ressource sol », un compartiment environnemental essentiel et qui reste pourtant au second plan par rapport à d'autres problématiques plus médiatisées telles que la qualité de l'eau.

$I_{RU}$  est calculé à l'échelle de la parcelle agricole. Il est question d'intégrer cet indicateur à l'échelle du bassin versant, qui paraît être l'échelle la plus appropriée à l'évaluation du ruissellement. Nous pouvons considérer que le bassin versant est formé de parcelles agricoles, unités élémentaires de calcul de  $I_{RU}$ . Pour évaluer la quantité d'eau ruisselée à l'exutoire du bassin versant, nous avons donc pensé calculer la moyenne des ruissellements produits par l'ensemble des parcelles constitutives du bassin versant, pondérée au prorata des surfaces de chaque parcelle. Cependant, encore une fois, l'échelle de la parcelle pose problème. Il faudrait raisonner non pas en terme de parcelle mais d'unités pédologiques et de chemins d'eau. En effet, la connectivité entre les parcelles n'est pas prise en compte par ce raisonnement. Cependant, même si les volumes d'eau ruisselés sont erronés, cette méthode peut s'avérer très intéressante pour comparer la sensibilité au ruissellement de différents bassins versant et établir des priorités d'action pour la mise en place de dispositifs de lutte contre le ruissellement.

A partir de  $I_{RU}$ , il est prévu de construire un autre indicateur, destiné à estimer la sensibilité d'un sol à l'érosion hydrique ( $I_{RE}$ ). L'indicateur ruissellement pourra également améliorer l'indicateur  $I_p$  qui évalue le risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires.



# **Bibliographie**

- Armand R., 2003. Risque de ruissellement des terres agricoles et Techniques Culturelles Simplifiées (TCS) : évaluation par les états de surface du sol. Application au suivi d'essais dans le Sundgau alsacien. Université Louis Pasteur, Strasbourg: 72 pp. + annexes.
- Auzet A. V., 1987. L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques. Ministère de l'Environnement et de l'Agriculture, CEREG, 60 pp.
- Auzet A.V., Boiffin J., Papy F., Maucorps J., et Ouvry J. F., 1990. An approach to the assessment of erosion forms and erosion risk on agricultural land in the northern Paris Basin, France. *In* Soil erosion on agricultural land Eds. Boardman J., Foster I.D.L. et Dearing J.A: 383-400.
- Bockstaller C. et Girardin P., 2002. Evaluer les systèmes de culture à l'aide d'indicateurs agri-environnementaux : la méthode INDIGO. Les Rencontres Annuelles du CETIOM: 54-58.
- Boiffin J. 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies: 320 pp.
- Boiffin J., Papy F. et Peyre Y., 1986. Systèmes de production, systèmes de culture et risques d'érosion dans le pays de Caux. *Agronomie*. 6: 437-446.
- Boiffin J., Papy F. et Eimberck M., 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*. 8: 663-673.
- Boiffin J. et Monnier G., 1991. Simplification du travail du sol et érosion hydrique. *Perspectives agricoles*: 24-30.
- Charollais M. et Schaub D., 1999. Erosion : test d'une clé d'appréciation du risque. *Revue suisse d'Agriculture*. 31: 33-38.
- Darboux F. 1999. Modélisations numérique et expérimentale du ruissellement. Effet de la rugosité sur les distances de transfert. *In* Géosciences. Université de Rennes : 170 pp.
- Flaitz V. 2003. Contribution à la mise au point d'un indicateur "Travail du sol" : élaboration des modules d'évaluation "Structure du sol" et "Ruissellement". UMR Nancy-Colmar, Colmar: 51 pp. + annexes.
- Gallien E., Le Bissonnais Y., Eimberck M. et Benkhadra H., 1995. Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol limoneux cultivé. *Les Cahiers de l'Agriculture*. 4: 171-183.
- Gascuel-Oudou C. and D. Heddadj 2000. Maîtrise des transferts de surface dans le contexte armoricain. *Bretagne Eau pure*: 108 pp.
- Joannon A. 2004. Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise de processus écologiques. Cas du ruissellement érosif dans les bassins versants agricoles du Pays de Caux, Haute-Normandie. Institut National Agronomique Paris-Grignon: 230 pp. + annexes.
- Larue, J.-P. 2001. La morphogenèse accélérée menace-t-elle les régions rurales de l'ouest du bassin parisien. *Géographie physique et Quarternaire*. 55: 1-16.
- Le Bissonnais Y. et Le Souder C., 1995. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et gestion des sols*. 2: 43-56.
- Le Bissonnais Y. et Papy F., 1997. Les effets du ruissellement et de l'érosion sur les matières en suspension dans l'eau: 303-322
- Le Bissonnais Y., 2002. L'érosion hydrique des sols en France. INRA-Ifen, Orléans, p. 96 pp.
- Lecomte V., Le Bissonnais Y., Renaux B., Couturier A. et Ligneau L., 1997. Erosion hydrique et transfert de produits phytosanitaires dans les eaux de ruissellement. *Cahiers Agricultures*. 6:p. 175-183.

- Lecomte V., 1999. Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Orléans: 213 pp. + annexes.
- Ludwig B., 1992. L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin Parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire. *In* UFR de Géographie. Université Louis Pasteur, Strasbourg: 201 pp.
- Martin P., 1997. Pratiques culturales, ruissellement et érosion diffuse sur les plateaux limoneux du nord ouest de l'Europe. Université Paris-Grignon, 184 pp. + annexes.
- Mosimann T. et Rüttiman M., 1996. Erosion : clé d'appréciation du risque. Service Romand de Vulgarisation Agricole, 27 pp.
- Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) Ed. ORSTOM-FAO: 331 pp.
- Scodro E., 2001. Appréciation du risque de ruissellement des sols cultivés à partir des états de surface du sol: 80 pp. + annexes.
- Stephan I., 2001. Mise au point d'un indicateur ruissellement RUIS: 28 pp. + annexes.

# **ANNEXES**

**ANNEXE I**

**Annexe 1 : Tableau de prédiction de l'infiltration issu du modèle STREAM**

**Infiltration (mm/h) en fonction des variables « Etats de surface », « Rugosité » et « Couvert végétal » (O. Cerdan, 2001)**

		4 Etat de surface			
5 Rugosité en cm	Taux de couvert végétal	6 F0	F11	F12	F2
		> 10	> 61	50	50
	31 - 60	20	20		
	< 30	50	50		
[5;10]	> 61	20	10		5
	31 - 60	50	20		10
	< 30	20	10		5
[2;3]	> 61	20	10		5
	31 - 60	20	10		5
	< 30	20	10		5
[1;2]	> 61	20	10	5	
	31 - 60	20	10	5	
	< 30	20	10	5	
[0;1]	> 61	50	20	10	5
	31 - 60	20	10	5	2
	< 30	10	5	2	2

## **Algorithme de programmation de $I_{RU}$**

## Présentation des variables

	Signification	Commentaire
<b>Variables entrées par l'utilisateur</b>		
<b>Cumul_pluie_decade</b>	Somme des précipitations durant la décade i (mm)	Données Météo France
<b>Cumul_pluie_total</b>	Somme des précipitations depuis le dernier travail du sol jusqu'à la décade i exclus (mm)	Données Météo France
<b>Orages</b>	Présence ou absence d'épisodes orageux au cours de la décade i	Données Météo France (intensité maximale des précipitations)
<b>Taux_MO</b>	Taux de matière organique dans le sol	Analyse de sol
<b>Traces_roues</b>	Pourcentage de la surface de la parcelle couverte par les traces de roues	Observé ou évalué à l'aide du tableau ? en fonction des travaux effectués
<b>Couvert_vegetal</b>	Pourcentage de la surface de la parcelle couverte par les végétaux vivants durant la décade i	Observé ou évalué à l'aide du tableau ? en fonction de la culture et de la date de semis
<b>Systeme_racinaire</b>	Type de système racinaire de la culture en place	Fasciculé ou pivotant
<b>Couvert_residus</b>	Pourcentage de la surface de la parcelle couverte par les résidus de récolte	Observé ou évalué à l'aide du tableau ? en fonction du précédent cultural et des travaux du sol
<b>Rugosite_init</b>	Classe de rugosité initiale après le dernier travail du sol	Déterminée à l'aide du tableau ? en fonction du type de travail du sol
<b>PF2_th</b>	Cumul de pluie théorique nécessaire pour atteindre le faciès F2 (mm)	Déterminé à l'aide du tableau ? en fonction de la texture du sol et de la date de semis
<b>PF1_th</b>	Cumul de pluie théorique nécessaire pour atteindre le faciès F1 (mm)	Egal au tiers de PF2_th
<b>Variables calculées</b>		
<b>Rugosité</b>	Classe de rugosité durant la décade i	
<b>Couvert_total</b>	Pourcentage de la surface de la parcelle couverte par les végétaux vivants et les résidus de récolte	
<b>f<sub>MO</sub></b>	Facteur correcteur du cumul de pluie nécessaire pour atteindre F2 lié à la teneur en matière organique du sol	
<b>f<sub>rés</sub></b>	Facteur correcteur du cumul de pluie nécessaire pour atteindre F2 lié à la présence de résidus de récolte en surface	
<b>f<sub>CV</sub></b>	Facteur correcteur du cumul de pluie nécessaire pour atteindre F2 lié au couvert végétal vivant	
<b>f<sub>R</sub></b>	Facteur correcteur du cumul de pluie nécessaire pour atteindre F2 lié à la rugosité du sol	
<b>f<sub>C</sub></b>	Facteur correcteur du coefficient de ruissellement maximum lié à la couverture du sol (végétaux vivants + résidus)	
<b>f<sub>F1,R</sub></b>	Facteur correcteur du coefficient de ruissellement maximum lié à l'état de surface du sol (Rugosité + Faciès) lorsque l'on se trouve en faciès F2	
<b>f<sub>F2,R</sub></b>	Facteur correcteur du coefficient de ruissellement maximum lié à l'état de surface du sol (Rugosité + Faciès) lorsque l'on se trouve en faciès F2	
<b>PF2</b>	Cumul de pluie corrigé nécessaire pour atteindre le faciès F2	
<b>PF1</b>	Cumul de pluie corrigé nécessaire pour atteindre le faciès F1	
<b>Facies_debut</b>	Faciès du sol atteint en début de décade i	
<b>Facies_fin</b>	Faciès du sol atteint en fin de décade i	
<b>CR_F1_max</b>	Coefficient de ruissellement maximum hors traces de roues lorsque l'on se trouve en faciès F1	
<b>CR_F2_max</b>	Coefficient de ruissellement maximum hors traces de roues lorsque l'on se trouve en faciès F2	
<b>CR_F1_hors_traces</b>	Coefficient de ruissellement corrigé hors traces de roues lorsque l'on se trouve en faciès F1	
<b>CR_F2_hors_traces</b>	Coefficient de ruissellement corrigé hors traces de roues lorsque l'on se trouve en faciès F2	
<b>CR_traces</b>	Coefficient de ruissellement sur traces de roues	

I <sub>Ru</sub>	Quantité d'eau ruisselée (mm)
-----------------	-------------------------------

\*\*\*\*\* Calcul du cumul de pluie nécessaire corrigé pour atteindre F2 (PF2) \*\*\*\*\*

**DEBUT**

**LIRE** Taux\_MO

**SI** Taux\_MO >= 3 **ALORS**

$f_{MO} = 1,5$

**FIN SI**

**SI** Taux\_MO >= 2,5 ET < 3 **ALORS**

$f_{MO} = 1,25$

**FIN SI**

**SI** Taux\_MO >= 2 ET < 2,5 **ALORS**

$f_{MO} = 1,10$

**FIN SI**

**SI** Taux\_MO < 2 **ALORS**

$f_{MO} = 1,00$

**FIN SI**

**LIRE** Couvert\_vegetal

**LIRE** Systeme\_racinaire

**SI** Systeme\_racinaire = " fasciculé " **ALORS**

**SI** couvert\_vegetal < 70% **ALORS**

$f_{CV} = 1$

**SINON**

$f_{CV} = 10000$

**FIN SI**

**FIN SI**

**SI** Systeme\_racinaire = " pivotant " **ALORS**

**SI** couvert\_vegetal < 30% **ALORS**

$f_{CV} = 1$

**SINON**

$f_{CV} = 10000$

**FIN SI**

**FIN SI**

**LIRE** Couvert\_residus

**SI** Couvert\_residus >= 65% **ALORS**

$f_{rés} = 0$

**FIN SI**

**SI** Couvert\_residus < 65% **ET** Couvert\_residus >= 30% **ALORS**

$f_{rés} = 1 + \text{Couvert\_residus}$

**FIN SI**

**SI** Couvert\_residus < 30% **ALORS**

$f_{rés} = 1$

**FIN SI**

**LIRE** Rugosite\_init

**SI** Rugosite\_init = "R4" **ALORS**

$f_R = 1,20$

**FIN SI**

**SI** Rugosite\_init = "R3" **ALORS**  
     $f_R = 1,15$

**FIN SI**

**SI** Rugosite\_init = "R2" **ALORS**  
     $f_R = 1,10$

**FIN SI**

**SI** Rugosite\_init = "R1" **ALORS**  
     $f_R = 1,05$

**FIN SI**

**SI** Rugosite\_init = "R0" **ALORS**  
     $f_R = 1$

**FIN SI**

**LIRE** PF2\_th

**FAIRE** PF2 =  $f_{MO} \times f_{CV} \times f_{rés} \times f_R \times PF2\_th$

**SI** PF2 > 1000 **ALORS**

**ECRIRE** "Pas d'évolution"

**SINON**

    PF2 = PF2

**FIN SI**

\*\*\*\*\* Calcul de la classe de rugosité en début de décade\*\*\*\*\*

**LIRE** Rugosite\_init

**LIRE** Cumul\_pluie\_total

**LIRE** Cumul\_pluie\_decade

**SELON QUE** Rugosite\_init = R4

**SI** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) < 100 **ALORS**

        Rugosite = Rugosite\_init

**FIN SI**

**SI** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) >= 100

**ET** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) < 150 **ALORS**

            Rugosite = R3

**FIN SI**

**SI** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) >= 150

**ET** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) < 200 **ALORS**

            Rugosite = R2

**FIN SI**

**SI** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) >= 200

**ET** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) < 250 **ALORS**

            Rugosite = R1

**FIN SI**

**SI** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) >= 250

        Rugosite = R0

**FIN SI**

**OU QUE** Rugosite\_init = R3

**SI** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) < 50 **ALORS**

Rugosite = Rugosite\_init

**FIN SI**

**SI** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) >=50

**ET** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) < 100 **ALORS**

Rugosite = R2

**FIN SI**

**SI** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) >= 100

**ET** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) < 150 **ALORS**

Rugosite = R1

**FIN SI**

**SI** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) >= 150 **ALORS**

Rugosite = R0

**FIN SI**

**OU QUE** Rugosite\_init = R2

**SI** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) < 50 **ALORS**

Rugosite = Rugosite\_init

**FIN SI**

**SI** Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade >=50

**ET** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) < 100 **ALORS**

Rugosite = R1

**FIN SI**

**SI** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) >= 100 **ALORS**

Rugosite = R0

**FIN SI**

**OU QUE** Rugosite\_init = R1

**SI** (Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade) < 50 **ALORS**

Rugosite = Rugosite\_init

**SINON**

Rugosite = R0

**FIN SI**

**OU QUE** Rugosite\_init = R0

Rugosite = Rugosite\_init

**FIN SELON QUE**

\*\*\*\*\* Détermination du faciès au début et à la fin de la décade\*\*\*\*\*

**LIRE** Cumul\_pluie\_total

**SI** PF2 <> "Pas d'évolution" **ALORS**

**SI** Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade < PF1 **ALORS**

Facies\_debut = F0

**FIN SI**

**SI** Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade >= PF1

**ET** Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade < PF2 **ALORS**

Facies\_debut = F1

**FIN SI**

**SI** Cumul\_pluie\_total – Cumul\_pluie\_decade >= PF2 **ALORS**

Facies\_debut = F2

**FIN SI**

**SI** Cumul\_pluie\_total < PF1 **ALORS**

Facies\_fin = F0

**FIN SI**

**SI** Cumul\_pluie\_total >= PF1 **ET** Cumul\_pluie\_total < PF2 **ALORS**

Facies\_fin = F1

**FIN SI**

**SI** Cumul\_pluie\_total >= PF2 **ALORS**

Facies\_fin = F2

**FIN SI**

**FIN SI**

**SI** PF2 = "Pas d'évolution" **ALORS**

Facies = Facies (décade précédente)

**FIN SI**

\*\*\*\*\* Détermination du coefficient de ruissellement hors traces de roues\*\*\*\*\*

**LIRE** Orage

**SI** Orages = "Non" **ALORS**

CR\_F1\_max = 0,02

CR\_F2\_max = 0,25

**FIN SI**

**FIN SI**

**SI** Orages = "Oui" **ALORS**

CR\_F1\_max = 0,12

CR\_F2\_max = 0,50

**FIN SI**

**SELON QUE** Rugosite = R4

**SI** Orages = "Oui" **ALORS**

$f_{F1,R} = 0,50$

$f_{F2,R} = 0,50$

**FIN SI**

**OU QUE** Rugosite = R3 **OU** Rugosite = R2

**SI** Orages = "Oui" **ALORS**

$f_{F1,R} = 0,50$

$f_{F2,R} = 0,70$

**FIN SI**

**SI** Orages = "Non" **ALORS**

$f_{F1,R} = 0$

$f_{F2,R} = 0,20$

**FIN SI**

**OU QUE** Rugosite = R1

**SI** Orages = "Oui" **ALORS**

$f_{F1,R} = 1$

$f_{F2,R} = 1$

**FIN SI**  
**SI** Orages = "Non" **ALORS**  
 $f_{F1,R} = 0$   
 $f_{F2,R} = 1$

**FIN SI**

**OU QUE** Rugosite = R0  
 $f_{F1,R} = 1$   
 $f_{F2,R} = 1$

**FIN SELON QUE**

**LIRE** Couvert\_vegetal

**LIRE** Couvert\_residus

**FAIRE** Couvert\_total = Max(Couvert\_residus ; Couvert\_vegetal)

**FAIRE**  $f_C = 1 - (\text{Couvert\_total}/2)$

**FAIRE** CR\_F1\_Hors\_traces =  $f_C \times f_{F1,R} \times \text{CR\_F1\_max}$

**FAIRE** CR\_F2\_Hors\_traces =  $f_C \times f_{F2,R} \times \text{CR\_F1\_max}$

\*\*\*\*\* Détermination du coefficient de ruissellement sur traces de roues\*\*\*\*\*

**LIRE** Orages

**SI** Orages = "Oui" **ALORS**

CR\_traces = 0.50

**SINON**

CR\_traces = 0.10

**FIN SI**

\*\*\*\*\* Détermination du ruissellement total ( $I_{Ru}$ ) sur la parcelle durant la décade\*\*\*\*\*

**LIRE** Cumul\_pluie\_decade

**LIRE** Cumul\_pluie\_total

**LIRE** Traces\_roues

**SI** Facies\_debut = Facies\_fin **ALORS**

**SI** Facies\_debut = F0 **ALORS**

$I_{Ru} = \text{Cumul\_pluie\_decade} \times \text{Traces\_roues} \times \text{CR\_traces\_roues}$

**FIN SI**

**SI** Facies\_debut = F1 **ALORS**

$I_{Ru} = \text{Cumul\_pluie\_decade} \times [(1 - \text{Traces\_roues}) \times \text{CR\_F1\_hors\_traces}$   
 $+ \text{Traces\_roues} \times \text{CR\_traces\_roues}]$

**FIN SI**

**SI** Facies\_debut = F2 **ALORS**

$I_{Ru} = \text{Cumul\_pluie\_decade} \times [(1 - \text{Traces\_roues}) \times \text{CR\_F2\_hors\_traces}$   
 $+ \text{Traces\_roues} \times \text{CR\_traces\_roues}]$

**FIN SI**

**FIN SI**

**SI** Facies\_debut <> Facies\_fin **ALORS**

**SI** Facies\_debut = F0 **ET** Facies\_fin = F1 **ALORS**

$$I_{Ru} = (\text{Cumul\_pluie\_total} - \text{PF1}) \times (1 - \text{Traces\_roues}) \times \\ \text{CR\_F1\_hors\_traces} + \text{Cumul\_pluie\_decade} \times \text{Traces\_roues} \times \\ \text{CR\_traces\_roues}$$

**FIN SI**

**SI** Facies\_debut = F1 **ET** Facies\_fin = F2 **ALORS**

$$I_{Ru} = (1 - \text{Traces\_roues}) \times [(\text{Cumul\_pluie\_total} - \text{PF2}) \times \\ \text{CR\_F2\_hors\_traces} + (\text{Cumul\_pluie\_decade} - \\ (\text{Cumul\_pluie\_total} - \text{PF2})) \times \text{CR\_F1\_hors\_traces}] + \\ \text{Cumul\_pluie\_decade} \times \text{CR\_traces\_roues} \times \text{Traces\_roues}$$

**FIN SI**

**FIN SI**

**FIN**