

**Evaluation et adaptation des systèmes de culture pour réduire la
sensibilité potentielle des sols à l'érosion en Alsace**

Mémoire de fin d'études

*Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Agriculture
Spécialité Agronomie et Territoire*



Christine ROSENFELDER

153^{ième} promotion

2013 - 2014

Tuteur de stage : Olivier Scheurer

Maître de stage : Paul van Dijk

Résumé

Titre : Evaluation et adaptation des systèmes de culture pour réduire la sensibilité potentielle des sols à l'érosion en Alsace.

L'érosion des sols et les coulées d'eaux boueuses sont des phénomènes connus en Alsace, liés au climat, à la topographie, au sol et à son occupation. Pour limiter le risque d'érosion, les principaux objectifs dans cette étude sont de (a) caractériser la sensibilité des systèmes de culture au risque d'érosion à travers des indicateurs liés à la stabilité structurale du sol et à son exposition aux forces érosives, (b) identifier les systèmes les plus sensibles aux risques d'érosion et de trouver des systèmes de culture alternatifs permettant de réduire la sensibilité à l'érosion à un niveau inférieur. Le travail mobilise trois sources de données : le Registre Parcellaire Graphique (RPG), le Référentiel Régional Pédologique (RRP) de la région Alsace et la base de données sur les pratiques agricoles issue des enquêtes Agri-Mieux. Trois phases de travail sont nécessaires pour répondre à la problématique : la caractérisation des combinaisons « systèmes de culture – sols » présents sur le territoire (mobilisation de l'outil RPG Explorer, de la base de données Agri-Mieux et du RRP), la simulation de l'état organique du sol, pour ces systèmes (outil Simeos-AMG) et enfin le diagnostic de la sensibilité à l'érosion des systèmes de culture sélectionnés à l'aide des indices d'érodibilité et d'exposition de la surface. L'approche a permis d'identifier et cartographier les situations agronomiques à sensibilité à l'érosion élevée. Des systèmes de culture alternatifs permettant de réduire cette sensibilité ont été conçus en concertation avec des conseillers agricoles et une évaluation multicritère a été effectuée. Ce travail est lié au projet ABC-Terre qui vise à réduire les émissions des gaz à effets de serre d'origine agricole à travers du stockage de carbone organique dans les sols agricoles en fonction des systèmes de culture.

Mots clés : érosion des sols, systèmes de culture, RRP, RPG, Simeos-AMG, indicateur, érodibilité, carbone organique.

Title: Evaluation and adaptation of cropping systems to reduce the potential erosion sensitivity of soils in Alsace.

Soils erosion and muddy flows are well-known phenomena in the Alsace. They are the results of a combination of factors related to climate, relief, soils and land use. To limit soil erosion sensitivity, the objectives of this study are (a) to characterize the cropping system sensitivity to erosion through indicators related to soil structural stability and to the exposition of the soil surface of erosive forces, and (b) to find alternatives for cropping systems which identified as being most sensitive. The work mobilizes three data sources: the graphic agricultural parcel registry data (RPG), the Alsatian soil database (RRP), and the database of agricultural practices in the Alsace called BD Agri-Mieux. The study can be divided into three main steps: (1) characterization of existing "cropping system-soil type combinations" in the study areas (using a tool called RPG Explorer in combination with the BD-Agri-Mieux and the RRP), (2) simulation of the organic carbon content for each cropping system-soil type combination using the tool Simeos-AMG, and (3) determination of soil erosion sensitivity for each cropping system using two indicators: soil erodibility and exposition of the soil surface. The approach has allowed for the identification and mapping of agronomical situations leading to a high erosion sensitivity. In collaboration with farmers' advisors, alternative cropping systems were conceived and evaluated for a selection of some typical sensitive situations. This work focuses on organic carbon storage in agricultural soils as a function of cropping systems. It is part of a project called ABC-Terre which aims at reducing the emission of greenhouse gases of agricultural origin.

Key words: soil erosion, cropping systems, RRP, RPG, Simeos-AMG, indicator, erodibility, organic carbon

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage, Paul van Dijk, docteur en géographie physique, de m'avoir confié ce travail ; pour son soutien, ses conseils, le partage d'expérience et l'intérêt qu'il a pu porter à ce projet. Enfin, je le remercie de m'avoir fait confiance dans les diverses missions réalisées lors de ces six mois de stage.

Je remercie Olivier Scheurer, enseignant chercheur en sciences du sol à l'Institut LaSalle Beauvais, tuteur de ce stage, pour l'attention qu'il a portée à la bonne réalisation de mon stage et pour ses conseils.

Je remercie également Annie Duparque (membre du RMT Sols et Territoires), Claire Chenu (Professeur responsable de l'UFR BISE AgroParisTech), Ludivine Mata (ingénieur d'étude SAGA) et Nicolas Piskiewicz (programmeur informatique), qui ont contribué à cette étude et ont permis d'avancer le projet à grands pas.

Je remercie aussi toute l'équipe de l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace, Rémi Koller (directeur de l'ARAA, ingénieur agronome), Joëlle Sauter (ingénieur agronome), Anne Schaub (docteur ingénieur en agronomie), Anne-Marie Barthelmé (assistante de direction), Olivier Rapp (assistant ingénieur), Camille Fonteny (ingénieur agronome) pour leur aide et leur soutien ainsi que leur disponibilité durant ces six mois.

Merci aux conseillers de la Chambre d'Agriculture Régionale d'Alsace, pour leur recommandation et disponibilité tout au long de ce projet, Blandine Fritsch, Claire Cugnière, Hélène Lebas, François Alves, Remy Michael, Pierre Geist, ainsi que Aimé Blatz, technicien de recherche de l'INRA.

Des remerciements moins studieux à l'ensemble de l'équipe Agriculture Durable de l'INRA de Colmar, avec qui le quotidien a été très agréable.

Enfin, un grand merci aux personnes qui m'ont entourée pendant ces derniers jours de rédaction.

Table des matières

Table des matières.....	4
Table des illustrations	6
Liste des abréviations, symboles et unités	8
Glossaire.....	10
Introduction.....	11
1. Contexte et problématique	12
1.1. Constat en Alsace	12
1.2. Objectifs du stage.....	13
1.3. Contexte du stage et structure d'accueil	13
1.3.1. Le projet ABC Terre	13
1.3.2. Présentation de l'ARAA	14
2. Etat des connaissances sur l'érosion.....	16
2.1. L'érosion	16
2.1.1. Les principes fondamentaux de l'érosion des sols	16
2.1.2. Les différentes formes d'érosion	17
2.2. Erodibilité des sols et rôle de la matière organique	18
2.2.1. Relation de la stabilité structurale avec les comportements physiques et l'état organique du sol	19
2.2.2. La matière organique des sols et le stockage du carbone	20
2.3. Incidence du système de culture sur la dynamique des matières organiques du sol.....	22
3. Erosion des sols agricoles en Alsace	24
3.1. Contexte de l'agriculture en Alsace	24
3.2. Secteurs à risques potentiels d'érosion	26
3.3. Facteurs mis en cause.....	27
3.4. Actions de lutte contre l'érosion des sols	28
4. Matériel et méthode	29
4.1. Choix du territoire et caractérisation	29
4.1.1. Choix des territoires d'étude.....	29
4.1.2. Le Sundgau	29
4.1.3. Le Kochersberg et vallée de la Zorn	29
4.2. Schéma méthodologique	30
4.3. RPG Explorer : Caractérisation des systèmes de culture	33
4.3.1. Principe de RPG Explorer.....	33
4.3.2. Données d'entrées de RPG Explorer	35
4.4. Simeos-AMG : Simulation de l'état organique du sol	37
4.4.1. Principe de Simeos-AMG	37
4.4.2. Données d'entrées	37

4.5.	Diagnostic de la sensibilité des systèmes de cultures à l'érosion	41
4.5.1.	Indice d'érodibilité ($I_{\text{érod}}$)	42
4.5.2.	Indice d'exposition (I_{expo})	44
4.5.3.	Combinaison des indices d'érodibilité et d'exposition : Indice de sensibilité potentielle à l'érosion (I_{spe})	49
4.6.	Conception de systèmes de culture alternatifs	50
4.7.	Analyse multicritère	51
5.	Résultats	52
5.1.	Rotations de culture pour les différents types d'exploitation	52
5.2.	Stocks et teneurs en carbone organique.....	52
5.3.	Indices d'érodibilité et d'exposition combinés.....	54
5.4.	Cartographie de l' I_{spe}	56
5.5.	Systèmes de culture ayant un I_{spe} élevé pour les deux secteurs	57
5.5.1.	Systèmes de culture ayant un risque élevé à l'érosion	57
5.5.2.	Comparaison des résultats pour les systèmes de culture alternatifs à l'érosion	61
6.	Discussion	64
7.	Conclusion et perspectives	66
	Liste des références bibliographiques	67
	Annexes.....	75
	Annexe A : Carte de la sensibilité à l'érosion en Alsace	75
	Annexe B : Les différentes étapes du projet ABC'Terre	76
	Annexe C : Petits Domaines Morphologiques (PDM) de la carte des sols d'Alsace.....	77
	Annexe D : Carte simplifiée des sols du Sundgau	78
	Annexe E: Cartes des sols de Ferti-Kochersberg et Ferti-Zorn	79
	Annexe F : Nomenclature des cultures pour RPG	80
	Annexe G : Tableau des contraintes et valeurs agronomiques des précédents/suivants.....	81
	Annexe H : Les différents indices concernant la stabilité structurale	83
	Annexe I : La grille de mesure anti-érosion	88
	Annexe J : Simulations Simeos-AMG	91
	Annexe K : RPG Explorer : rotations de culture en fonction du type d'EA.....	92
	Annexe L : Carte du secteur Ferti-Zorn et Ferti-Kochersberg de la sensibilité potentielle l'érosion des systèmes de culture	93
	Annexe M : Cartes du secteur du Sundgau de la sensibilité potentielle l'érosion des systèmes de culture	94

Table des illustrations

Figures :

Figure 1: Formation de la croûte de battance.....	17
Figure 2: Organisation des formes d'érosion dans le bassin versant.....	18
Figure 3: Problématique du stockage de carbone dans un agro-écosystème	21
Figure 4: Rôles des matières organiques.....	22
Figure 5: Carte des orientations agricoles dominantes des communes d'Alsace en 2010	25
Figure 6: Carte de la fréquence des coulées boueuses en Alsace.....	26
Figure 7: Sensibilité à l'érosion selon la méthode Mesales.....	27
Figure 8: Composition d'une UCS en UTS pour décrire un pédopaysage	41
Figure 9: Indice d'érodibilité en fonction du pourcentage de matière organique et sensibilité aux textures du sol selon la classification GEPPA	43
Figure 10: Coefficients d'Angot obtenus pour les deux secteurs d'étude	45
Figure 11: Facteur décrivant l'effet de la couverture végétale sur l'érosion (fc) en fonction de la part de la surface couverte par la végétation (c) et la culture	46
Figure 12: Exemple de fc par décade pour 4 cultures et une précocité de semis moyenne	46
Figure 13: L'indice d'exposition (décades 10 à 20, et conditions climatiques du secteur FKFZ) pour les cultures individuelles dont les couvertures sont renseignées dans INDIGO®	47
Figure 14: Exemple du fonctionnement de l'équation Ctot pour le calcul de la couverture totale composée de plusieurs couverts.....	49
Figure 15: Couvert par les résidus de maïs grain en système sans labour. Exemple de sortie de l'indicateur de ruissellement de l'ARAA (Van Dijk et al., en prép.).....	49
Figure 16: Combinaison des indices d'érodibilité et d'exposition pour le secteur de FKFZ.....	50
Figure 17: Stock à l'équilibre - Stock à l'état initial en Corg pour les différentes situations agronomiques dans le secteur FKFZ.....	52
Figure 18: Teneur à l'équilibre - teneur à l'état initial en Corg pour les différentes situations agronomiques dans le secteur FKFZ.....	53
Figure 19: Stock à l'équilibre - stock à l'état initial en carbone organique pour les différentes situations agronomiques dans le secteur SEV.....	53
Figure 20: Teneur à l'équilibre - teneur à l'état initial en carbone organique pour les différentes situations agronomiques dans le secteur SEV.....	54
Figure 21: Sensibilité potentielle à l'érosion des différentes situations agronomiques pour FKFZ.....	54
Figure 22: Sensibilité potentielle à l'érosion des différentes situations agronomiques FKFZ en prenant en compte les textures du sol (classification type GEPPA)	55
Figure 23: Sensibilité potentielle à l'érosion des différentes situations agronomiques dans le Sundgau	55
Figure 24: Sensibilité potentielle à l'érosion des différentes situations agronomiques dans le Sundgau en prenant en compte les textures du sol (classification type GEPPA) pour SEV	56
Figure 25: Rotations de culture initiale et alternative pour CM	57
Figure 26: Rotations de culture initiale et alternative pour CI.....	58
Figure 27: Rotations de culture initiale et alternative pour EH	58
Figure 28: Iexpo en fonction du système de culture et du type d'exploitation agricole	61
Figure 29: Ierod en fonction du système de culture et du type d'exploitation agricole.....	61
Figure 30: Comparaison du pourcentage de réduction des Ispe pour les systèmes alternatifs comparés au système initial.....	63
Figure 31: Comparaison des Ispe en fonction du SdC et du type d'EA	63
Figure 32: Annexe A: Carte de la sensibilité à l'érosion en Alsace	75
Figure 33: Annexe B: Les différentes étapes du projet ABC Terre	76
Figure 34: Annexe C: Petits Domaines Morphologiques d'Alsace	77
Figure 35: Annexe D: Carte simplifiée des sols du Sundgau.....	78

Figure 36: Annexe E: Carte des sols de Ferti-Kochersberg.....	79
Figure 37: Annexe E: Carte des sols de Ferti-Zorn.....	79
Figure 38: Annexe L: Cartographie Ispe FKfZ.....	93
Figure 39: Annexe M: Ispe SEV.....	94
Figure 40: Annexe M: Ierod SEV.....	95
Figure 41: Annexe M: Iexpo SEV.....	95

Tableaux :

Tableau 1: Exemples d'interaction texture-matière organique sur la stabilité structurale (d'après Monnier et Stengel, 1982).....	20
Tableau 2: Un relief structurant pour l'activité agricole	24
Tableau 3: Type d'exploitation identifiée pour FKfZ.....	36
Tableau 4: Type d'exploitation identifiée pour SEV	36
Tableau 5: Données d'entrées pour Simeos-AMG par culture principale concernant la restitution des résidus, l'introduction de culture intermédiaire et les rendements des cultures	39
Tableau 6: Type, dose et paramètres du modèle pour la matière organique	39
Tableau 7: Fréquence des MO en fonction de la culture et du type d'EA pour le secteur SEV	40
Tableau 8: Fréquence des MO en fonction de la culture et du type d'EA pour le secteur FKfZ.....	40
Tableau 9: Classement des sols en fonction de leur sensibilité à l'érodibilité.....	43
Tableau 10: Valeurs du coefficient structural, b, par culture. Ces valeurs ont été déterminées en s'appuyant sur la littérature et complétées par expertise (ARAA)	46
Tableau 11: Quelques exemples de l'indicateur d'exposition à l'échelle de la rotation (conditions climatiques FKfZ).....	48
Tableau 12: Comparaison des résultats d'une simulation de Simeos-AMG en labour systématique et non labour	51
Tableau 13 : Surfaces totales et surfaces ayant un Ispe élevé pour les types d'EA de FKfZ.....	57
Tableau 14: Surfaces totales et surfaces ayant un Ispe élevé pour les types d'EA de SEV	58
Tableau 15: Données issues des sorties des simulations avec l'outil Stephy pour les différents SdC..	59
Tableau 16: Définition des indicateurs Stephy.....	59
Tableau 17: Ispe du système de culture initial et les systèmes alternatifs pour les 3 types d'EA	62
Tableau 18: Rappel des rotations à risque pour chaque type d'EA	62
Tableau 19: Comparaison des Ispe initiaux aux situations alternatives	62
Tableau 20: Annexe F: Nomenclature des cultures pour RPG	80
Tableau 21: Annexe G : Tableau des contraintes et valeurs agronomiques des précédents/suivants.	81

Liste des abréviations, symboles et unités

ARAA : Association pour la Relance Agronomique en Alsace
ASP : Agence de Services et de Paiements
BDAT : Base de Données Analyse des Terres
BDD : Base De Données
CEC : Capacité d'Echange Cationique
CEB : Coulées d'Eau Boueuse
CI : Culture Industrielle
CIPAN : Culture Intermédiaire Piège à Nitrates
Corg : Carbone Organique
Da : Densité apparente
EA : Exploitation Agricole
ETP : Evapotranspiration
GEPPA : Groupe d'Etude pour les Problèmes de Pédologie Appliquée
FKFZ : l'emprise de l'ensemble des opérations Agri-Mieux du Ferti-Kochersberg et Ferti-Zorn
IFT : Indice de Fréquence des Traitements
IGCS : Inventaire Gestion et Conservation des Sols
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
MO : Matières Organiques
MS : Matière Sèche
PAC : Politique Agricole Commune
PDM : Petit Domaine Morphologique
PRN : Petite Région Naturelle
RGA : Recensement Général Agricole
RMT : Réseau Mixte Technologique
RPG : Registre Parcellaire Graphique
RRP : Référentiel Régional Pédologique
SAU : Surface Agricole Utile
SdC : Système de Culture
SEV : l'emprise de l'opération Agri-Mieux Sundg'eau Vive (Sundgau)
SIG : Système d'Information Géographique
SIMEOS-AMG : Outil de SIMulation de l'Etat Organique des Sols
STH : Surface Toujours en Herbe
UCS : Unité Cartographique des Sols
UGB : Unité Gros Bétail
USLE : Universal Soil Loss Equation
UTS : Unité Typologique des Sols

Abréviations spécifiques aux cultures :

Mgr : Maïs grain
Me : Maïs ensilage
BS : Betterave sucrière
OP : Orge de printemps
PP : Prairies permanentes

Classification GEPPA (texture des sols) :

A : Argileux

Al : Argile limoneuse

L : Limon

La : Limon argileux

LAS : Limon Argilo-sableux

LL : Limon pur

Ls : Limon sableux

LSa : Limon Sablo-argileux

S : Sableux

Glossaire

Battance du sol : La battance traduit la sensibilité des sols à la fermeture de la porosité, formant une croûte superficielle qui colmate la surface du sol et réduit l'infiltration des précipitations (Le Bissonnais et al., 2005).

Coulée d'eau boueuse : écoulements fluides ou crues turbides à fortes charges en matières en suspension où les matériaux sources correspondent aux sols pédologiques, et où les particules détachées sous l'action des pluies et/ou ruissellement sont entraînées par l'écoulement d'eau de surface, diffus ou concentrées dans des rigoles et ravines (Auzet et al, 2005).

Erodibilité (définition retenue pour ce rapport) : Exprime l'aptitude d'un sol à être érodé ; elle dépend de la matière organique, la texture, la présence des cailloux, la structure et la perméabilité du sol (Wischmeier et Smith, 1978); la notion de l'érodibilité intègre l'ensemble des facteurs qui déterminent l'aptitude d'un sol à générer du ruissellement ainsi que sa résistance à l'arrachement et au transport des particules (Van Dijk, 2001).

Erosion des sols : Action par laquelle divers éléments constituant les horizons superficiels de la couverture pédologique sont enlevés par le vent, la pluie, les rivières, les glaciers, ce qui peut être favorisé par certaines actions de l'homme consistant à supprimer la végétation couvrant la surface du sol. Les facteurs principaux sont : la végétation, la couverture pédologique, la géomorphologie (pentes en particulier) et les impacts de l'utilisation des sols par l'homme. Il y a plusieurs types d'érosion : hydrique en rigole, hydrique en ravin (ravinement), hydrique en nappe, fluviale, glaciaire et éolienne. L'ensemble des types d'érosion a pour effet d'aplanir les montagnes et collines en éliminant en permanence la couverture pédologique qui se construit à partir des matériaux géologiques sous-jacents. Ces matériaux sont emmenés vers la mer où ils se déposent. Ces dépôts, pédologiques, constitueront ultérieurement les sédiments géologiques (Girard, 2014).

Matière organique : Les matières organiques du sol sont des constituants organiques vivants ou morts, d'origine animale, végétale ou microbienne, transformés ou non et remplissent de nombreuses fonctions. Les matières organiques possèdent différentes formes de composés, mais peuvent être regroupées en deux fractions : une fraction stable (l'humus), dont le temps de résidence dans le sol est de l'ordre de 25 ans, voire plus, et une fraction active, ou labile, dont le renouvellement est annuel. Par ailleurs, le carbone en est l'élément majoritaire (50%), suivi de l'oxygène (40%), de l'hydrogène (5%), de l'azote (4%) et du soufre (1%) (Chenu et Balabane, 2001).

Situation agronomique (dans ce rapport) : c'est la combinaison entre un type d'exploitation agricole, une rotation de culture et un type de sol.

Stabilité structurale: capacité d'un sol à conserver son arrangement entre particules solides et vides lorsqu'il est exposé à différentes contraintes comme l'action désagrègent de goutte de pluie ou l'humectation (Le Bissonnais et al., 1996).

Système de culture : « un système de culture est l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles cultivées de manière identique. Chaque système se définit par : la nature des cultures et leur ordre de succession, les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés. » (Sebillote, 1990)

Introduction

Les phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols agricoles sont connus et anciens dans la région d'Alsace. Ces phénomènes sont à l'origine des *coulées d'eaux boueuses* qui deviennent une actualité récurrente dans la région. Ces coulées d'eaux boueuses sont de plus en plus fréquentes et génèrent davantage de dommages à l'environnement agricole et urbain (Auzet, 1987).

Plusieurs techniques existent et ont déjà été étudiées pour réduire les problèmes liés à l'érosion des sols en Alsace. L'évaluation de l'impact des fascines sur le transfert des sédiments érodés a été le sujet de plusieurs études récentes dans la région (Pacevicus, 2008 ; Dumas, 2009). Aussi, les techniques culturales sans labour (TCLS) font l'objet de plusieurs études depuis de nombreuses années (Van Dijk et al., 2008). Des zones d'action prioritaires ont été ciblées, notamment grâce à une cartographie des zones à risque d'érosion et de coulées d'eau boueuse réalisée par l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace.

Un levier d'action prometteur mais pas encore abordé dans les études, serait de modifier les *systèmes de culture* présentant une sensibilité élevée à l'érosion. Ces modifications de systèmes de culture peuvent diminuer la sensibilité à l'érosion à travers deux effets principaux : (a) la diminution de l'*érodibilité du sol* en améliorant son état humique qui renforce la *stabilité structurale* et (b) la diminution de l'exposition de la surface du sol aux forces érosives en augmentant la couverture par les résidus des cultures et/ou les cultures même, notamment durant les périodes à précipitations fortes et intensives.

Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet ABC' Terre : « Atténuation du Bilan de gaz à effet de serre et stockage de Carbone organique dans les sols agricoles à l'échelle d'un Territoire ». Il a pour objet la réalisation et l'adaptation des systèmes de culture pour réduire la sensibilité potentielle des sols à l'érosion en Alsace.

Le mémoire présente le travail réalisé pour cette tâche particulière du projet ABC' Terre. Les trois premières parties exposent les notions nécessaires à la compréhension du sujet et l'état des lieux des connaissances actuelles. La quatrième partie présente le territoire d'étude, les outils et les données utilisés ainsi que les choix méthodologiques et les hypothèses impliquées. Les résultats sont présentés dans une cinquième partie. Enfin, une phase de discussion et de propositions est développée à la fin de l'étude.

1. Contexte et problématique

1.1. Constat en Alsace

Les *coulées d'eaux boueuses (CEB)*¹ se produisent lorsqu'un ruissellement important entraîne les particules et agrégats arrachés à la surface du sol, notamment par l'impact des gouttes de pluie. Une *érosion* forte des sols s'ensuit, jusqu'à former un torrent boueux. Le ruissellement est généralement la conséquence d'un défaut d'infiltration lors d'une précipitation plus ou moins longue et/ou intense. Ce défaut d'infiltration peut être causé par une saturation du sol en eau, ou parce que la vitesse d'infiltration dans le sol ne permet pas l'absorption de la précipitation selon son intensité.

Le type de sol, son état de surface et le taux de saturation en eau du sol, sont des facteurs favorisant l'érosion en cas de ruissellement. L'érosion, qu'elle soit diffuse ou marquée dans les zones de ruissellement concentré, formera une coulée d'eau boueuse, dont l'arrivée à la sortie du bassin versant² peut être lourde de conséquences lorsque l'exutoire est urbanisé.

En Alsace, plusieurs zones sont touchées par l'érosion des sols et les coulées d'eaux boueuses suite à des événements climatiques sévères. Chaque année de nouvelles zones sont affectées (DREAL Alsace, 2014). Plusieurs facteurs sont responsables de ce phénomène :

- Le climat : la région est caractérisée par des pluies d'orages atteignant des intensités pluviométriques très élevées. Il n'est pas rare d'observer des pluies dépassant 30 mm en moins de 30 minutes (intensité moyenne supérieure à 60 mm/h).
- La topographie : les collines de la région (en dehors de la plaine rhénane) constituent de véritables entonnoirs collecteurs d'eau. Or, la plupart des villages se situent en contrebas de ces flancs de collines, sur le parcours naturel d'écoulement des eaux de ruissellement.
- Le sol : les zones à risques sont caractérisées par de faibles taux en matières organiques, des sols du type limoneux avec une faible teneur en argile, augmentant l'érodibilité et diminuant la stabilité structurale.
- L'occupation des sols : les cultures printanières (maïs, betteraves,...) occupent une large surface dans la région durant ces périodes. Les sols sont alors nus ou très peu couverts, ameublés par les travaux de préparation de semis. L'importance des surfaces sensibles à l'érosion et le ruissellement favorisent la formation de CEB lors de pluies intenses.

Dans ce contexte, la mise en place de mesures pour limiter des catastrophes naturelles, l'action concertée de nombreux intervenants du paysage agricole ou urbain est requise (Chambre d'Agriculture Région Alsace, 2009).

Les enjeux menacés par ces coulées sont multiples (patrimoine agricole, infrastructures urbaines, routes, vies humaines...), et les dégâts représentent un coût important en matière de réparation, indemnisation, etc. De nombreux acteurs (élus, exploitants agricoles, habitants...) sont donc concernés par ces phénomènes. Compte tenu de ces enjeux, la prévention des coulées d'eaux boueuses et la protection contre les dommages sont devenues des priorités.

Une cartographie a été réalisée en 2007 permettant de cibler les zones à risques prioritaires d'érosion à l'échelle du département ou de la région. Cette cartographie a été établie par l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace à la demande de la Direction Régionale Environnement Alsace et les deux Conseils Généraux du Bas-Rhin et du Haut-Rhin (DREAL Alsace, 2014).

« Les finalités de cette cartographie sont alors :

- l'élaboration d'un zonage objectif pour un diagnostic départemental et régional et qui répond aux

¹ Les mots en italique dans le texte sont définis dans le glossaire.

² Le bassin versant peut être considéré comme un " système", c'est une surface élémentaire hydrologiquement close, c'est-à-dire qu'aucun écoulement n'y pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire.

exigences législatives (décret n° 2005-117 du 12 février 2005) ;

- l'amélioration de la cohérence des actions de prévention de l'érosion et des coulées d'eaux boueuses sur le territoire alsacien ;

- la prise de conscience de l'étendue des zones à risque sur le territoire, constituant une information complémentaire aux données issues des dossiers CatNat (procédure nationale de reconnaissance en Catastrophe Naturelle). » (DREAL Alsace, 2014)

Cette carte, présentée en Annexe A, illustre la sensibilité potentielle du territoire alsacien à l'érosion hydrique. Cinq classes sont distinguées allant de " très faible " à " très forte ". Toutes les surfaces sont renseignées à l'exception des zones urbaines et des surfaces en eau qui sont respectivement affichées en gris et bleu. Ces cartes permettent d'identifier la sensibilité des secteurs à l'érosion sous l'hypothèse d'une probabilité homogène d'être touché par des pluies érosives et d'une couverture uniforme par les cultures sur les terres arables (DREAL Alsace 2014).

1.2. Objectifs du stage

Les principaux objectifs du stage sont :

- Dans un premier temps, caractériser dans le contexte alsacien, la sensibilité des systèmes de culture au risque d'érosion à travers des indicateurs.
- Dans un second temps, il s'agit d'identifier les systèmes de cultures les plus sensibles au risque d'érosion, sur la base de seuils à définir pour ces indicateurs.
- Le dernier objectif étant de trouver des systèmes de culture alternatifs permettant de réduire la sensibilité à l'érosion à un niveau inférieur.

Pour mener à bien chacune de ces étapes, des outils sont développés et/ou mobilisés dans le cadre du projet ABC'Terre décrit dans le paragraphe ci-dessous 1.3.1.

1.3. Contexte du stage et structure d'accueil

1.3.1. Le projet ABC Terre

Le projet ABC Terre « Atténuation du Bilan de gaz à effet de serre et stockage de Carbone organique dans les sols agricoles à l'échelle d'un Territoire » consiste à mettre au point, valider et transférer des méthodes et démarches d'aide à la décision pour concevoir et évaluer des stratégies d'optimisation de la gestion du carbone organique des sols dans les systèmes de culture à l'échelle d'un territoire. Ce projet est financé par l'ADEME dans le cadre de l'appel à projet REACTIF.

Dans une perspective de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) de 20 % au niveau européen à l'horizon 2020, l'agriculture est particulièrement sollicitée en tant que secteur contributeur important (21 % des émissions de GES en France en 2011) (Commission Européenne, 2009). Le sol joue un rôle central dans de nombreux processus environnementaux et notamment dans le cycle du carbone. Selon le mode de gestion du sol, celui-ci peut constituer un puits ou au contraire une source de carbone. Au niveau de l'agriculture, les pratiques culturales et les systèmes de culture influencent directement le bilan de carbone du sol et peuvent permettre sa gestion.

Dans un contexte de changement climatique augmentant le risque d'érosion, cette gestion du carbone du sol peut également contribuer à diminuer la sensibilité à l'érosion (Documents projet ABC Terre ; Duparque et al., 2012). Le projet vise ainsi trois principaux objectifs :

- Tout d'abord, la mise au point et le transfert d'une méthode de diagnostic de l'évolution à moyen et long terme du carbone organique dans les sols cultivés sur le territoire étudié.
- Dans un second temps, il s'agit de mettre au point une méthode de calcul des émissions nettes de GES, adaptée à l'échelle du système de culture, intégrant la prise en compte des flux de carbone des sols, servant de base à une évaluation territoriale d'un bilan de GES net.
- Dans un dernier temps, l'expérimentation de la mise en œuvre conjointe de ces méthodes et l'évaluation des stratégies de gestion de problématiques environnementales régionales

seront à réaliser et ainsi il s'agira de tester les capacités de ces méthodes en tant qu'outils de prospective et d'aide à la décision sur un territoire.

Le projet se déroule en six tâches, il est conduit sur deux ans et demi :

Tâche 1 : Gouvernance du projet.

Tâche 2 : Mettre au point une méthode générique de calcul du bilan de carbone organique des sols agricoles, spatialisés, à l'échelle d'un territoire.

Tâche 3 : Mettre au point une méthode de calcul du bilan gaz à effet de serre (GES) à l'échelle du système de culture, intégrant la prise en compte des variations de stock de carbone du sol.

Tâche 4 : Evaluer les stratégies de gestion du bilan de carbone organique des sols et du bilan de GES agricole intégrant les flux de carbone organique des sols, à l'échelle de territoires.

- **Application en Alsace, atténuation de la sensibilité à la battance et l'érosion à travers l'adaptation de systèmes de culture.**
- Application en Picardie : Atténuation du bilan de GES en systèmes de grandes cultures par l'introduction de légumineuses.

Tâche 5 : Préparer le transfert des méthodes.

Tâche 6 : Communiquer sur les résultats du projet.

L'étude réalisée dans le cadre de ce stage s'intègre à la tâche 4 du projet, présentée dans l'Annexe B. Ce projet permettra à l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA) de cartographier les systèmes de culture et le statut organique des sols associés en fonction du type de sol. La méthode générique du projet permettra d'utiliser les systèmes de culture comme levier d'action pour augmenter les teneurs en carbone organique proche de la surface du sol, d'améliorer la stabilité structurale des sols fragiles et ainsi de réduire la sensibilité des sols à l'érosion.

Le sujet du stage est d'appliquer les méthodes développées dans le cadre du projet, sur deux territoires en Alsace (Kochersberg – Vallée de la Zorn et le Sundgau) dans le contexte de la lutte contre l'érosion hydrique et les coulées d'eaux boueuses. Ces deux secteurs en Alsace ont été choisis car ils sont caractérisés comme des secteurs à fort risque d'érosion.

Ce stage est effectué en collaboration avec les partenaires du projet ABC-Terre : l'Institut Polytechnique LaSalle Beauvais pour le transfert des données de l'outil RPG Explorer permettant simuler des assolements de rotation sur le territoire alsacien; Agro-Transfert Ressources et Territoires, une plateforme d'application et un réseau de transfert de la recherche agronomique, mettant à disposition le modèle Simeos-AMG permettant de simuler l'état organique d'un sol sur du moyen et long terme. Le stage s'appuie également sur l'expertise de Claire Chenu de l'INRA Grignon/AgroParisTech pour les liens entre la matière organique du sol et la stabilité des agrégats et l'établissement d'un seuil critique d'un indicateur de la sensibilité à l'érodibilité.

Etant donné les enjeux liés à l'érosion hydrique des sols (agronomiques, sociaux, environnementaux, économiques,...), il s'agit, dans cette étude, **d'établir une méthode de diagnostic pour concevoir et évaluer les stratégies d'optimisation de la gestion du carbone organique des sols dans les systèmes de cultures à l'échelle du territoire alsacien sur deux secteurs d'étude.**

1.3.2. Présentation de l'ARAA

L'Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA) est une association de droit local, créée en 1984. L'ARAA développe et met en œuvre des outils permettant un d'appui agronomique appliqué à l'échelle régional. Elle travaille en collaboration avec des organisations professionnelles agricoles du type Chambre d'agriculture ainsi que des acteurs institutionnels régionaux (Conseil Régional, Conseils généraux, Agence de l'eau et Services régionaux de l'état). Son activité est structurée autour de deux programmes principaux :

- un programme agronomique régional d'appui technique au conseil agricole ;
- un programme de recherche et développement appuyé sur un partenariat avec l'INRA à Colmar.

Les travaux sont effectués par une équipe de huit personnes. Ils permettent de répondre aux questions actuelles concernant la productivité et la qualité des productions végétales, associées à des préoccupations environnementales, la qualité des eaux et notamment la préservation des sols. Ils visent à intégrer les connaissances scientifiques de l'agronomie dans les décisions quotidiennes des agriculteurs et de leurs conseillers, pour contribuer au développement d'une agriculture durable en Alsace (ARAA, 2013).

Différents thèmes sont abordés par l'ARAA, notamment des travaux concernant :

- La conception de systèmes de culture (SdC) innovants durables avec la mise au point de nouvelles modalités de travail et entretien du sol (Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL), semis direct, ainsi que les pratiques agricoles. Ces systèmes sont testés au champ pour évaluer leur durabilité en termes économiques, environnementaux et sociaux. Les systèmes de culture innovants conçus intéressent les situations du piémont et de la plaine d'Alsace. Ils ont pour objectifs, en comparaison avec le système actuel de référence monoculture de maïs irriguée : d'être aussi rentables, plus robustes face aux aléas, de consommer moins d'énergie fossile, d'émettre moins de substances polluantes vis-à-vis de l'eau de la nappe, d'améliorer le patrimoine sol et de libérer suffisamment de temps libre pour l'agriculteur (ARAA, 2013) ;
- La gestion optimisée de l'azote des sols et la gestion de l'interculture ;
- L'identification des situations à risques pour éviter la contamination des sols par les produits phytosanitaires et la préservation de la qualité des eaux;
- La connaissance des risques de ruissellement et d'érosion, l'identification et l'évaluation des solutions pour prévenir les pertes de sol et les coulées d'eau boueuses. L'ARAA cartographie et quantifie l'érosion des sols sur le territoire alsacien pour limiter ces risques. Des outils de modélisation et des indicateurs permettent d'identifier les zones à risque et d'estimer l'efficacité des mesures de lutte contre l'érosion par les agriculteurs.
- La connaissance des sols, notamment avec la conception de la base de données des sols en Alsace. Elle a été élaborée dans le cadre du programme national « Inventaire Gestion et Conservation des Sols » (IGCS) initié par le Ministère de l'Agriculture avec l'appui scientifique de l'INRA. L'ARAA assure sa construction en collaboration avec l'unité INFOSOL de l'INRA d'Orléans. L'essentiel des travaux de collecte et de numérisation des données a été réalisé par le bureau d'étude SOL CONSEIL de Strasbourg. La base de données est construite selon le modèle d'organisation des informations DONESOL : elle permet ainsi le stockage de données ponctuelles (plus de 600 profils pédologiques sont décrits pour l'Alsace) et de données surfaciques (les contours des unités cartographiques de sols). Ces unités cartographiques sont composées de types de sols, eux-mêmes décrits selon une succession de strates (ARAA, 2013).

Ce stage croise des compétences de plusieurs de ces domaines à savoir : la connaissance des sols, la conception de systèmes de culture alternatifs à l'érosion (incluant les pratiques agricoles et les TCSL), l'utilisation d'outils de modélisation pour la cartographie de l'état des sols.

2. Etat des connaissances sur l'érosion

2.1. L'érosion

2.1.1. Les principes fondamentaux de l'érosion des sols

Les principaux facteurs d'érosion sont le climat, le relief, les sols, la végétation et l'homme. L'érosion des sols par l'eau correspond au détachement et au transport des particules sous l'action, en général combinée, de la pluie et du ruissellement (Auzet, 1987).

L'érosion hydrique résulte de la combinaison de trois mécanismes : le détachement des particules de terre, leur transport et leur sédimentation (Joannon, 2004).

Le processus de détachement des particules de terre est la conséquence de deux phénomènes :

- *L'impact des gouttes de pluie sur la surface du sol* qui détache des particules de terre suivant différents mécanismes : dispersion physico-chimique, éclatement, désagrégation mécanique et microfissuration par gonflement différentiel (Le Bissonnais et Gascuel-Oudou, 1998). Le rapport entre l'érosivité des gouttes de pluie et la résistance des agrégats du sol détermine s'il y a détachement ou non.
- *L'action mécanique du ruissellement* qui peut arracher sur son passage des particules de terre. Ce processus dépend de la force de cisaillement du ruissellement et de la résistance du sol. Plus la vitesse d'écoulement est grande, plus la force de cisaillement est élevée (Le Bissonnais et Gascuel-Oudou, 1998).

Une fois détachées, les particules de sols sont transportées sur une distance plus ou moins grande. C'est le processus de transport qui fait également intervenir deux phénomènes :

- Le *rejaillissement* par lequel les particules détachées lors de l'impact des gouttes de pluie sur le sol, peuvent être transportées sur une très courte distance (Peyre, 1982) ;
- L'*écoulement du ruissellement* qui entraîne des particules de terre. Ce second phénomène est le plus important, si nous considérons la distance de transport des particules.

Le ruissellement de surface résulte soit *d'un dépassement de l'infiltrabilité* du sol, dans ce cas il s'agit du **ruissellement Hortonien**, soit d'un dépassement de la capacité de stockage du sol, dans ce cas-là c'est un **ruissellement par saturation du sol**. Dans les deux cas, le ruissellement de surface ne se déclenche que si la capacité de stockage dans les micro-dépressions formées à la surface du sol par les mottes de terre est dépassée (Le Bissonnais et Gascuel-Oudou, 1998).

Le ruissellement Hortonien est souvent la conséquence de la formation d'une **croûte de battance** qui ferme la surface du sol. La croûte se forme en deux étapes (Boiffin, 1984 – Figure 1: Formation de la croûte de battance). Tout d'abord, les gouttes de pluie désagrègent les agrégats de la surface du sol et redistribuent les particules détachées dans les creux, entraînant ainsi l'apparition d'une croûte structurale. Lors des pluies suivantes, des flaques apparaissent ; elles mettent en suspension les fragments détachés qui, en se déposant, forment une croûte sédimentaire pouvant atteindre plusieurs centimètres d'épaisseur. La capacité d'infiltration est fortement diminuée. Une autre conséquence de la croûte de battance est l'uniformisation de la surface du sol, qui aplanit la rugosité de surface (Boiffin, 1984).

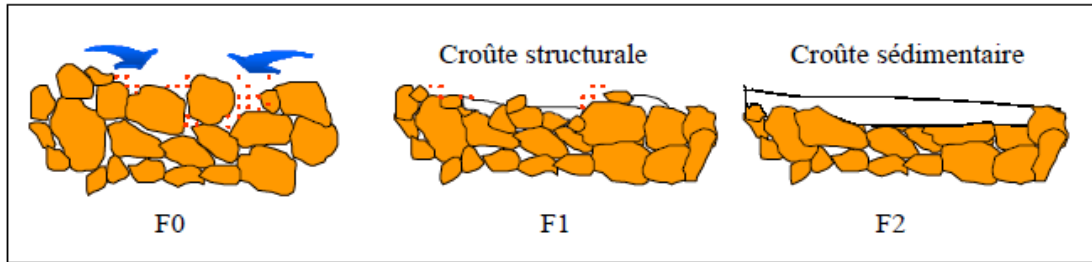


Figure 1: Formation de la croûte de battance
Source : Boiffin (1984) dans Lecomte (1999)

«La combinaison de ces deux processus, détachement et transport, aboutit à différents cas de figure :

- érosion sur de petites distances lorsque le détachement et le transport se font uniquement sous l'effet de gouttes de pluie, il s'agit de l'effet « splash »,
- érosion sur de longues distances lorsque le transport et le détachement par écoulement du ruissellement intervient,
- ruissellement seul lorsque la résistance du sol à l'arrachement et la stabilité structurale du sol sont élevées en comparaison, respectivement, de la force de cisaillement de l'écoulement et de l'érosivité des pluies » (Ambroise, 1999).

La sédimentation est le troisième processus de l'érosion hydrique. Elle se produit lorsque la capacité de transport de l'écoulement est dépassée. Elle résulte d'un ralentissement de l'écoulement à la faveur d'un obstacle, d'une diminution de la pente ou d'une dépression. Les particules les plus grossières sont les premières à sédimenter, les plus fines étant transportées plus loin. Il s'opère ainsi un tri granulométrique (Kauark Leite, 1990).

2.1.2. Les différentes formes d'érosion

Différentes formes d'érosion se combinent en fonction des processus élémentaires mis en jeu et des différentes zones du bassin versant concernées. Les principaux cas de figure rencontrés sont synthétisés dans la Figure 2 ci-dessous.

En l'absence de ruissellement, seul l'effet splash intervient : les gouttes de pluie désagrègent les agrégats du sol en redistribuant les fines particules détachées, formant une croûte de battance. Le déplacement des particules de terre se fait sur des distances de l'ordre décimétrique au maximum, mais ce phénomène peut être étendu à l'ensemble de l'impluvium (Joannon, 2004).

Lorsque le ruissellement se produit, les particules de terre peuvent être déplacées sur de plus longues distances. Dans un premier temps, il s'écoule de manière diffuse en tête de bassin et sur les versants. Les particules les plus fines sont alors entraînées : il s'agit d'érosion diffuse (Auzet, 1990), forme d'érosion généralement imperceptible à l'œil. Si l'effet splash ne se produit pas, il n'y a pas d'érosion, la force de cisaillement du ruissellement diffus étant trop faible pour arracher des particules de sol. Il y a alors uniquement ruissellement sans mise en suspension de particules de terre (Joannon, 2004).

Lorsque le ruissellement se concentre, sa vitesse augmente et la force de cisaillement associée à l'écoulement peut dépasser le seuil critique d'incision. En plus du transport des particules de terre détachées par l'effet splash, le ruissellement érode le sol sur son passage. L'écoulement de l'eau étant concentré, ce type d'érosion est appelé érosion linéaire (Joannon, 2004).

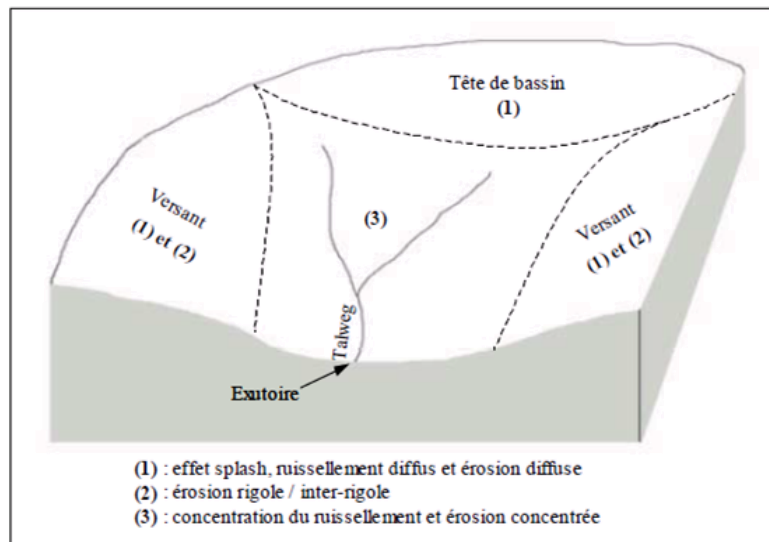


Figure 2: Organisation des formes d'érosion dans le bassin versant

Source : Joannon (2004)

Deux types d'érosion linéaire sont différenciés en fonction de la localisation spatiale de l'érosion dans le bassin versant:

- Sur les versants, le ruissellement se concentre dans les motifs agraires comme les traces de roues ou les lignes de semis orientées dans le sens de la pente, creusant ainsi des rigoles de quelques centimètres à quelques décimètres de profondeur (Le Bissonais et Gascuel-Odoux, 1998). Ces rigoles apparaissent lorsque la pente est supérieure à 5% et avec des pluies d'intensité assez forte, généralement au printemps. La zone de collecte de l'eau est réduite et se situe juste en amont de la rigole sur le versant. Ce type d'érosion est nommé **érosion diffuse entre les rigoles** (Joannon, 2004).
- Plus à l'aval, le ruissellement peut également se concentrer plus, dans les dépressions topographiques correspondant à des fonds de vallons secs, appelés talwegs. La zone de collecte ou impluvium est étendue et correspond à la tête du bassin et aux versants. La quantité d'eau étant plus importante, ce sont de véritables ravines qui sont créées, de taille décimétrique à métrique en profondeur. Il s'agit d'**érosion concentrée ou érosion de talweg**. A la différence de l'érosion de rigole, des pluies intenses ne sont pas indispensables pour que ce type d'érosion se produise ; des ravines peuvent apparaître même sur des pentes inférieures à 5% (Joannon, 2004).

Des interactions relient ces différentes formes d'érosion. Il a ainsi été remarqué que l'apparition de rigoles sur un versant accélère le transport des particules détachées par l'effet splash, comparativement à une situation avec uniquement du ruissellement diffus (Auzet, 1990). On constate que la formation d'un réseau de ravines en hiver peut faciliter le transfert d'eau chargée en terre au printemps suivant. Cela augmente le risque de coulées boueuses au printemps par rapport à une situation sans érosion concentrée en hiver (Papy et Douyer, 1991). Ces différentes manifestations du ruissellement érosif peuvent avoir lieu simultanément ou séparément sur un même bassin versant (Joannon, 2004).

2.2. Erodibilité des sols et rôle de la matière organique

Le ruissellement Hortonien est fortement favorisé par les croûtes de battance, qui se forment plus ou moins vite sous l'action de la pluie, en fonction de la stabilité structurale des sols.

Deux groupes de définitions de cette notion apparaissent dans la littérature : pour de nombreux auteurs comme Boiffin et Monnier (1982), c'est « l'aptitude d'une terre à maintenir son état

d'agrégation lors d'une agression par l'eau ». Le Bissonais et Duval, en 2003, proposa une définition proche : « l'aptitude des agrégats du sol à résister à l'action désagrégante de l'eau lors d'épisodes pluvieux »

En 1997, Le Bissonais et Arrouays avaient proposé une définition plus large, indiquant que les contraintes appliquées à la structure du sol peuvent être de différentes natures et de différentes intensités, comme par exemple l'impact d'un outil de travail du sol. L'action de l'eau ne devrait donc pas être considérée seule dans la définition de la stabilité structurale.

Une étude a été réalisée reliant la stabilité de la structure à la constitution des sols, en particulier à leur teneur en carbone organique. Cependant sa faible capacité prédictive ne permet pas de l'utiliser comme fonction de pédotransfert. Des travaux ont ainsi été menés dans le cadre du projet MOST : *Mise au point d'outils de prévision de l'évolution de la stabilité de la structure de sols sous l'effet de la gestion organique des sols* à différentes échelles de temps. Comme la gestion des matières organiques constitue un volant d'action majeur pour agir sur la sensibilité de sols limoneux à la battance et à l'érosion, ce projet pourrait servir de base à des préconisations agronomiques ou à l'apport raisonné de produits résiduels organiques au sol (Chenu et al., 2011).

2.2.1. Relation de la stabilité structurale avec les comportements physiques et l'état organique du sol

Une notion importante par rapport à la sensibilité à l'érosion du sol est la stabilité structurale qui exprime la résistance des agrégats et des mottes à l'action de l'eau.

La stabilité structurale joue un rôle important dans la fertilité des sols. En effet, comme le soulignent Mathieu et Piéltain (1998), elle modifie des propriétés chimiques (échange de cations au niveau du complexe colloïdal...), physiques (aération, perméabilité...), et biologiques (qualité et activité des micro-organismes).

Au champ, la dégradation de la structure du sol se manifeste par des phénomènes tels que la battance et la prise en masse. La première correspond à « une destruction de la structure de la surface du sol sous l'effet de la pluie avec dispersion des colloïdes suivie, lors du ressuyage et de la dessiccation, de la formation d'une croûte superficielle continue et consistante, à structure très souvent feuilletée » (Lozet et Mathieu, 2002). Ce sont donc la présence d'eau et son énergie cinétique qui sont impliquées dans le déclenchement de ce phénomène, observé surtout lors de pluies intenses et (ou) prolongées (Guérif et Monnier, 1982).

La prise en masse qui dépend aussi de la pluviométrie, n'est au contraire conditionnée que par l'excès d'eau et elle se manifeste sur l'ensemble des horizons travaillés. Selon Lozet et Mathieu (2002), cette dégradation correspond plus précisément à la disparition progressive de la porosité structurale sous l'effet de la pluie, de l'alternance gel-dégel et des phénomènes de dessiccation.

Le sol devient ainsi continu et durci lors des phases de dessiccation, ce qui peut affecter son fonctionnement à plusieurs niveaux : baisse de la conductivité hydrique et gazeuse, ralentissement de la vitesse de ressuyage et de réchauffement du sol au printemps d'où de probables problèmes agronomiques lors de la germination, de la levée et au cours du développement, ainsi que des difficultés au niveau du travail du sol. Aucun indicateur n'est aujourd'hui proposé pour évaluer la prise en masse.

Exemple d'indicateurs disponibles pour caractériser le phénomène de battance :

En 1974, s'appuyant sur le test de stabilité structurale de Hénin, Rémy et Marin-Lafèche (1974) ont défini un risque de battance (R) qu'ils présentent comme un indicateur compensant alors les rares tests complets de stabilité structurale :

$$R = \frac{1,5 Lf + 0,75 Lg}{A + 10 MO} - C$$

avec L_f la teneur en limons fins, L_g en limons grossiers, A en argile et MO en matière organique et $C=0$ si $pH < 7$ ou $C=0,2(pH - 7)$ si $pH > 7$.

La matière organique aurait donc, au regard de cette relation, une action stabilisante dix fois supérieure à celle de l'argile. Les auteurs ont alors proposé plusieurs classes de risque de battance : (>2 très battant ; 1,8 à 2 battant ; 1,6 à 1,8 assez battant ; 1,4 à 1,6 peu battant ; < 1,4 non battant). Ces classes du risque de battance mériteraient d'être davantage validées.

La résistance des agrégats et des mottes à l'action de l'eau reflète leur comportement à l'humectation lorsqu'ils sont soumis à l'impact de gouttes d'énergie cinétique déterminée ou à une immersion. Les forces de rupture au sein des agrégats sont dues à la compression de l'air piégé dans les pores et aux phénomènes de gonflement des argiles. La stabilité structurale dépend des facteurs de constitutions et d'organisation qui sont liés à : la texture, la nature minéralogique des argiles, la teneur en matière organique et leurs caractéristiques et l'état et l'histoire hydriques (Auzet, 1987).

Les matières organiques favorisent l'agrégation des particules entre elles et ont ainsi une influence positive sur la stabilité structurale. D'après le Tableau 1, cette influence est d'autant plus importante que la teneur en argile est faible. L'augmentation de la stabilité structurale est en effet appréciable au-delà d'une teneur seuil en matière organique, liée à la teneur en argile. Les matières organiques agissent essentiellement en modifiant la mouillabilité du sol : lorsque le sol est humide, la présence de matière organique favorise l'infiltration de l'eau. La nature des matières organique n'est pas indifférente : les produits transitoires (corps microbiens et substances pré-humiques) ont un rôle plus important mais beaucoup moins durable que les acides humiques (Auzet, 1987).

Tableau 1: Exemples d'interaction texture-matière organique sur la stabilité structurale (d'après Monnier et Stengel, 1982)

Sol	Teneur argile (%)	Teneur seuil MO (%)	Stabilité d'origine texturale	Stabilité en présence de matières organiques			
				1% MO	2% MO	3% MO	4% MO
SL	8	0.6	Passable	Stable	Très stable	Très stable	Très stable
L	15	1.05	Très instable	Très instable	Très instable	Instable	Passable
LA	25	1.75	Instable	Instable	Instable	Passable	Passable
AA	50	3.5	Stable	Stable	Stable	Stable	Très stable

(SL)=Sable limoneux ; (L)=Limon ; (LA)=Limon argileux ; (AA)=Argile

Source : Auzet (1987)

2.2.2. La matière organique des sols et le stockage du carbone

Pour évaluer la stabilité structurale d'un sol, l'étude des teneurs en carbone organique (Corg) est suffisante, cependant le stock en Corg est également estimé par la suite, notamment pour répondre aux objectifs de réduction des gaz à effet de serre dans le cadre du projet ABC' Terre.

Les matières organiques étant composées de 58 % de carbone organique en moyenne, elles libèrent du dioxyde de carbone (CO₂) et des composés organiques en se décomposant sous l'influence du climat et des conditions ambiantes du sol. Elles jouent donc un rôle primordial par rapport à la problématique de la diminution des émissions de CO₂ dans l'atmosphère, car elles participent au cycle des GES. Le stock global de carbone dans le sol est important puisque les sols comportent au moins le double de carbone organique que dans l'atmosphère. La quantité de carbone organique (Corg) stockée dans les 30 premiers cm du sol est estimée à 700 Gt (gigatonnes ou milliards de tonnes) au niveau mondial et à 3,1 Gt en France métropolitaine (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2010).

Le stockage de dioxyde de carbone (CO₂) sous forme organique se pose en termes de flux CO₂ → carbone organique et de durée de rétention sous forme organique.

On distingue quatre postes affectant le stockage, correspondant à la Figure 3: (1) La production *primaire* : toutes choses étant égales par ailleurs, le stockage dans le sol sera d'autant plus élevé que la production primaire est élevée. Son devenir se pose ensuite en termes de vitesses de retour à l'atmosphère. On distingue ici : (2) *des alternatives au transfert au sol*. C'est principalement la combustion, qui est un retour instantané. Concernant les déchets des filières de la production primaire, tels que lisiers et fumiers, composts, boues, on peut considérer en première approximation que leur devenir est le même que si les produits végétaux de départ étaient restés in situ. (3) *les vitesses de biodégradation*. Elles diffèrent le retour du carbone à l'atmosphère. Leur ralentissement provoque un stockage. (4) *La gestion des filières* et des durées de vie dans les filières ainsi que le retour différé et/ou le transfert des résidus de ces filières (Arrouays et al., 2002).

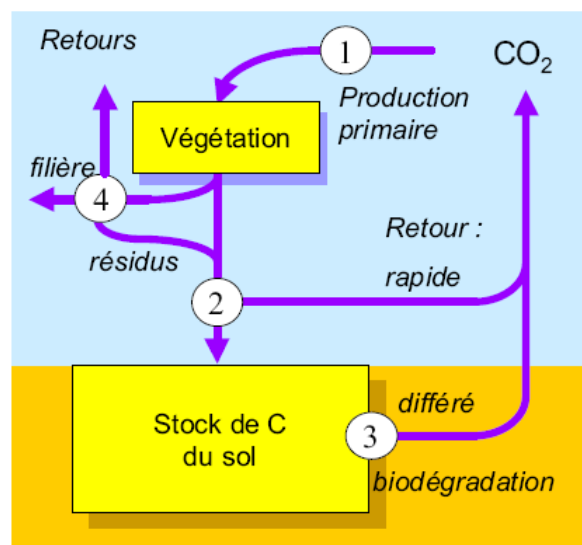


Figure 3: Problématique du stockage de carbone dans un agro-écosystème
Source : Arrouays et al. (2002)

Le stock de C_{org} dans le sol évolue en fonction de l'équilibre entre le volume des apports végétaux au sol et la vitesse de minéralisation. Le fait de modifier les pratiques agricoles peut favoriser le stockage de carbone dans les sols, comme la conversion des cultures en prairies ou en forêts. Au contraire, la mise en culture des prairies ou des forêts entraîne une diminution du stock de carbone. Le sol joue le rôle de puits ou d'émetteur de carbone, principalement sous forme de dioxyde de carbone (CO₂). Le protocole de Kyoto, visant à réduire les émissions de CO₂, inclut la possibilité de comptabiliser le carbone stocké dans les sols comme une émission négative (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2010).

Les matières organiques ont, le plus souvent, des effets positifs sur diverses propriétés des sols, liées à des enjeux agronomiques et environnementaux, comme nous le montre la Figure 4 ci-dessous.



Figure 4: Rôles des matières organiques

Source : Chenu et Balabane (2001)

2.3. Incidence du système de culture sur la dynamique des matières organiques du sol

L'impact d'un changement de pratique a une incidence importante sur les propriétés du sol. En effet, cette conversion influe sur son érodibilité car elle met en jeu la résistance des agrégats aux agents de dégradation, en modulant la teneur en matière organique et le stock en carbone du sol.

Le potentiel maximal de stockage additionnel du carbone dans les sols agricoles pourrait être de l'ordre de 1 à 3 millions de tonnes par an selon des estimations effectuées par l'INRA en 2002 puis en 2013. Ce stockage pourrait compenser jusqu'à 3 à 4 % des émissions annuelles en gaz à effet de serre de la France. Les pratiques à mettre en œuvre pour enrichir les sols agricoles en carbone identifiées sont de deux types : favoriser les pratiques qui accroissent le stock de matière organique (MO) et limiter celles qui augmentent les pertes. Pour fournir plus de carbone au sol il faut accroître la production végétale et le retour au sol des MO en favorisant la couverture des sols nus par l'insertion des cultures intermédiaires dans la rotation, l'enherbement des inter-rangs des vignes et des vergers et l'augmentation de la durée de vie des prairies temporaires (ADEME, 2014).

L'apport au sol d'amendements organiques issus de matériaux résiduels issus des activités urbaines, industrielle ou agricole (Produits Résiduels Organiques : PRO) constitue une des principales pratiques permettant de maintenir ou d'augmenter les stocks de carbone organique et d'améliorer des propriétés du sol liées aux teneurs en carbone organique (Arrouays et al., 2002 ; Smith, 2004 ; Schils et al., 2008 ; Houot et al., 2009). Pour les cultures et les prairies déjà intensifiées, l'intérêt n'est plus d'accroître les apports en MO mais de conserver au mieux les résidus de cultures. Les épandages des matières organiques d'origine urbaine ou des effluents d'élevage constituent localement une solution intéressante, s'ils sont préférentiellement épandus sur les sols pauvres en carbone et respectent les normes en vigueur. Pour freiner les pertes, les haies et la couverture des sols agissent également sur les stocks en réduisant le ruissellement et les pertes par érosion.

Le non labour induirait une augmentation des teneurs en carbone des sols par une moindre minéralisation des MO en raison de leur meilleure protection physique dans les agrégats et à des conditions plus froides et humides en surface (ADEME, 2014). De plus, le non labour (lorsque la profondeur du travail du sol est réduite) réduit la dilution des MO, par rapport au labour, ce qui mène à une augmentation des teneurs en MO proche de la surface et donc entraîne une augmentation de la stabilité des agrégats et une réduction de la battance. Les résidus de la culture qui reste en surface en non labour (contrairement au labour), protègent directement la surface contre la force désagrégant de la pluie (Van Dijk et al., 2008 ; Schubetzer, 2005). La stabilité structurale est systématiquement meilleure en non-labour et la résistance à la pénétration plus élevée (Vullioud et al., 2006).

3. Erosion des sols agricoles en Alsace

3.1. Contexte de l'agriculture en Alsace

Topographie :

Le territoire alsacien s'étend sur 200 kilomètres, suivant un axe nord-sud formé par le fossé rhénan (« structure géologique limitée des deux côtés par des failles découpant des compartiments de plus en plus abaissés en allant vers l'axe de la structure, c'est-à-dire le Rhin » (Elie de Beaumont)). Ce fossé structure un relief qui s'élève d'est en ouest. Le territoire alsacien se structure autour de cinq principaux ensembles naturels, présenté en Annexe C.

- A l'est, la *plaine du Rhin*, partie basse du fossé (100-200 m), est marquée par les zones alluvionnaires du Rhin et de l'Ill et la vaste nappe phréatique d'Alsace.
- Entre la faille rhénane et la montagne vosgienne s'élèvent les *collines sous-vosgiennes*, zones sédimentaires, d'une altitude variant de 200 à 400 m et d'une largeur maximale de 20 km.
- A l'ouest, les *Vosges* dominant abruptement la vallée du Rhin. Ces moyennes montagnes sont comprises entre 400 et 1363 m d'altitude, d'environ 20 km de large. Elles sont plus hautes et cristallines au sud, plus basses et gréseuses au nord.
- Au nord-ouest, les Vosges redescendent en pentes douces et forment le *plateau lorrain*.
- Au sud, les *plateaux du Jura alsacien* sont marqués par des dépressions marneuses et des crêtes calcaires (DRAAF Alsace, 2014).

Cette morphologie marque et organise le paysage alsacien et notamment les productions agricoles qui dominent. Le Tableau 2 illustre le lien entre le relief et les activités agricoles présentes dans la région.

Tableau 2: Un relief structurant pour l'activité agricole

Ensembles géomorphologiques	Formation géo-pédologique dominante	Altitude	Production agricole dominante
Plaine	Alluvions du Rhin et de l'Ill	100-200 m	Grandes cultures
Collines sous-vosgiennes et levées limoneuses	Collines argileuses et limoneuses	200-400 m	Viticulture et grandes cultures
Montagne	Bas-Rhin : Vosges gréseuses Haut-Rhin : Vosges cristallines	400-1424 m	Elevage bovin
Plateau lorrain nord	Sols calcaires et argilo-marneux	200-353 m	Elevage bovin
Plateau moyen du Jura	Calcaire du Jura	460-785 m	Polyculture Elevage bovin

Source : Agreste Alsace (2014), adapté avec les PDM en Annexe C.

Climat :

La plaine d'Alsace se caractérise par un climat semi-continental. Par rapport aux températures, l'amplitude thermique annuelle est marquée avec une moyenne proche de 2°C en janvier et de 20°C en juillet. Au niveau des précipitations, leurs cumuls sont parmi les plus faibles de France et présentent un maximum au printemps-été et un minimum en automne-hiver. En Alsace Bossue et sur le Sundgau, les précipitations deviennent plus importantes et sont régulières tout au long de l'année, du fait de leur altitude plus élevée. Au-dessus de 600 mètres d'altitude règne un climat de basse à moyenne montagne. Les hivers sont froids et secs avec un enneigement parfois durable. Les étés sont tièdes, voire frais sur les crêtes, avec des orages fréquents (Météo France, 2014).

Sol et occupation du sol :

Les sols présents en Alsace ont des potentialités variées : dans la partie est de la plaine, les sols passent de limons sableux assez superficiels et caillouteux à des sols profonds limono argileux, riches en matières organiques et hydromorphes et à l'ouest de ces zones, des dépôts de limon

définissent des sols profonds et fertiles (loess et lehm), entrecoupés de vallées alluvionnaires limoneuses sableuses à argileuses. Les collines sous-vosgiennes sont limoneuses ou argileuses. Les Vosges sont constitués de sols plus pauvres (sables acides, plus ou moins argilo-limoneux). Enfin, les sols sont calcaires sur les plateaux du Jura alsacien et sur les plateaux lorrains où des sols argilo calcaires hydromorphes se retrouvent dans les vallées alluviales (Sol Conseil, 2011).

L'occupation des sols de la région se répartit en 3 grands ensembles :

- les espaces urbains et industriels qui occupent près de 150 000 ha, soit près de 20 % du territoire, ceci correspondant au double de la moyenne nationale comprise entre 8 et 12 %,
- les espaces forestiers qui occupent au total environ 320 000 ha, soit un peu plus de 35 % de la surface alsacienne,
- les espaces agricoles qui occupent près de 360 000 ha (environ 210 000 ha dans le Bas-Rhin et 150 000 ha dans le Haut-Rhin), soit près de 45 % de la surface alsacienne.

(Sol Conseil, 2001 ; CIGAL, 2013)

Agriculture :

Les productions agricoles sont déterminées par le contexte géo-pédologique. Elles sont présentées dans le Tableau 2 ci-dessus. Les différents secteurs de plaine sont dominés par des cultures céréalières avec principalement la culture de maïs. Les collines sous-vosgiennes sont destinées à la viticulture (dans la partie haut-rhinoise) et aux systèmes de polyculture-élevage (au centre et au nord de l'Alsace). Le massif vosgien et le plateau lorrain sont des zones de production fourragère et d'élevage. Enfin, le Jura alsacien présente des cultures de vente et d'élevage (Agreste Alsace, 2014).

La région Alsace est une région agricole aux trois visages. La plaine à l'est, le piémont viticole sur l'axe médian et les zones de montagnes à l'ouest. Les types d'exploitations agricoles en découlent avec les céréaliers et cultures industrielles dans la plaine, la viticulture dans le piémont et l'élevage en montagne. On les distingue sur la Figure 5 ci-dessous.

ORIENTATION AGRICOLE DOMINANTE DES COMMUNES D'ALSACE EN 2010

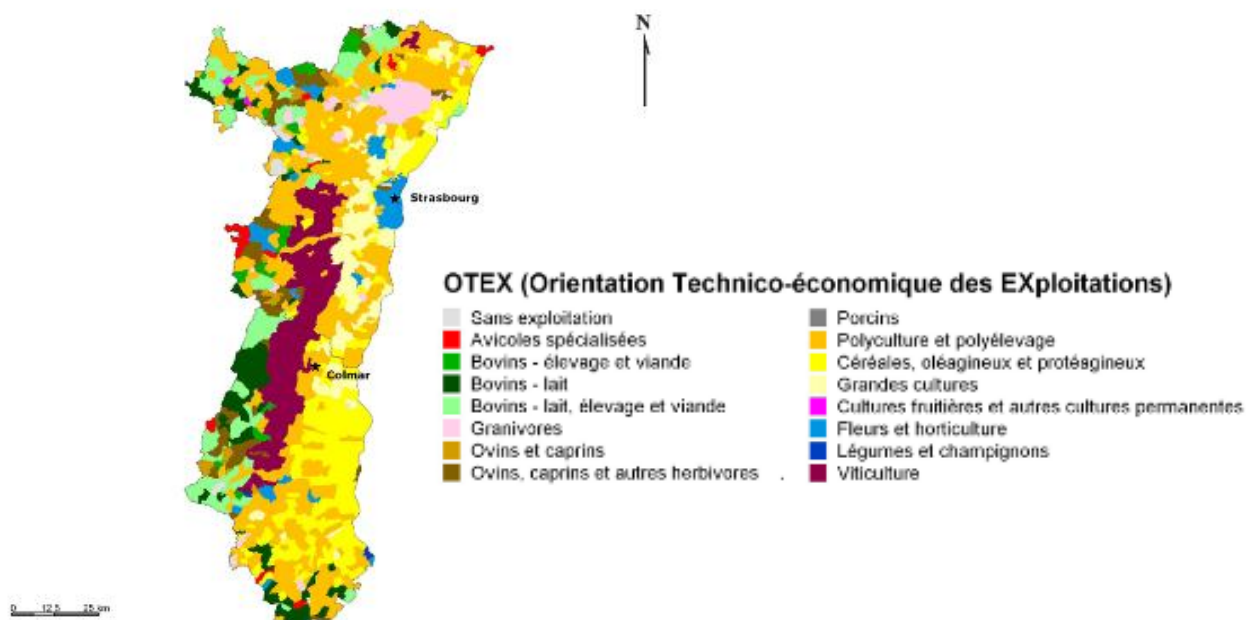


Figure 5: Carte des orientations agricoles dominantes des communes d'Alsace en 2010

Source : SRISE Alsace (2014); Recensement agricole 2010

Au niveau des pratiques agricoles, pour le travail du sol, le labour est plus pratiqué en Alsace qu'ailleurs. Ainsi les techniques culturales simplifiées ou sans labour ne concernent qu'un hectare sur dix des cultures annuelles. La prédominance du maïs dans la rotation conduit certains agriculteurs à

privilégier le labour. Cependant, la pratique du labour pour les cultures de printemps induit une vraie problématique d'érosion des sols en Alsace. Ces zones à risques d'érosion potentielle et de coulée de boues ont pu être identifiées via les travaux réalisés par l'ARAA (DRAAF Alsace, 2014).

3.2. Secteurs à risques potentiels d'érosion

En Alsace de nombreuses communes sont touchées par le risque d'érosion, notamment dans les collines limoneuses de grandes cultures et le piémont viticole. Le risque de coulées d'eau boueuse (CEB) concerne près de 40 % des communes alsaciennes (source DREAL) et plus particulièrement celles du piémont viticole, du Kochersberg dans le Bas-Rhin et du Sundgau dans le Haut-Rhin. Il n'existe pas de données de synthèse du phénomène, ni de son évolution ou de son impact sur les secteurs touchés. Toutefois, l'Université de Strasbourg a pu cartographier le nombre de coulées d'eaux boueuses par commune depuis 1985, à partir de l'exploitation de la base de données nationale des catastrophes naturelles (dossiers CAT NAT) présenté sur la Figure 6. Par ailleurs, une analyse de la sensibilité des sols à l'érosion et aux coulées d'eaux boueuses par bassin versant a été réalisée par l'Association pour la relance agronomique d'Alsace pour le compte de l'Etat et des deux Départements (DREAL Alsace, 2012 ; Heitz et al., 2008).

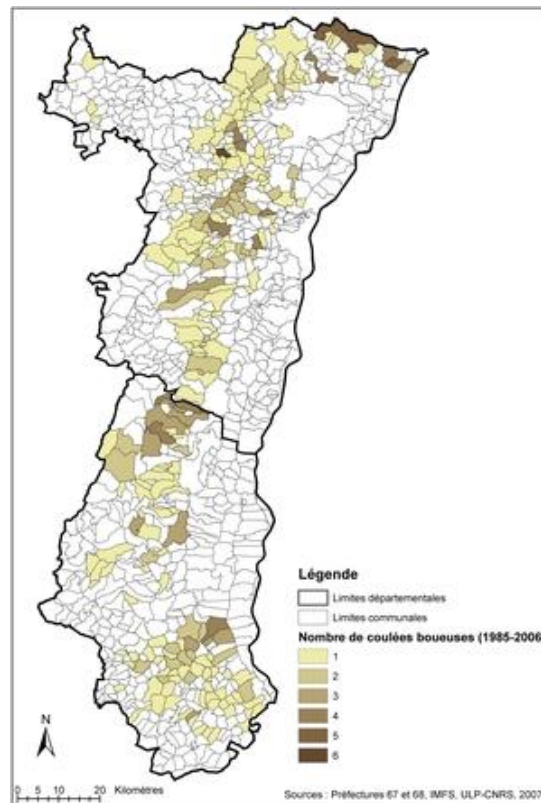


Figure 6: Carte de la fréquence des coulées boueuses en Alsace

Source : DREAL Alsace (2012)

La Figure 7 ci-dessous, présente la carte de sensibilité à l'érosion des sols pour l'Alsace. L'affichage est sous forme raster à la résolution brute des analyses (20 m) pour éviter de dégrader l'information relative à l'occupation du sol. Il y a cinq secteurs concernés par le risque de sensibilité potentielle à l'érosion en Alsace présentés sur la figure. Il s'agit en 1 : Secteur Alsace Bossue, 2 : Secteur Outre Forêt-Pays de Hanau, 3 : Secteur Kochersberg-Vallée de la Zorn, 4 : Secteur Piémont des Vosges, 5 : Secteur Sundgau.

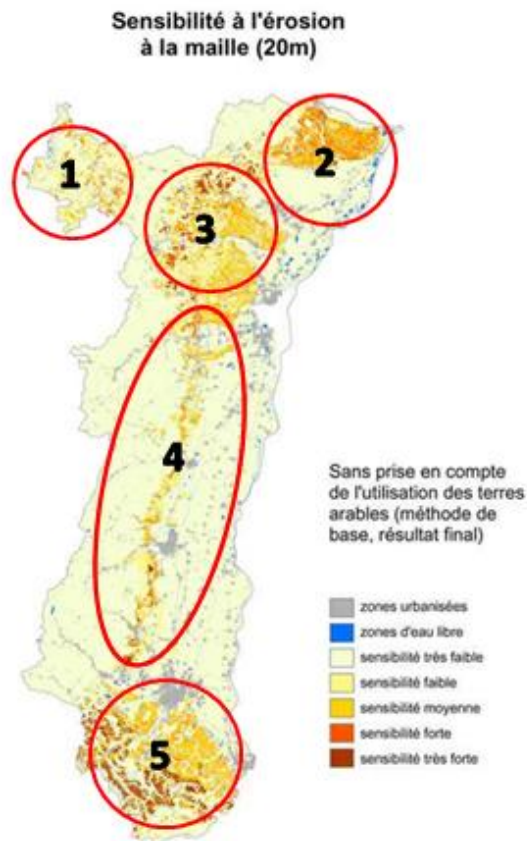


Figure 7: Sensibilité à l'érosion selon la méthode Mesales

Source : ARAA (2007)

Pour le secteur du Bas Rhin, après une étude des dossiers de demande CATNAT, en terme de nombre de dossiers déposés, les petites régions naturelles les plus touchées par le risque d'érosion et donc de CEB sont le Kochersberg, la Plaine d'Erstein à Obernai et l'Outre-Forêt. Les bassins versants les plus affectés sont ceux de la Bruche et de la Sauer. 71% des dossiers concernent des phénomènes survenus en mai et juin, 15% en juillet et 6% en août : la survenue des orages lorsque les sols cultivés sont encore nus ou peu couverts apparaît ici clairement comme un facteur majeur. Sur les 126 zones hydrographiques du Bas-Rhin, 70 (53 %) ne comprennent aucune commune ayant déposé un dossier CAT NAT « coulées de boue », 41 (32 %) ont connu 1 à 4 coulées justifiant le dépôt d'un dossier entre 1985 et 2004, 13 (10 %) entre 5 et 9 coulées, et 5 bassins (4 %) plus de 10. Cet inventaire permet de bien identifier les bassins qui justifieraient des actions contre l'érosion en priorité. » (DREAL Alsace, 2010 ; Auzet et al., 2005)

3.3. Facteurs mis en cause

L'érosion des sols en Alsace n'est pas un phénomène nouveau : il est attesté dans des documents d'archives. Cependant les coulées d'eau boueuse se sont certainement accrues ces trente dernières années (Auzet et al., 2005) Elles sont en effet favorisées par:

- Les assolements mis en place par les agriculteurs : l'extension des surfaces en cultures de printemps et la diminution des surfaces en herbe dans une région où mai et juin sont les mois où surviennent des pluies de forte intensité et des orages.
- L'urbanisation : l'imperméabilisation des sols dû à l'urbanisation, qui s'est souvent étendue en suivant les fonds de vallons, contribue à la fois à augmenter le ruissellement et à la disparition des zones "tampons" que constituaient les vergers et prairies

- Le climat : l'intensité des orages et des pluies au printemps (concentrés les mois de mai et juin) (DREAL Alsace, 2012).
- L'évolution de la MO des sols : diminution de la teneur en MO et stock en Corg entre 1990 et 2009, d'après une analyse de la BDAT en Alsace (Swiderski et al., 2012).

3.4. Actions de lutte contre l'érosion des sols

Des actions de luttés préventives et curatives ont déjà été menées en Alsace, cependant très peu ont déjà été menées sur les systèmes de cultures (uniquement le labour a été étudié) (Maes, Regenass, 2007). Pour une lutte efficace et optimale, la mise en place de ces deux types de mesures est nécessaire :

- Les mesures qui réduisent les émissions de sédiments (la genèse du ruissellement et le départ des sédiments) : les techniques culturales simplifiées et la modification des systèmes de culture.
- Les mesures d'interception des flux de sédiment: aménagements inter-parcellaires ou intra-parcellaires (bandes enherbées, fascines³, haies, bassins de rétention,...).

Une attention particulière est portée sur ces mesures réduisant ou limitant le risque d'érosion des sols. En effet, il s'agit de trouver des alternatives où les acteurs principaux, notamment les agriculteurs, puissent avoir un impact direct pour limiter ces risques. Quelques essais ont déjà été menés en Alsace :

- Depuis l'année 2008, le Conseil Général du Bas-Rhin a mis en place des fascines dans certaines communes du Bas-Rhin en concertation étroite avec la Chambre d'Agriculture et en partenariat avec l'ensemble des acteurs du territoire (élu, agriculteurs, urbanistes, services de l'Etat). Une étude a été menée sur deux communes pour évaluer cette méthode d'interceptions des flux de sédiments. A Jetterswiller, les fascines ont limité le dépôt de sédiments dans le fossé, et à Alteckendorf, la plupart des habitations directement à l'aval des fascines ont été préservées (Pacevicius, 2008).
- Le site de Geispitzen a été mis en place en 2000, par l'ARAA en collaboration avec Arvalis-Institut du végétal, pour quantifier, dans les conditions classiques d'un agriculteur, l'impact du ruissellement et des flux associés à travers le travail du sol, notamment les techniques culturales sans labour (TCSL). Cela dans un contexte de versant sensible au ruissellement, en particulier au printemps avec culture de printemps. Ces essais ont permis de montrer que la stabilité des agrégats est plus élevée en non labour ainsi que la teneur en MO (Van Dijk et al., 2008). Il a aussi été démontré que le non-labour permet de diminuer de 50 à 100 % le risque de ruissellement, selon les années (TCS, 2013).

Des campagnes de communications ont également été conduites pour lutter contre les risques d'érosion. Le Département du Bas-Rhin a monté en 2009 un comité de pilotage multi-partenarial, associant notamment les représentants du monde agricole. Le Département du Haut-Rhin intervient dans le cadre de la politique GERPLAN (plan de gestion de l'espace rural et périurbain) qui vise entre autres à diminuer le risque de coulées de boue : les actions portent sur l'assolement agricole et sur l'aménagement du bassin versant (bandes tampons, bassins de rétention...) mis en œuvre par le Conseil Général du Haut-Rhin. Pour deux communes du Haut-Rhin (Blotzheim et Héisingue) concernées par ce risque, un PPR multirisques "inondation et coulées d'eaux boueuses" a été prescrit, mais il n'est à ce jour pas envisageable de généraliser ce dispositif pour l'ensemble des communes concernées, les événements et les dommages n'ayant pas été assez bien documentés dans le temps (DREAL Alsace, 2012).

³ La fascine est une petite diguette végétale constituée de deux rangées de pieux en quinconce entre lesquels des fagots de bois sont empilés.

4. Matériel et méthode

4.1. Choix du territoire et caractérisation

4.1.1. Choix des territoires d'étude

Le territoire alsacien est concerné par des problèmes d'érosion des sols sur plusieurs secteurs. Dans le cadre de l'étude en Alsace, nous avons décidé de nous concentrer sur deux secteurs en particulier : **le Sundgau et le Kochersberg - Vallée de la Zorn** (respectivement dans le sud et le nord de l'Alsace). Ces deux secteurs font partie de zones à risque d'érosion. La délimitation précise de ces deux secteurs a été faite selon les limites des opérations Agri-Mieux concernées : Sundg'eau Vive (abréviation utilisée par la suite : SEV) pour le Sundgau, et l'ensemble de deux opérations Ferti-Kochersberg et Fert-Zorn (abréviation FKFZ) pour le secteur bas-rhinois. Dans ces territoires, des coulées d'eaux boueuses (CEB) peuvent se produire lors de violents orages de printemps et d'été pouvant causer de nombreux dégâts.

4.1.2. Le Sundgau

Le secteur du Sundgau est une région agricole avec une succession de collines variant entre 260 et 530 mètres d'altitude. La délimitation retenue pour la petite région naturelle repose sur l'utilisation de la carte des formations superficielles d'Alsace (Vogt, Mettauert et Pautrat, 1986). Cette zone représente dans le Haut-Rhin une surface totale d'environ 100 000 ha pour près de 50 000 ha de SAU. La quasi-totalité des sols du Sundgau se sont constitués à partir de matériaux limoneux déposés par le vent à l'époque Quaternaire.

L'ensemble de la zone est soumise à un gradient pluviométrique important. Ceci influe fortement l'évolution des sols, en particulier la décarbonatation des loess (limons calcaires éoliens) et l'entraînement plus ou moins prononcé en profondeur des argiles et du fer. Ceci permet la définition des différents types de sols limoneux du Sundgau présentés en Annexe D.

La présence de limons (souvent prédisposés à la battance), la pluviométrie et la topographie impliquent des excès d'eau dans une partie de ces sols avec des conséquences environnementales liées au risque de ruissellement, au risque de lessivage des éléments minéraux ou au pouvoir épurateur. En particulier, le risque de ruissellement peut se traduire par des coulées boueuses dans les collines, mais aussi par des manifestations d'érosion en situation de plaine le long du réseau hydrographique de l'Ill et de ses affluents. Ce réseau hydrographique présente en effet des caractéristiques favorisant les inondations (Sol Conseil (a), 2001).

Dans le Sundgau, la répartition des pluies dans l'année connaît deux maxima : mai-juin et novembre-décembre. La moyenne des pluies par mois est de l'ordre de 70-80 mm à plus de 110 mm (Sol Conseil (a), 2001).

4.1.3. Le Kochersberg et vallée de la Zorn

Le secteur du Kochersberg :

L'entité du Kochersberg recouvre 10 communautés de communes et comporte 70 communes, elle est délimitée par sa géomorphologie : calée entre Vosges et plaine, entre la faille vosgienne et la faille rhénane, l'entité du Kochersberg se situe en partie dans les collines sous-vosgiennes et en partie sur la plaine rhénane (Adeus, 2009).

Les critères topographiques de l'entité du Kochersberg permettent de distinguer deux sous-ensembles : à l'Ouest, l'Arrière Kochersberg forme une petite chaîne marno-calcaire et à l'Est, le Bas-Kochersberg se présente comme un plateau couvert d'un épais manteau de loess (Sol Conseil (b), 2001). Une carte présentant les principaux sols pour ce secteur se trouve en Annexe E.

Le Kochersberg constitue l'une des meilleures zones agricoles d'Alsace, un sol parmi les plus fertiles d'Europe. Sur le plateau loessique, les sols sont profonds et fertiles, l'espace y est presque entièrement labouré. On y trouve une polyculture très diversifiée, alliant les cultures de céréales (maïs, blé, orge), les cultures spéciales (betteraves sucrières, tabac, houblon), les cultures fourragères en vue d'un élevage bovin (viande et lait), quelques vignes et arbres fruitiers, quelques cultures maraîchères (asperges) et quelques élevages spécialisés (volailles, porcs) (Sol Conseil (b), 2001).

Le secteur Vallée de la Zorn :

La petite région agricole Ferti-Zorn est localisée dans la plaine d'Alsace, entre Hochfelden et le Rhin, elle compte 56 communes. Le RGA 2010 donne une SAU totale de 27.961 ha pour ce secteur. Le maïs couvre 50 % de ces surfaces, les céréales à paille 20 % et les prairies 17 % (Burtin, Probst, 2012). L'élevage est représenté par 136 éleveurs de plus de 10 UGB bovins et 67 autres éleveurs (porcs, volailles, ovins, caprins et moins de 10 UGB bovins) (source : Service Elevage de la Chambre régionale d'agriculture Alsace). Les sols de Ferti-Zorn se distinguent en 5 unités se décomposant en 10 types de sols principaux. Ils sont présentés en Annexe E : Les collines de Brumath et du Kochersberg, les collines sous-vosgiennes, les cônes alluviaux des rivières vosgiennes, la vallée de la Zorn et de ses affluents et la vallée du Rhin (Sol Conseil (b), 2001).

Les fonds de vallons limono-argileux et hydromorphes de cette zone, sont le domaine de la prairie humide et maïs. On peut également trouver dans cette vallée un type de sol particulier, le Ried noir argileux, sol fortement hydromorphe sur argiles rhénanes, très riches en matières organiques noirâtres à évolution tourbeuse (Sol Conseil (b), 2001), présenté en Annexe E.

Le climat printanier du Kochersberg et de la Vallée de la Zorn se caractérise par un maximum pluviométrique en mai-juin de l'ordre de 80 mm de pluie en moyenne par mois. La conséquence de cette pluviométrie est un bilan hydrique souvent excédentaire pour les cultures d'été dont l'évapotranspiration est encore faible (Sol Conseil (b), 2001).

4.2. Schéma méthodologique

Tout au long de ce projet, une méthodologie a été déterminée et appliquée pour les deux secteurs FKFZ et SEV.

Pour cela, il a été nécessaire dans un premier temps d'identifier les combinaisons « sol – système de culture – carbone organique dans l'horizon de surface », présentant une sensibilité élevée à l'érosion et dans un second temps de concevoir des systèmes de culture alternatifs visant à réduire cette sensibilité à un niveau dit « acceptable », en augmentant la teneur en carbone organique pour améliorer la stabilité structurale et/ou la couverture du sol pendant les périodes à risques d'orages. Pour cela, il s'agit de travailler sur le choix des successions culturales à mettre en place par les agriculteurs, les modalités de gestion des intercultures, le travail du sol, la gestion des résidus de culture ainsi que les apports de matières organiques effectués, tout en respectant les contraintes des exploitations agricoles dans les deux secteurs d'étude. L'évolution du carbone organique est simulée avec le modèle Simeos-AMG (INRA /Agro-Transfert Ressources et Territoires).

La définition des seuils pour les deux indicateurs, d'érodibilité et d'exposition, ont été définis à dire d'experts (Chenu, Duparque, Van Dijk, 2014) permettant de définir l'indice de sensibilité potentielle à l'érosion.

Le travail mobilise trois sources de données : Registre Parcellaire Graphique (RPG), Référentiel Régional Pédologique de la région Alsace (RRP), la base de donnée sur les pratiques agricoles en Alsace issue des évaluations Agri-Mieux.

La démarche suivie dans le cadre du stage de mémoire consiste à appliquer l'outil RPG Explorer (cf. § 4.3) pour la reconstitution des combinaisons « sol x rotation de cultures » sur les deux zones d'étude. Pour cela, une typologie des exploitations agricoles basée sur l'assolement est

élaborée et intégrée à l'outil dans les deux zones d'étude car les rotations sont fonction du sol mais aussi du type d'exploitation agricole. Il s'agit ensuite de caractériser des pratiques associées aux combinaisons « sol x rotation de cultures » pour définir des combinaisons « sol x système de culture ». En analysant la base de données Agri-Mieux ; les pratiques agricoles nécessaires en entrée du modèle SIMEOS-AMG (cf. § 4.4) ainsi que les rendements de culture sont caractérisés par type d'exploitation. Les distributions des teneurs en carbone organique par type de sol seront déterminées en se basant sur le RRP. L'évolution du carbone est simulée pour toutes les combinaisons « sol x système de culture x carbone organique » obtenues. Pour la suite, il s'agit de sélectionner les combinaisons à risques d'érosion, avec les indicateurs d'érodibilité et d'exposition (cf. § 4.5). L'étape suivante consiste en la conception des systèmes de cultures alternatifs pour ces situations à risque et leur évaluation multicritères (cf. § 4.6).

Pour trois systèmes de culture à risque (surface concernée importante) : il s'agit de réaliser une conception détaillée du système de culture alternatif (en prenant en compte la couverture et le travail du sol, la gestion des résidus de cultures, l'apport de produits organiques,...) et si possible d'effectuer une évaluation multicritère (aspects environnementaux, économiques et sociaux) puis de la valider par des conseillers agricoles. Ensuite, pour l'ensemble des systèmes de culture à risque, il s'agit de construire des systèmes alternatifs par des règles simples. Pour la dernière étape, s'entame la réalisation d'une cartographie de la sensibilité potentielle à l'érosion et si possible le risque, ainsi que les stocks et teneurs en carbone organique du scénario final.

Les résultats espérés sont (1) la proposition des solutions de systèmes de cultures alternatifs pour les zones définies à sensibilité potentielle à l'érosion élevée ainsi que l'évaluation des solutions envisagées dans les deux secteurs étudiés en Alsace, et (2) une cartographie de cette sensibilité après l'adaptation des systèmes de cultures pour pouvoir représenter les impacts de la modification des systèmes à l'échelle du territoire.

Cette méthodologie est présentée de façon simplifiée dans le schéma ci-dessous :



4.3. RPG Explorer : Caractérisation des systèmes de culture

4.3.1. Principe de RPG Explorer

Le registre parcellaire graphique (RPG) est un système d'information géographique anonyme permettant d'identifier les parcelles agricoles des exploitations. Il a été mis en place conformément aux exigences communautaires européennes et est administré par l'ASP. Il associe le dessin des îlots et les informations déclarées par l'exploitant sur l'occupation du sol, les structures foncières et les couverts agricoles (ASP, 2014). L'Annexe F fait référence aux groupes de culture défini dans l'outil. Ces groupes de culture ne permettent pas toujours de connaître les cultures réellement présentes sur les îlots. En effet, les îlots peuvent contenir plusieurs groupes de culture dont on connaît la surface mais pas la localisation, car les données RPG ne fournissent des informations qu'en terme de groupe de cultures et non de cultures effectives.

L'outil RPG Explorer permet, en passant par sept étapes successives, d'obtenir des assolements de rotation par type de sol à partir des données RPG. La grande majorité des étapes est automatisée au sein de l'outil, cependant il est nécessaire d'apporter une certaine expertise à différents niveaux.

La première étape consiste en l'intégration des fichiers de base dans RPG Explorer. Pour utiliser l'outil, il est nécessaire d'intégrer dans l'outil les données RPG d'un territoire (îlot, îlot du territoire étudié et groupes cultures). Pour cela, il s'agit d'importer les fichiers Asp dans l'outil.

La seconde étape correspond à la filiation des îlots, en effet, d'une année sur l'autre les identifiants des îlots dans les données RPG changent. Il est pourtant primordial, pour établir des rotations culturales, d'établir une correspondance entre les îlots pour les différentes années étudiées. Cette étape de filiation permet de relier les îlots pour les différentes années sélectionnées dans l'outil. C'est une étape de reconnaissance géométrique et temporelle (pas de notion de surface ni de culture). Pour cela l'outil effectue une intersection géométrique des îlots des différentes années.

La troisième étape consiste en la reconnaissance des séquences. Les données RPG fournissent, pour chaque année, le/les groupe(s) de culture présent(s) sur chaque îlot. Cette étape permet, pour chaque îlot qualifié lors de la filiation, de déterminer les séquences de groupes cultures sur l'ensemble des années sélectionnées.

L'étape quatre permet d'insérer une typologie des exploitations caractéristique aux secteurs étudiés. Par la suite, on aura besoin de connaître les cultures réellement présentes sur les parcelles (on connaît les groupes de culture mais pas les cultures réelles). Pour cela on se base sur un arbre typologique du territoire étudié. S'il n'y a pas d'arbre disponible, il est possible d'importer une typologie différemment. Aussi, s'il y a un groupe de culture où la répartition reste ambiguë au niveau des proportions pour un type d'agriculteur dans un secteur spécifique, on peut s'appuyer sur les données RGA qui permettent de connaître les répartitions des groupes de cultures sur un territoire donné.

La cinquième étape concerne l'affectation des cultures aux groupes de cultures par îlot en fonction du type d'exploitation. Pour établir les rotations de culture on se base sur les successions de cultures, il faut donc passer des groupes RPG aux cultures réelles. On cherche pour cela à établir une correspondance entre groupes cultures RPG et cultures en se basant sur l'analyse des données du RGA. La culture de chaque parcelle, définie dans le RPG, contenue dans un îlot est renseignée selon une nomenclature précise (cf. Annexe F). Pour chaque groupe de culture et en fonction des typologies pour les deux secteurs, un pourcentage des cultures est défini pour chaque secteur en se basant sur l'analyse des données RGA. Le Registre Parcellaire Graphique (RPG) est issu des déclarations PAC des agriculteurs. Il s'agit d'une donnée annuelle, diffusée par l'ASP (Agence de Service et de Paiement contribuant à la mise en œuvre de politiques publiques) sous forme anonyme, avec différents niveaux d'information. Un îlot correspond à une ou plusieurs parcelle(s) agricole(s) appartenant à un même agriculteur. La culture de chaque parcelle est renseignée selon

une nomenclature comprenant 28 postes (cf. Annexe F). La connaissance des cultures est donc limitée par cette nomenclature. Le RPG correspond généralement à l'échelle du 1/5000^{ème}.

L'étape six consiste à générer des assolements de rotations par Unité Cartographique de Sol (UCS), définie par une portion de territoire aux caractéristiques pédo-paysagères spécifiques et peut être composée de plusieurs types de types de sol définis en Unité Typologique de Sol (UTS). On cherche à déterminer, à partir des assolements et des successions culturales obtenus précédemment un assolement de rotation unique par type d'exploitation au sein d'un espace écologique (UCS).

La dernière étape de l'outil permet de répartir des rotations par UTS au sein d'un UCS. Les UCS caractérisant le territoire d'étude sont composées de différentes UTS. La localisation des UTS au sein des UCS n'est pas connue, cependant leur proportion l'est. Le but de cette étape est de répartir les assolements de rotations obtenus par UCS, dans les différentes UTS, afin d'obtenir des combinaisons « sol x rotation ».

La table de sortie finale prend en compte la combinaison « rotation x sol x type EA ». Cette table permettra de réaliser le transfert des données vers l'outil Simeos-AMG (pour l'étude du carbone organique).

Par la suite on parle d'une **situation agronomique** lorsqu'il y a la combinaison entre un type de sol, un type d'exploitation agricole et une rotation.

Pour être au plus proche de la réalité, l'optimisation linéaire a été réalisée dans notre étude. En effet, à partir de la matrice de potentiels agronomiques des couples précédents/suivants, des fréquences des cultures dans une rotation et de l'assolement de base, l'outil génère un assolement de rotations, à partir duquel un assolement de cultures et de couples précédents/suivants « théoriques » est recalculé. Des contraintes sont posées à deux niveaux : le premier correspond aux surfaces des cultures issues de l'assolement de rotations qui doivent être conformes à celles observées, le second niveau correspond à la surface des couples précédents/suivants issus de l'assolement de rotations qui doit être le plus proche possible de celle des couples précédents/suivants observés.

L'importance de ces contraintes est modulable dans l'outil. En effet, ces deux contraintes sont associées à des pénalités dont la valeur (de 0 à 99) peut être choisie par l'utilisateur. Par défaut ces deux contraintes ont des pénalités égales. De plus, afin d'éviter de générer des rotations impossibles (par exemple celles contenant de la prairie permanente au milieu d'autres cultures), on impose à l'outil de modifier la table initiale de potentiels agronomiques en donnant une note nulle pour les couples très peu présents sur le territoire (le seuil peut être choisi par l'utilisateur). La mise en place de ce seuil permet une nette amélioration de la rapidité de traitement et de la cohérence du résultat. Cependant cela entraîne aussi la disparition de cultures très peu présentes et donc de la part territoire associée. A partir de ces données l'algorithme maximise le potentiel agronomique de l'assolement de rotations généré. Avant le lancement de l'optimisation linéaire, l'utilisateur peut choisir d'obtenir un assolement de rotation sur l'ensemble du territoire ou bien par UCS. Il peut aussi choisir de prendre en compte les types d'exploitation. On obtient au final un assolement de rotation unique par type d'exploitation et/ou par UCS

L'utilisateur a accès au nombre de séquences présentes dans chaque UCS, il peut donc choisir de négliger certaines UCS, si elles ne contiennent pas un nombre suffisant de séquences pour que l'assolement de rotations obtenu soit fiable. Il est conseillé en première approche de ne garder que les UCS contenant un nombre de séquences au moins égal à 1 % du nombre total de séquences présentes sur le territoire, ce qui a été réalisé pour l'étude. Ce seuil devra être validé ou modifié après des tests de sensibilité.

4.3.2. Données d'entrées de RPG Explorer

Données RPG :

Pour chaque année le RPG est composé de trois fichiers : un fichier de formes (.shp) contenant les données géographiques du contour des îlots et les identifiants associés à chacun d'eux, un fichier de données sémantiques (.csv) de description générale des îlots et un deuxième fichier de données sémantiques (.csv) des cultures (parcelles) de chaque îlot. Notons que seuls les îlots sont matérialisés dans le fichier de données géographiques.

Pour l'étude en Alsace, les données RPG des deux secteurs étudiés sont de 2009.

Le territoire d'étude du Sundgau contient environ 59 000 îlots, représentant une surface totale d'un peu plus de 126 480 ha. La taille moyenne des îlots est de 2,1 ha pour ce secteur. Les surfaces minimales et maximales sont respectivement 0,01 et 106,14 ha.

Le secteur du Kochersberg-Vallée Zorn contient environ 65 500 îlots, représentant une surface totale d'environ 86 330 ha. La taille moyenne des îlots étant de 1,3 ha. Les surfaces minimales et maximales sont respectivement 0,01 et 53,73 ha.

Le RPG a certaines limites, un îlot peut posséder plusieurs parcelles et donc plusieurs cultures dont la localisation au sein de l'îlot ne sont pas connues. Certaines cultures sont confondues sous la même nomenclature (cultures industrielles, maïs ensilage et grain par exemple). L'irrigation n'est pas un critère obligatoire lors de la déclaration par les agriculteurs. Les îlots n'ont pas les mêmes identifiants d'une année sur l'autre. La géométrie des îlots et le nombre de parcelles qu'ils contiennent peuvent changer d'une année sur l'autre (Vigot, 2011).

Données RGA :

Le recensement agricole est réalisé tous les 10 ans en France. Il permet d'avoir une photographie précise et actualisée de l'agriculture à un moment donné et de mieux connaître et mesurer ses évolutions. Les données sont disponibles à la commune et sont anonymes. Le dernier RGA disponible est celui de 2010. Cette source de données permet de connaître les cultures en place et les superficies cultivées, l'élevage et le cheptel, les modes de protection des cultures, l'équipement des exploitations, la diversification des activités, le niveau de formation de l'exploitant, la gestion de l'exploitation,... (Ministère de l'Agriculture, 2009)

Typologie des exploitations agricoles :

L'outil RPG Explorer nécessite des données relatives aux types des exploitations agricoles (EA) présentes sur les deux territoires d'étude. En effet, une des étapes d'intégration des données dans l'outil consiste en l'intégration d'une typologie des exploitations pour les deux secteurs. Actuellement, il n'y a pas d'arbre typologique disponible pour la région Alsace, nous avons pour cela créé des classes de type d'agriculteurs à partir de la méthode des nuées dynamiques sur la base des assolements des groupes de culture RPG des exploitations (la taille des îlots n'est pas prise en compte) par rapport aux modes de fonctionnement. C'est une méthode dont le but est de diviser des observations en K partitions (clusters) dans lesquelles chaque observation appartient à la partition avec la moyenne la plus proche.

Nous avons obtenu sept types d'exploitations différentes pour les deux secteurs d'étude à partir de cette méthode (Tableaux 3 et 4) :

Kochersberg – Vallée de la Zorn :

Tableau 3: Type d'exploitation identifiée pour FKfZ

Classe	Type d'exploitation agricole	Initial	Nombre d'EA (Total : 1621)
Classe 1	Grandes cultures, maïs non dominant, céréales à pailles majoritaires	CB	147
Classe 2	Agri- Viticulteurs	AV	29
Classe 3	Eleveurs avec fortes proportions de prairies	EC	318
Classe 4	Divers, non classé	D	3
Classe 5	Grandes cultures, orientées cultures industrielles et spéciales	CI	193
Classe 6	Grandes cultures, maïs non dominant, céréales à pailles minoritaires	CMB	497
Classe 7	Grandes cultures, maïs dominant non irrigué	CM	434

Sundgau :

Tableau 4: Type d'exploitation identifiée pour SEV

Classe	Type d'exploitation agricole	Initial	Nombre d'EA (Total : 1247)
Classe 1	Elevage et herbe	EH	176
Classe 2	Elevage et cultures	EC	545
Classe 3	Grandes cultures, maïs non dominant	CB	66
Classe 4	Grandes cultures, maïs dominant non irrigué	CM	446
Classe 5	Divers, non classé	DG	3
Classe 6	Divers, non classé	DL	7
Classe 7	Divers, non classé	DO	4

Base de données Sol Alsace et les contraintes associées aux cultures :

L'outil RPG Explorer nécessite des paramètres d'entrée relatifs aux types des sols des deux secteurs d'étude. Les informations nécessaires concernent :

Les paramètres des sols : pour tous les types de sol présents dans les deux secteurs, les paramètres concernant : le pourcentage en argile, de cailloux, de carbonate de calcium, de réserve utile en eau, l'excès d'eau et si un drainage est effectué.

La notation des cultures: les contraintes, en fonction des paramètres des sols (pourcentage en argile, carbonate de calcium, cailloux, la réserve utile,...), sont définis par une note (0 ou 1) attribuée pour chaque culture, en fonction de la compatibilité des critères qui ont été défini.

Les rotations et irrigation : pour chaque rotation et par types d'exploitation agricole dans chaque secteur, le recours à l'irrigation a été défini à partir des pratiques issues de la base de données Agri-Mieux qui enregistre les pratiques.

Les territoires, irrigation et drainage : pour chaque territoire (UCS) dans les deux secteurs, le recours à l'irrigation et le drainage ont été définis à partir des pratiques issues de la base de données Agri-Mieux.

Les territoires, sols et proportions : au sein de chaque territoire, la proportion des surfaces par UTS (type de sol) a été renseignée à partir de la base de données des sols.

Tableau et valeurs agronomiques des précédents/suivants (pour l'optimisation linéaire)

Les notes des précédents/suivants vont de 1 à 10 en fonction de leur correspondance entre culture. Par exemple, un blé sera mieux valorisé après la culture du colza (note de 10) que le maïs

grain (note de 4). Cela est entre autre lié aux mycorhizes (association entre un champignon et la racine d'une plante). En effet, les crucifères (colza, navette,..), ou les betteraves sucrières n'effectuent pas la mycorhization. Le blé et le maïs grain sont des cultures effectuant la mycorhization. Le blé étant moins sensible aux effets de cette association sera privilégié par rapport à la culture du maïs grain, qui elle, plus sensible à cet effet dépressif, aura une tendance à avoir un manque de certains éléments nutritifs (alimentation phosphatée) apportés par le champignon (Pousset, J., 2006). Ces notes sont traduites dans le tableau situé en Annexe G . Il a été adapté au contexte alsacien par l'ARAA.

4.4. Simeos-AMG : Simulation de l'état organique du sol

La mise en œuvre des réseaux d'observation est limitée par leur coût et leur durée. Ainsi, pour l'évaluation des politiques affectant la gestion des sols et les stocks de carbone, le recours à la modélisation est nécessaire pour compléter et extrapoler les mesures directes. Des outils ont été développés pour être appliqués à l'échelle de territoire.

4.4.1. Principe de Simeos-AMG

Simeos-AMG est un outil de SIMulation de l'Etat Organique des sols fondé sur le modèle AMG. L'outil a été réalisé dans le cadre du projet « Gestion et Conservation de l'Etat Organique des Sols » (GCEOS), mené à Agro-Transfert Ressources et Territoires en 2004.

L'outil calcule les entrées et pertes annuelles de carbone du sol en se basant sur les données du système de culture ainsi que des caractéristiques du sol, de la parcelle et du climat local. Pour cela, il utilise un modèle de bilan humique développé par l'INRA de Laon, permettant de simuler l'état organique dans les couches travaillées et non travaillées du sol. On obtient en données de sortie, des courbes d'évolution des stocks et teneurs en carbone organique du sol d'une parcelle. Ces données permettent de visualiser l'effet à moyen et long terme d'un système de culture, dans un sol et sous un climat donnés, en fonction de l'état organique initial de ce sol. Il permet également de réaliser des comparaisons de scénarios, c'est à dire de confronter sur les mêmes graphiques, les cinétiques d'évolution des stocks de C organique d'une part, des teneurs en C organique de la couche de sol travaillée d'autre part, pour différents scénarios agronomiques à comparer. C'est un outil d'aide à la décision pour avoir une meilleure gestion de l'état organique des sols cultivés par le choix des pratiques favorables à une amélioration du statut organique du sol ou pour répondre à certaines problématiques agronomiques (exportation ou importation des pailles à la parcelle, choix des produits organiques à apporter, profondeur de travail du sol,...).

Il s'agit d'un outil d'échange entre conseillers et agriculteurs pour aider à la décision sur le mode de gestion de l'état organique du sol à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation, en visualisant rapidement l'effet d'un changement de pratiques culturales (Agrotransfert, 2011).

4.4.2. Données d'entrées

Données liées aux pratiques agricoles :

- Base de données Agri-Mieux :

Dès les années 90, les concentrations élevées de nitrates dans les eaux (notamment les eaux souterraines qui en Alsace sont utilisées pour l'eau potable) rend nécessaire une animation de terrain et une évolution des pratiques agricoles. Cela s'est traduit par la mise en place de 8 opérations Agri-Mieux en Alsace, couvrant la totalité de la zone vulnérable (Fert'III, Piémont eau et territoires, Ferti Zorn, Ferti Kochersberg et Ferti Nord Alsace, Hardt eau vive, Colline eau et terroirs et Sundg'eaux vives). Ces opérations occupent une superficie de 218 500 ha et concernent près de 8 490 exploitations (AERM, 2010).

Le fonctionnement de ces opérations, animées chacune par un conseiller agricole, est basé sur 3 axes : la démonstration et expérimentation sur le terrain des recommandations techniques et élaboration de références agronomiques, la communication des messages à tous les agriculteurs du secteur par le biais de courriers, de fiches (conseils en grandes cultures et en vigne) ou de cahiers techniques et enfin, l'animation, visites de réalisations, réunions d'informations (CA Alsace, 2009). :

Les actions de conseil sont évaluées à un intervalle de 4 à 5 ans par opération par une entité indépendant. En Alsace c'est l'ARAA qui effectue les évaluations à travers des enquêtes auprès des agriculteurs concernant les pratiques de fertilisation et de traitement des cultures. Les résultats des enquêtes (60 par évaluation) sont stockés dans une base de données qui permet d'analyses l'évolution des pratiques agricoles par type d'exploitation et par type de sol.

Cette base de données est utilisée pour caractériser par type d'exploitation, les pratiques concernant les apports de Produits Résiduaux Organiques (PRO) (nature des matières organiques (MO), fréquence et dose, culture recevant la MO) sur les cultures, la gestion des résidus de culture (restitution ou exportation), rendements des cultures par type de sol.

- **Règles de décision pour associer des pratiques à des rotations :**

Pour l'utilisation de SIMEOS, il est nécessaire d'associer aux rotations déterminées avec RPG Explorer, pour les deux secteurs d'étude, les paramètres suivants: rendements des cultures, les fréquences de restitutions des résidus, travail du sol (labour / non labour), la profondeur de labour, l'irrigation, les fréquences des Cultures Intermédiaires (CI), la biomasse des CI, la nature des CI, les cultures dérobées, la nature des apports organiques, les doses apportées, les fréquences des apports organiques.

Pour déterminer ces paramètres, nous nous sommes basés sur les données statistiques issues des enquêtes des opérations d'évaluation de la BD-Agri-Mieux de 2010. Pour quelques pratiques, étant donné l'importance des informations à disposition dans la BDD, nous avons établi des règles de décisions. Pour chacune de ces pratiques, une distinction a été réalisée pour les types d'exploitation agricole (EA) en distinguant les éleveurs des céréaliers:

- Restitutions des résidus : une sélection a tout d'abord été réalisée dans la BDD Agri-Mieux pour fournir les surfaces de toutes les cultures à pailles par secteur et type d'EA. Ces surfaces ont ensuite été ramenées à des pourcentages par type d'EA et de type de résidus, pour obtenir au final une fréquence de restitution des résidus par secteur pour chaque type d'EA et pour chaque type de culture à paille.
- Les rendements : ils ont été attribués à partir des analyses faites par l'ARAA dans le cadre des projets MoNit et LOGAR (Van Dijk et Burtin, 2011) qui visent à la modélisation du lessivage des nitrates dans le fossé rhénan supérieur. Les données mobilisées incluent (a) les rendements publiés dans les rapports annuels de 1980 à 2000 des centres de gestion des chambres d'agriculture, (b) les rendements départementaux publiés dans les statistiques agricoles annuelles (SAA) de 1989 à 2010, et (c) les rendements issus de la base de données Agri-Mieux contenant les résultats de nombreuses enquêtes auprès des agriculteurs à partir de l'année 2002.
- Cultures intermédiaires : introduction aléatoire dans l'outil des cultures de moutarde (à 60 % en fonction des surfaces) ou mélange d'espèces (à 40 % en fonction des surfaces) après une culture d'hiver, d'après la base de données issue des enquêtes AgriMieux.

Ces informations sont détaillées dans le Tableau 5 ci-dessous :

Tableau 5: Données d'entrées pour Simeos-AMG par culture principale concernant la restitution des résidus, l'introduction de culture intermédiaire et les rendements des cultures

Culture principale	Restitution des résidus (0 :exporté ; 1 :restitué)		Culture intermédiaire (après la culture principale)	Rendement culture principale (*)
	Céréaliers	Eleveurs		
Maïs grain	1	1	non	105 qtx/ha
Maïs ensilage	0	0	non	18 T MS/ha
Blé d'hiver	0,1	0	oui	75 qtx/ha
Escourgeon – Orge d'hiver	0,2	0,05	oui	64 qtx/ha
Betterave sucrière	1	1	non	88 T/ha
Colza d'hiver	1	1	oui	36 qtx/ha
Luzerne	0	0	non	4,3 T MS/ha

(*) : Valeurs indicatives des rendements définies en fonction du type de sol, source : Base de données issue enquêtes Agri-Mieux et Base de données Logar.

- Labour et profondeur de labour : labour systématique avec une profondeur de 27 cm (défini à partir des données des profils culturaux de l'ARAA).
- Apport de matières organiques (nature, dose et fréquence) : de même que précédemment, une sélection a tout d'abord été réalisée à partir de la base de données Agri-Mieux pour obtenir les différents types de MO apportées, par secteur, par type d'EA, avec la quantité apportée et la fréquence. La quantité de type de MO étant trop importante, une sélection a été établie pour n'avoir que les MO majoritaires (c'est-à-dire le plus souvent apportées sur le plus grand nombre de surface par type d'EA). Cinq types de MO ont été retenus par type d'EA et par secteur. Sachant que les unités pour les doses apportées diffèrent en fonction du type de MO (lisier, fumier,...), un coefficient iso-humique a été créé, à dire d'experts, dans le cadre de notre étude. Ce coefficient permet de traiter les doses des différents types de MO dans la même unité. Une sélection a également été établie sur les cultures recevant un apport organique. Le choix des cultures a été fait de la même manière que pour le type de MO (c'est-à-dire la culture où un apport est réalisé le plus souvent sur le plus grand nombre de surface par type d'EA). Trois cultures ont été retenues par type d'EA et par secteur. Avec ces modifications, l'ensemble des données a pu être traité pour obtenir par type de MO, la quantité apportée, la fréquence d'apport, par culture, par type d'EA et par secteur (Cf. Tableaux 6, 7 et 8).

Tableau 6: Type, dose et paramètres du modèle pour la matière organique

Type MO	Type EA	Teneur Corg (*)	Coefficient isohumique (*)	Dose MO (**)	
				FKFZ	SEV
Fumier bovin litière		90 T/ha	0,36	39 T/ha	36 T/ha
Fumier bovin paille		90 T/ha	0,42	37 T/ha	39 T/ha
Lisier bovin		26 m ³ /ha	0,2	38 m ³ /ha	36 m ³ /ha
Boues Step		30 T/ha	0,1	16 T/ha	
Lisier porc		10 m ³ /ha	0,15	40 m ³ /ha	
Compost de boues		164 T/ha	0,5		14 T/ha
Fumier bovin composté		110 m ³ /ha	0,5		29 m ³ /ha

(*) : Valeurs issues de sources personnelles, avis d'expert (Annie Duparque, 2014).

(**) : Valeurs moyennes issues de la base de données des enquêtes AgriMieux (ARAA, 2014).

Tableau 8: Fréquence des MO en fonction de la culture et du type d'EA pour le secteur FKZ

FKZ (*)		
Type MO	Céréaliers	Eleveurs
Maïs grain		
Fumier bovin litière		0.2
Fumier bovin paille	0.07	0.43
Lisier bovin		0.25
Boues Step	0.3	
Lisier porc	0.32	
Maïs ensilage		
Fumier bovin litière		0.36
Fumier bovin paille		0.35
Lisier bovin		0.35
Blé d'hiver		
Fumier bovin paille	0.39	
Lisier bovin		0.28
Lisier porc	0.1	
Betterave sucrière		
Fumier bovin litière		0.39
Fumier bovin paille		0.5
Boues Step		
Lisier porc	0.24	

Tableau 7: Fréquence des MO en fonction de la culture et du type d'EA pour le secteur SEV

SEV (*)		
Type MO	Céréaliers	Eleveurs
Maïs grain		
Fumier bovin litière	0.16	0.76
Fumier bovin paille		0.38
Lisier bovin		0.34
Compost boues	0.12	
Fumier bovin composté	0.05	
Maïs ensilage		
Fumier bovin litière		0.98
Fumier bovin paille		0.17
Lisier bovin		0.44
Blé d'hiver		
Fumier bovin paille		
Lisier bovin		0.12
Fumier bovin composté		
Betterave sucrière		
Fumier bovin litière		
Fumier bovin paille		
Compost boues	0.15	
Fumier bovin composté	0.06	
Ray grass d'Italie		
Lisier bovin		0.78

(*) : Les fréquences sont exprimées en nombre d'apport en MO moyen par an (ex : 0,33 = un apport de MO tous les 3 ans), source : Base de données issues des évaluations AgriMieux (ARAA, 2014)

Les données liées au sol :

Les données liées au sol sont issues du Référentiel Régional Pédologique (RRP). Il se décompose en pédopaysages ou Unités Cartographiques des Sols (UCS) qui sont représentées cartographiquement et présentées sur la Figure 8 ci-dessous. Ces UCS contiennent différents types de sols appelés « Unités Typologiques de Sols » (UTS). Les UTS ne sont pas spatialisées dans le RRP. Cependant, des éléments de description comme la géologie, la géomorphologie permettent de définir des grandes lois de distribution de ces sols au sein des pédopaysages. Les UTS sont définies par leur pourcentage d'extension au sein des UCS. Les caractéristiques de chaque UTS sont accessibles dans la base de données régionale sur les sols d'Alsace. Les paramètres décrits concernent des propriétés physico chimiques et des critères facilement identifiables sur le terrain (pierrosité, réaction à l'acide HCl, couleur). Les UTS sont définies par la succession d'une ou plusieurs strates et par leur organisation. Une strate représente la variation dans l'espace d'un horizon, ou d'un regroupement de plusieurs horizons (DONESOL, 2012). Dans le cas de l'étude, on ne travaille que sur la strate de surface. Ces données sont issues du travail du pédologue par expertise d'observation et mesures de terrain. Les UCS représentées sur une carte sont constituées chacune d'une ou plusieurs plages cartographiques. La taille de ces plages cartographiques (superficie, forme) et donc des UCS est liée à l'échelle de représentation. Les UCS définies sont soit des UCS simples, composées d'une seule Unité Typologique de Sols (UTS), soit des UCS complexes composées de plusieurs UTS. La pureté des UCS est fonction de l'échelle d'étude et/ou de représentation. A moyenne et petite échelles (1/50 000 à 1/250 000), les unités cartographiques sont le plus souvent complexes (hétérogènes), alors constituées de plusieurs UTS dont les contours individuels ne peuvent être représentés à l'échelle considérée ; par contre, leur mode d'organisation spatiale (chaîne, séquence, juxtaposition de sols, etc.) ainsi que leur pourcentage relatif de surface au sein de l'UCS sont définis (DONESOL, 2012).

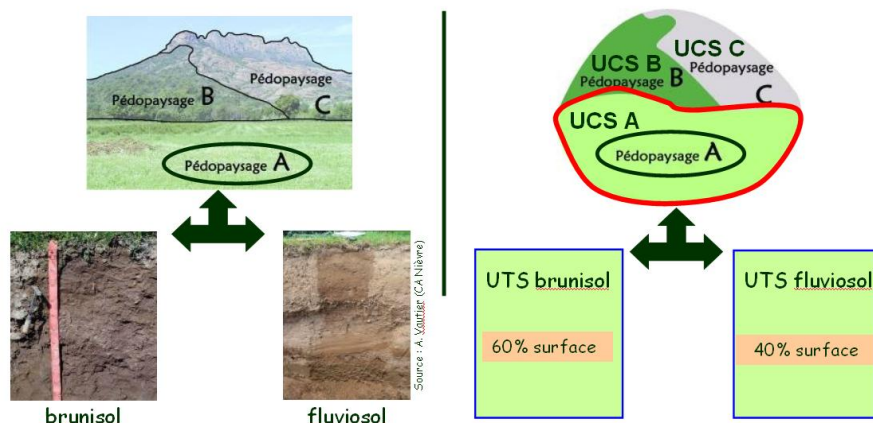


Figure 8: Composition d'une UCS en UTS pour décrire un pédopaysage

Source : Groupe de projet IGCS (2011)

La délimitation précise du territoire d'étude à partir du RRP, dans notre cas, représente une surface totale d'environ :

- pour le secteur Kochersberg-Vallée Zorn : 48 696 ha, 15 UCS et 70 UTS,
- pour le secteur Sundgau : 49 567 ha, 13 UCS et 40 UTS.

- **Données accessibles dans le RRP Alsace :**

L'outil nécessite des informations concernant le taux d'argile, de carbonate de calcium, la proportion de cailloux présents et la teneur en carbone organique initiale disponible dans le RRP Alsace et attribué pour toute les situations agronomiques.

- **Cas particulier de la densité apparente :**

Le modèle Simeos-AMG utilise la densité apparente. Cette information n'est pas disponible dans la base de données spatialisée du RRP Alsace et doit être estimée avec une fonction de pédotransfert (FPT)

Nous avons utilisé la FPT de Saxton et Rawls (2006) pour l'estimation de la densité apparente (DA). Cette fonction a été comparée aux autres FPT par Van Dijk (2013) et évaluée comme étant la plus cohérente en ce qui concerne la sensibilité à la texture et la teneur en matière organique.

Toutes les situations agronomiques obtenues avec RPG-Explorer sont ensuite associées à un état organique (teneur en MO et stock en Corg) sur du moyen et long terme via les simulations de l'outil Simeos-AMG. Ces résultats vont nous permettre d'étudier les différentes situations agronomiques par rapport à leur sensibilité potentielles à l'érosion ; pour cela, des indicateurs spécifiques à l'érosion sont utilisés.

4.5. Diagnostic de la sensibilité des systèmes de cultures à l'érosion

Dans notre étude, la troisième étape de la démarche méthodologique consiste en la réalisation d'un diagnostic permettant d'évaluer la sensibilité à l'érosion d'un sol par des indicateurs spécifiques.

Des travaux ont déjà été entrepris, tels que le modèle de perte des sols. C'est l'équation universelle des pertes en terre (USLE : Universal Soil Loss Equation), selon Wischmeier et Smith (1978), qui constitue le modèle le plus utilisé au monde pour évaluer et quantifier l'érosion des sols. L'érosion des sols est influencée par différents facteurs. Plusieurs tentatives ont été réalisées sur plusieurs années pour quantifier les effets de la pluie, du sol, du relief, de la végétation et des effets de l'aménagement du paysage. Une formule a été conçue pour estimer les pertes du sol, depuis plus de cinquante ans sur des données mesurées à partir de petites stations localisées aux Etats-Unis.

L'équation appelée Universal Soil-Loss Equation (USLE) permet d'isoler chaque variable et de réduire leurs effets à un chiffre. Elle regroupe toutes les variables sous six facteurs majeurs et prédit les pertes moyennes de sol au champ, pertes qui sont occasionnées par l'érosion de surface (érosion par l'impact des gouttes de pluie ou la battance, érosion en nappe et érosion en rigole) (Hudson, 1981). L'équation est présentée sous la forme ci-dessous :

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

Où A = perte annuelle moyenne du sol (T/ha/an)

R = indice d'érosivité potentielle de la précipitation (MJ mm/ha/h/an)

K = indice d'érodibilité du sol à l'érosion hydrique (T/ha/MJ/mm/ha/h)

L = facteur topographique du sol de la longueur de la pente

S = facteur topographique du sol du gradient de la pente

C = facteur d'occupation des sols et les pratiques culturales

P = facteur de conservation et d'aménagement

(Wischmeier et Smith (1978))

Les systèmes de cultures peuvent influencer les facteurs K et C , c'est pourquoi nous nous sommes reposés sur cette formule. Dans notre cas, pour étudier la sensibilité des sols à l'érosion, à l'échelle d'un territoire, nous nous sommes basés sur deux indicateurs : **l'indice d'érodibilité**, identique au facteur K , prenant en compte les aspects liés au sol (stabilité structural, sensibilité à la battance,...) et **l'indice d'exposition**, inspiré du facteur C , pour évaluer les aspects liés à la couverture du sol face à l'érosivité des pluies. L'association de ces deux indices va permettre de classer les situations agronomiques (obtenues avec les deux démarches précédentes : RPG Explorer et Simeos-AMG) en fonction de leur sensibilité. Le but dans cette étape étant de dissocier les situations agronomiques à sensibilité élevée d'érosion des autres situations, moins sensibles.

4.5.1. Indice d'érodibilité ($I_{\text{érod}}$)

Pour le choix d'un indice d'érodibilité plusieurs méthodes ont été testées pour analyser leur sensibilité à la matière organique en fonction du type de sol. Ces méthodes sont présentées en Annexe H (Document Réunion AgroParisTech, Chenu, Duparque, Van Dijk, 2014).

Les différentes méthodes testées sont :

- Indice de battance (Rémy et Marin-Lafèche, 1974)
- Soil stability factor b WEPP (Potter et al., 1990)
- Diamètre moyen pondéré (MWD) après désagrégation (humectation rapide) (Darboux et al., 2008)
- Macro-agrégats stables > 200 μm (Le Bissonais et al, 2007)
- K-factor USLE selon Wischmeier (Wischmeier, 1977)
- K-factor USLE selon Torri et al. (Torri et al., 1997)

Les méthodes K-factor USLE selon Torri et al. et l'indice de battance selon Rémy et Marin-Lafèche, semblent les plus pertinentes car elles évitent de travailler sur les sols à faibles risques d'érosion (sols de type sableux). Elles vont au-delà de la stabilité structurale, en effet elles intègrent l'ensemble des processus de battance, d'infiltrabilité, de résistance à l'arrachement et au transport par l'eau de ruissellement.

La méthode selon Torri et al. est plus sensible à la teneur en matière organique que l'indice de battance selon Rémy et Marin-Lafèche et permettra d'atteindre des objectifs de réduction d'érodibilité à travers des modifications de systèmes de culture. D'autant plus que l'augmentation de la stabilité structurale d'un sol est liée à la teneur en matière organique qui est reliée avec la teneur en argile d'un sol. Cette méthode semble donc la plus appropriée pour notre étude. La formule K-factor USLE selon Torri et al. (1997) est présentée ci-dessous:

$$K = 0,0293 (0,65 - D_G + 0,24D_G^2) \times e^{\{-0,0021 \frac{OM}{C} - 0,00037 \frac{OM^2}{C} - 4,02 C + 1,72 C^2\}}$$

Avec le coefficient de corrélation $r^2 = 0.41$ ($n=207$) et où D_G est défini dans l'équation (1), OM est traduit en pourcentage et C une fraction. K est en unité SI.

Avec $D_G = \log$ du diamètre géométrique moyen des particules :

$$D_G = \frac{-0,35C - 2,0L - 0,5S}{100}$$

Où C, L et S sont respectivement les pourcentages des trois classes texturales Clay (Argile), Loam (Limon) et Sand (Sable) et OM correspond à la matière organique.

D'après Vopravil, Janece et Tipp (2007) et Schwertmann et al., (1987), la classification des sols, par rapport à leur sensibilité à l'érodibilité, se fait en 5 classes (cf. Tableau 9):

Tableau 9: Classement des sols en fonction de leur sensibilité à l'érodibilité

Valeur de K	Classe
$K < 0.020$	Sol non érodible
$0.020 < K < 0.030$	Sol faiblement érodible
$0.030 < K < 0.040$	Sol moyennement érodible
$0.040 < K < 0.050$	Sol fortement érodible
$0.050 < K < 0.060$	Sol très fortement érodible

Source : Vopravil, Janecek et Tipp (2007)

Dans le cadre de notre étude, lors de la réunion se tenant à AgroParisTech (Chenu, Duparque, Van Dijk, 2014), nous avons déterminé une valeur seuil limite de la sensibilité potentielle des sols à l'érodibilité pour le K factor USLE selon Torri et al. (1997) fixée à **0,030**. Les sols étant au-dessus de cette limite sont donc considérés comme des sols à risque élevé d'érodibilité et les sols se situant en-dessous, à risque modéré voir faible. Ces choix ont été définis à partir de la Figure 9 présentée ci-dessous.

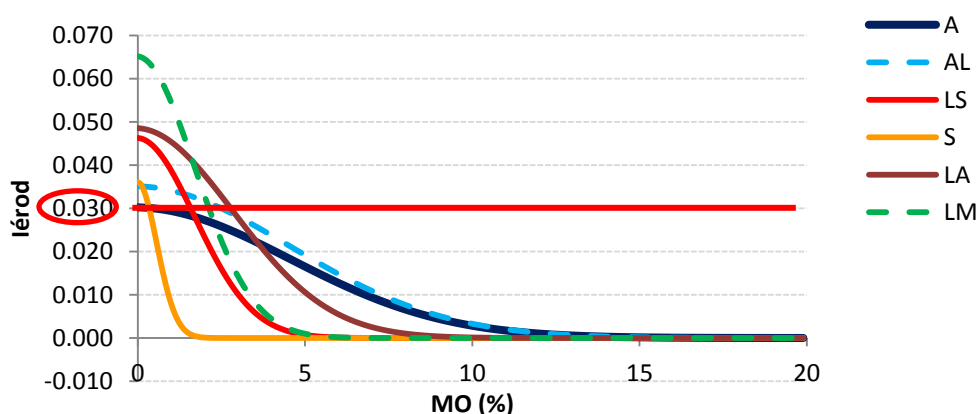


Figure 9: Indice d'érodibilité en fonction du pourcentage de matière organique et sensibilité aux textures du sol selon la classification GEPPA

Source : Document réunion AgroParisTech : Chenu, Duparque, Van Dijk (2014)

L'indice d'érodibilité est ensuite combiné à un indice prenant en compte l'exposition du sol à l'érosivité des pluies, l'indice d'exposition présenté ci-après, dans le but d'évaluer la sensibilité à l'érosion des situations agronomiques obtenues précédemment.

4.5.2. Indice d'exposition (I_{expo})

L'indicateur d'exposition de la surface du sol à l'érosivité des précipitations (ou indice d'exposition) permet de rendre compte du risque érosif lié à l'exposition de la surface du sol sur l'ensemble d'une rotation de cultures. Pour cela, il est nécessaire de croiser simultanément la dynamique de la couverture végétale (culture et résidus) avec celle de l'érosivité des précipitations (Van Dijk, 2014).

En effet, un sol ayant une érodibilité élevée n'est menacé par l'érosion que s'il est exposé aux forces érosives des précipitations. Ces forces érosives varient au cours de l'année selon le régime pluviométrique de la zone climatique concernée. Les périodes d'exposition de la surface du sol à ces forces sont fortement conditionnées par le système de culture et varient principalement selon (1) les stades de développement des cultures principales et intermédiaires présentes dans la rotation, et (2) la gestion des résidus de ces cultures et le travail du sol (exportation ou enfouissement, retournement par labour ou travail superficiel,...) (Van Dijk, 2014).

La démarche retenue pour cette étude est similaire à la conception du facteur C (culture) de l'équation générale des pertes en terre (USLE ; Wischmeier et Smith, 1978) qui est obtenu par la somme des « soil loss ratios » mensuels (slr_m) pondérés par l'érosivité des pluies mensuelles R_m sur l'érosivité annuelle (R_{tot}) :

$$C = \sum_{m=1}^{12} (slr_m \frac{R_m}{R_{\text{tot}}})$$

Du fait que nous ne disposons pas des valeurs slr et R mensuelles pour l'Alsace, un indicateur composite « exposition » (I_{expo}) a été conçu, reposant sur des idées similaires et sur des données disponibles. I_{expo} est composé d'une part d'un indice d'érosivité des précipitations et d'autre part d'un indice prenant en compte l'effet de la couverture végétative sur la protection de la surface contre l'érosion. Les deux indicateurs sont calculés au pas de temps décadaire sur l'ensemble de la rotation (Van Dijk P., 2014).

Indice d'érosivité des précipitations (I_p) :

L'érosivité des précipitations est fonction de la quantité et de l'intensité des pluies. La dynamique au cours de l'année liée à la quantité peut être décrite en utilisant le coefficient pluviométrique relatif d'Angot (Peguy, 1970) qui peut être calculé à partir des sommes moyennes mensuelles (P_m) des précipitations sur la normale climatique (30 ans). Des valeurs de P_m sont publiées par Météo-France et donc gratuitement accessibles pour un grand nombre de stations en France. Le coefficient d'Angot (C_{angot_m}) est calculé comme le rapport entre la pluviométrie du mois P_m et la pluviométrie annuelle rapportée au mois (l'indice m représente le mois par la suite) :

$$C_{\text{angot}_m} = \frac{P_m}{\frac{\sum_{m=1}^{12} P_m}{12}}$$

La Figure 10 montre ces coefficients pour la pluviométrie du Sundgau et Ferti-Kochersberg/Ferti-Zorn (FKFZ). Pour les deux secteurs les précipitations sont plus abondantes dans la période mai à octobre, et relativement faibles en hiver, notamment de janvier à mars. Le contraste hiver-été est plus marqué pour FKFZ que pour le Sundgau. La courbe du Sundgau ressemble à un régime continental altéré (type I) selon la typologie de Gilbert et Franc (1997) et celle de FKFZ s'approche

plus au régime continental (type J) caractérisé par des pluies nettement plus abondantes en été qu'en hiver.

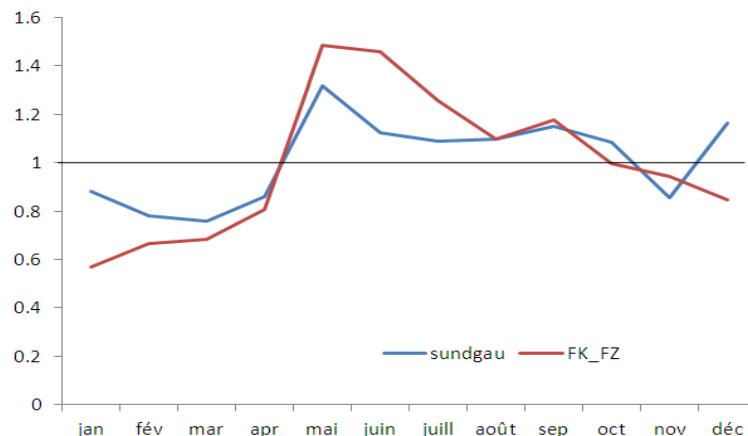


Figure 10: Coefficients d'Angot obtenus pour les deux secteurs d'étude

Source : Van Dijk (2014)

Effet de la couverture végétale sur l'érosion (f_c) :

L'effet d'une couverture végétale sur l'érosion est généralement décrit par une équation de forme exponentielle négative (Langdale et al., 1991) :

$$f_c = e^{-b c}$$

avec :

f_c : facteur décrivant l'effet de la couverture végétale sur l'érosion

→ $f_c = 1$: pas d'effet, $f_c = 0$: érosion réduite à zéro

c : part de la surface couverte par des parties végétatives

b : coefficient lié à la structure spatiale de la végétation (sarclée ou non, densité et écartement des pieds, et l'architecture des plantes (hauteur et structure des feuillages)) ; valeurs allant de 2.5 à 7 environ avec des valeurs élevées pour des céréales à paille à densité des pieds élevée, et des valeurs faibles pour des cultures sarclées à densité de pieds faible (Laflen et al., 1980 ; Laflen et Colvin, 1981 ; Dickey et al., 1983).

La Figure 11 montre la forme de l'équation pour différentes cultures et le Tableau 10 donne les valeurs du coefficient structural (b) utilisées pour établir cette figure. Elle montre que pour un même pourcentage de la surface couverte, l'efficacité pour réduire l'érosion n'est pas la même selon la culture : une couverture uniformément dispersée sur la surface est plus efficace pour réduire l'érosion qu'une couverture organisée en ligne. Puis l'efficacité diminue avec la distance entre les feuilles et le sol. Nous avons attribué une valeur de b très faible aux pommes de terres pour faire sortir l'effet « collecteur d'eau » des sillons entre les buttes, qui continue à fonctionner même en cas de fortes couverture du sol de la culture.

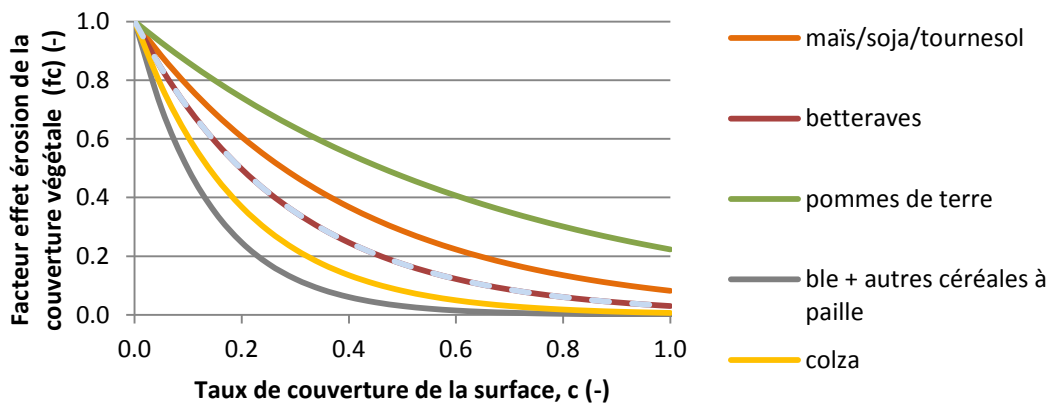


Figure 11: Facteur décrivant l'effet de la couverture végétale sur l'érosion (f_c) en fonction de la part de la surface couverte par la végétation (c) et la culture

Source : Van Dijk (2014)

Tableau 10: Valeurs du coefficient structural, b, par culture. Ces valeurs ont été déterminées en s'appuyant sur la littérature et complétées par expertise (ARAA)

Culture	b (coefficient structural de la culture)
maïs/soja/tournesol	2.5
betteraves	3.5
potatoes	1.5
blé et autres céréales à pailles	7
colza	5
colza (semé en ligne)	3.5
autres	3.5

Source : Van Dijk (2014)

La couverture par décade pour les différentes cultures est disponible en forme de tableau dans l'outil INDIGO (Bockstaller et Girardin, 2007) pour trois niveaux de précocité de semis. Cela a permis de calculer la valeur de f_c par décade pour chaque culture pour chacune des précocités. La Figure 12 montre l'exemple de f_c au cours de l'année pour 4 cultures et une précocité de semis moyenne.

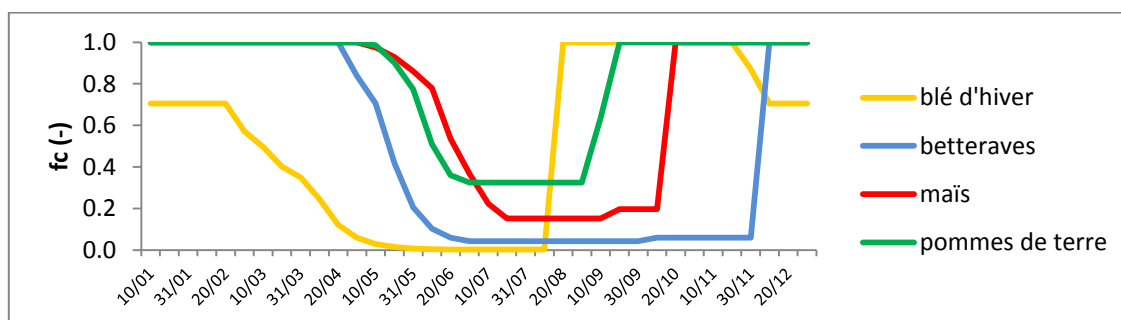


Figure 12: Exemple de f_c par décade pour 4 cultures et une précocité de semis moyenne

Source : Van Dijk (2014)

Croisement de I_p et f_c par décade : calcul de l'indicateur d'exposition I_{expo} :

Le calcul de l'indicateur d'exposition passe d'abord par un calcul par culture individuelle et puis par une approche à l'échelle de la rotation.

I_{expo} par culture :

Comme le montre la Figure 12, les tables d'INDIGO par rapport à la couverture par la culture ne concernent que la couverture par les plantes. Après la récolte, la couverture tombe à zéro. En réalité il reste souvent des chaumes pendant quelque temps avant un éventuel enfouissement, et derrière les cultures d'hiver il y a souvent le semis d'une culture intermédiaire qui va aussi couvrir le sol en fonction de son développement. Ceci rend la couverture du sol dans la période après les récoltes peu prévisible car elle est fonction de la conduite de la parcelle. Pour simplifier notre démarche on fait l'hypothèse que le sol reste relativement bien couvert dans la période d'août à septembre pour la plupart des situations : soit parce que la culture n'est pas encore récoltée (maïs, betteraves), soit parce que le sol est couvert par les résidus de culture et/ou la culture intermédiaire (réglementaire dans le cas des cultures récoltées avant le 1 septembre). De ce fait, le risque d'érosion est faible dans cette période d'été malgré l'érosivité encore assez forte. Une deuxième hypothèse concerne les mois d'octobre à mars dans lesquels les problèmes d'érosion sont très peu fréquents en Alsace. Ceci est pour une large part dû à l'érosivité relativement faible des pluies pendant cette période (Figure 10) et l'état rugueux des parcelles suite aux déchaumages ou labours (Van Dijk, 2014).

C'est pourquoi l'indicateur d'exposition a été calculé uniquement sur la période d'avril à juillet (décades 10 à 20) selon :

$$I_{expo}(culture) = \sum_{dec=10}^{20} (f_c I_p)$$

Cette solution a été choisie pour des raisons pragmatiques, notre ambition future est d'améliorer la démarche pour obtenir un indicateur qui prend en compte l'ensemble de l'année. Cette amélioration est indispensable pour garantir la pertinence de la démarche dans des contextes agro-climatiques autres que celui de l'Alsace.

La Figure 13 montre l'indice d'exposition pour les cultures individuelles pour le secteur FKfZ. Les résultats obtenus pour le Sundgau sont assez similaires.

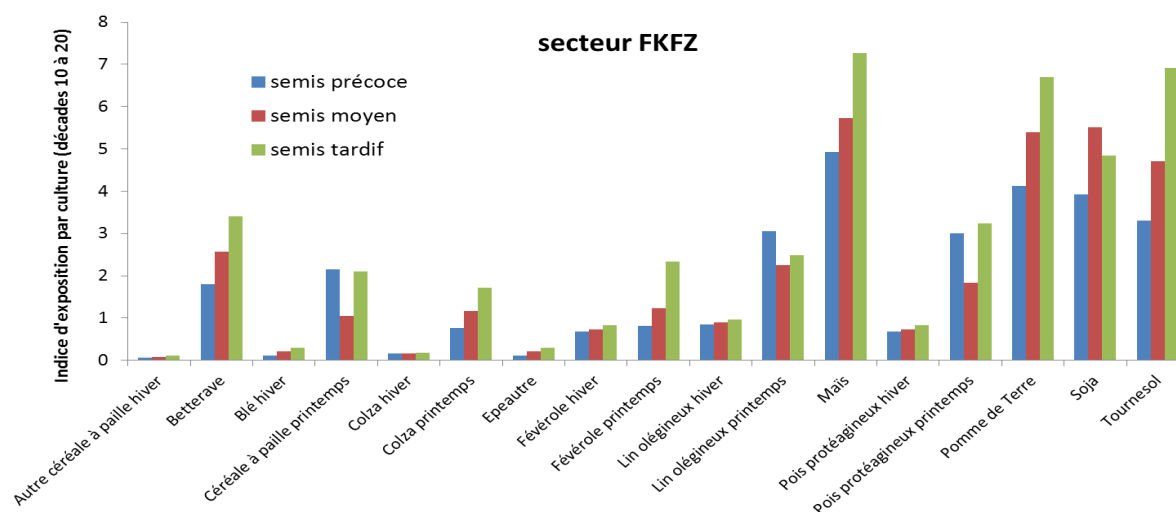


Figure 13: L'indice d'exposition (décades 10 à 20, et conditions climatiques du secteur FKfZ) pour les cultures individuelles dont les couvertures sont renseignées dans INDIGO®

Source : Van Dijk (2014)

La Figure 13 montre également que, dans la période considérée d'avril à juillet, les sols sous cultures de printemps sont fortement exposés à l'érosivité des pluies et les cultures d'hiver peu. L'indicateur montre des nuances intéressantes à l'intérieur de ces deux groupes : par exemple les betteraves et les céréales de printemps sont moins à risque que le maïs, les pommes de terre, le soja et le tournesol. Le deuxième aspect intéressant est l'importance de la date de semis pour les cultures

de printemps. On observe une réduction de 25 (maïs) à 50 % (tournesol) de l'indice entre un semis tardif et précoce. La date de semis peut alors être considérée comme un levier d'action potentiel non négligeable mais son applicabilité est fonction des conditions météorologiques.

I_{expo} sur l'ensemble de la rotation

Pour obtenir l'indicateur d'exposition sur l'ensemble de la rotation, nous avons choisi de calculer la valeur moyenne de l'indice d'exposition par culture (somme des valeurs par culture, divisées par le nombre d'années de la rotation) du secteur concerné (comme affichés dans la Figure 13 pour FKfZ par exemple) et puis d'exprimer le résultat comme fraction de la valeur maximale des cultures individuelle :

$$I_{expo \text{ rotation}} = \frac{\sum_1^n I_{expo \text{ culture}}}{\max(I_{expo \text{ culture}})}$$

De cette façon, la rotation de cultures la plus exposée aux forces érosives de la pluie obtient la valeur 1, toutes les autres rotations ont une valeur inférieure à cette situation « worst case ». Le Tableau 11 montre quelques exemples.

Tableau 11: Quelques exemples de l'indicateur d'exposition à l'échelle de la rotation (conditions climatiques FKfZ)

Rotation	I _{expo} (culture), moyenne	I _{expo} (rotation)
Mgr (mono)	5.72	1.00
Mgr_Mgr_Mgr_Blé	4.35	0.76
Mgr_Mgr_Blé_Bett	3.56	0.62

Source : Van Dijk (2014)

La prise en compte des techniques culturales sans labour (TCSL) :

En cas de suppression de labour, une partie des résidus de la culture précédente va rester en surface et ainsi contribuer à réduire l'exposition du sol aux forces érosives de la pluie. Pour prendre en compte cette incidence du non labour sur I_{expo} nous faisons une hypothèse simplificatrice par rapport au taux de couverture par ces résidus au cours de la période entre les décades 10 à 20. La couverture totale n'égale pas la simple somme de la couverture par la culture et des résidus car ces couverts peuvent se superposer. Nous utilisons l'équation suivante pour estimer la couverture totale (cf Figure 14 : Exemple du fonctionnement de l'équation C_{tot} pour le calcul de la couverture totale composée de plusieurs couverts).

$$C_{tot} = C_c + C_r - C_c C_r$$

Avec :

- C_{tot} : couverture totale, résultante de deux couverts présents sur la parcelle (-)
- C_c: couverture par la culture (-)
- C_r : couverture par les résidus (-)

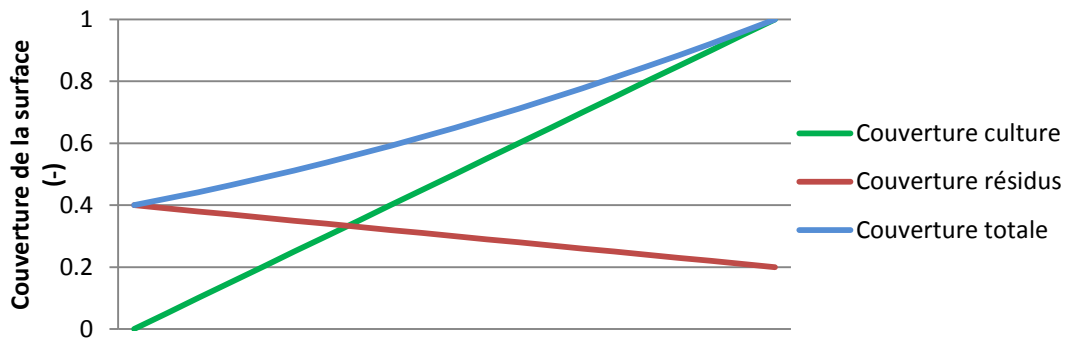


Figure 14: Exemple du fonctionnement de l'équation C_{tot} pour le calcul de la couverture totale composée de plusieurs couverts

Source : Van Dijk (2014)

Pour connaître la couverture par les résidus de culture précédente, nous avons utilisé l'indicateur de ruissellement de l'ARAA (Van Dijk et al., en prép) qui calcule C_r en fonction de la quantité de matière sèche à la récolte, du type et de la profondeur de travail du sol, et de la décomposition dans le temps. La décomposition est simulée avec l'approche de Grégory et al. (1985) et suit une cinétique de premier ordre (une équation exponentielle négative). L'équation calcule la matière sèche (MS) du jour t en fonction de la MS du jour $t-1$ et la température moyenne journalière, un indice d'humidité antécédente et le ratio C/N. Les valeurs de C_r ont été moyennées par décade (Figure 15: Couvert par les résidus de maïs grain en système sans labour. Un exemple de sortie de l'indicateur de ruissellement de l'ARAA (Van Dijk et al. En prép.) est croisé avec les valeurs décadaires de C_c pour estimer C_{tot} avec l'équation ci-dessus. Pour les systèmes de culture en non labour l'indice d'exposition est calculé en s'appuyant sur les valeurs de C_{tot} ainsi obtenues.

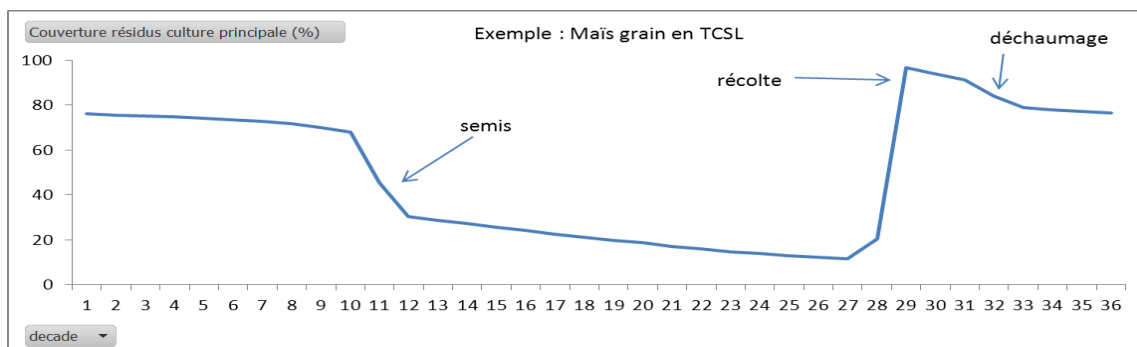


Figure 15: Couvert par les résidus de maïs grain en système sans labour. Exemple de sortie de l'indicateur de ruissellement de l'ARAA (Van Dijk et al., en prép.)

Source : Van Dijk (2014)

Une valeur seuil limite de l'indicateur d'exposition est fixée à **0,75**. Les sols étant au-dessus de cette limite sont donc considérés comme des sols ayant un très faibles taux de couverture et donc exposé aux forces érosives de la pluie. Les sols se situant en-dessous, ont un risque modéré voir faible. Ce seuil a été déterminé à partir d'un raisonnement pragmatique, à dire d'expert, pour avoir une part de surface suffisante concernée et non marginale pour l'étude.

4.5.3. Combinaison des indices d'érodibilité et d'exposition : Indice de sensibilité potentielle à l'érosion (I_{spe})

La combinaison des valeurs seuils, séparant la limite de sensibilité élevée des sols à l'érosion à modérée, pour les deux indices définis précédemment est représentée dans la Figure 16 ci-dessous :

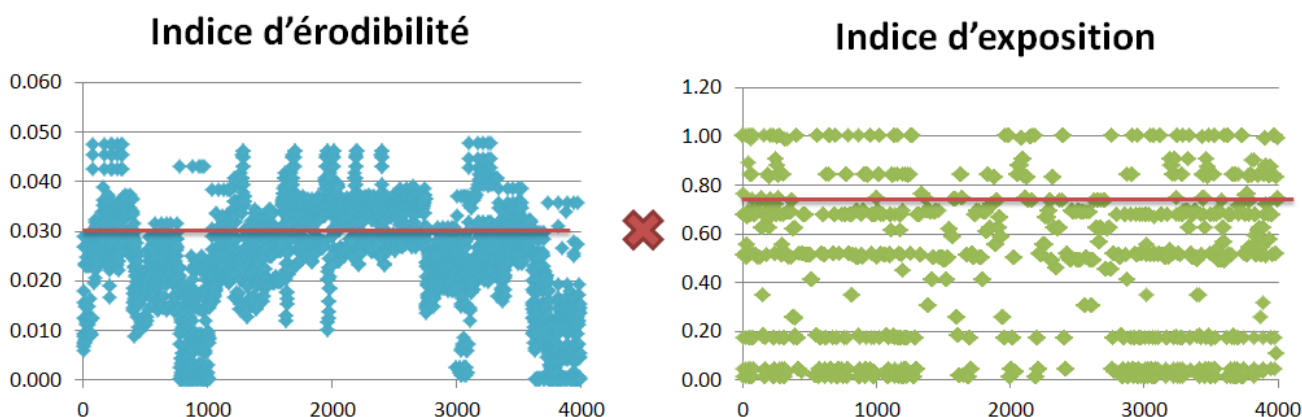


Figure 16: Combinaison des indices d'érodibilité et d'exposition pour le secteur de FKZ

Source : Documents réunion AgroParisTech : Chenu, Duparque et Van Dijk (2014)

Les points représentés sur la figure correspondent à une situation agronomique, c'est-à-dire la combinaison d'un type d'exploitation, un type de sol et d'une rotation dans un secteur défini. Les valeurs seuils limites pour les indices d'érodibilité et d'exposition sont identiques pour les deux secteurs d'étude :

Indice d'érodibilité: valeurs seuil > 0.03 (35 % des surfaces totales)

Indice d'exposition: valeurs seuil > 0.75 (40 % surfaces totales)

La combinaison de ces deux indices correspond à un nouvel indice : l'indice de sensibilité potentiel à l'érosion ou l'spe.

4.6. Conception de systèmes de culture alternatifs

Pour les situations agronomiques à risque potentiel d'érosion élevé, des mesures alternatives ont été testées pour limiter le risque d'érosion et pour arriver à un risque modéré de l'spe.

La grille de mesures anti-érosion à l'échelle de la parcelle (en Annexe I) a été développée dans le cadre de cette étude. Les différentes mesures retenues pour la grille sont issues du site internet AgroPeps qui est un outil web collaboratif d'informations techniques et d'échanges entre experts. Il est organisé en deux espaces : le premier est l'espace de connaissances qui met à disposition des techniques décrites sous forme de fiches et validées par plusieurs relecteurs issus d'organismes divers ; le deuxième est un espace d'échange sur les techniques existantes en agriculture. Il permet de lancer une discussion sur des informations non trouvées dans l'espace de connaissances (RMT Systèmes de culture innovant, 2013).

Cette grille précède la conception de systèmes de culture alternatifs avec un risque moindre d'érosion et de battance des sols. Pour chaque mesure, quatre paramètres ont été pris en compte concernant la pertinence de la mesure, la faisabilité (uniquement au niveau technique), l'acceptabilité sur le terrain pressentie et les effets collatéraux entraînés par la mesure (gestion des adventices,...).

La grille de mesure anti-érosion a été discutée avec des conseillers de la Chambre d'Agriculture Régionale d'Alsace et l'ARAA (Alves, Cugnère, Fritsch, Geist, Lebas, Michael, Rapp, Schaub, Van Dijk, 2014). Les systèmes de culture alternatifs à l'érosion qui découlent de cette grille prennent en compte les directives de la nouvelle PAC 2014-2020 qui prévoit une diversification des assolements avec une progressivité des obligations selon la surface en terre arable, c'est-à-dire les surfaces agricoles utiles soustraites aux prairies permanentes et aux prairies temporaires de plus de 5 ans avec les cultures pérennes (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2013).

- Pour les surfaces arables inférieures à 10 ha : pas d'obligation de diversification
- Les surfaces arables comprises entre 10 et 30 ha : obligation d'avoir deux cultures, dont la culture principale doit être inférieure à 75 % de la surface arable.
- Les surfaces arables supérieures à 30 ha : obligation d'implanter trois cultures, dont la principale doit être inférieure à 75 % de la surface arable et les deux plus importantes cultures doivent être inférieures à 95 % de la surface arable.

(Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2013)

Les mesures anti-érosion retenues dans la grille sont testées en fonction de trois modes de travail du sol différents. En effet le travail du sol a un impact non négligeable sur le taux de matière organique et de carbone dans le sol, illustré très clairement avec l'outil Simeos-AMG.

Le Tableau 12 présente l'exemple d'une rotation de cultures : Mg x Mg x Blé en labour systématique et non labour avec les mêmes modalités (type de sol, mode de restitution des résidus, rendement des cultures, poste climatique). Les valeurs sont plus en détaillées au cours du temps en Annexe J.

Tableau 12: Comparaison des résultats d'une simulation de Simeos-AMG en labour systématique et non labour

Travail du sol	Teneur en Matière Organique au bout de 10 ans (%)	Teneur en Carbone organique au bout de 10 ans (g/kg)	Stock à l'équilibre (T/ha)
Labour systématique	2.81	14.60	56.05
Non labour	4.72	23.59	60.43

On remarque que la teneur en matière organique au bout de 10 ans en système de non labour est quasi le double du système en labour (1.7 fois plus important). De même pour la teneur en carbone organique après 10 ans de pratique, la teneur en carbone en système de non labour est 1.6 fois plus important qu'en système de labour. Pour le stock à l'équilibre on remarque une différence de 4,38 T/ha en moins pour le système en labour comparé au système de non labour.

Il y a donc une corrélation des teneurs en matière organique et en carbone organique en fonction du travail du sol, avec un avantage pour la pratique en non labour. Cela peut être lié à la profondeur sur laquelle les résidus sont dilués en labour et en non labour, en effet, la pratique du labour enfouie les résidus en profondeur contrairement au système en non labour où les résidus restent en surface. Ces résultats sont encore plus marqués sur du long terme, après 100 ans de pratique (Annexe J).

4.7. Analyse multicritère

L'analyse multicritère sert à vérifier les performances des systèmes de culture conçus au niveau économique, environnemental et social. Un système de culture alternatif performant peut réduire l'érosion, mais peut être pénalisant pour l'agriculteur.

L'outil d'évaluation choisi ici est le calculateur Stephy, (Stratégies de protection des cultures Economes en produits PHYtosanitaires). Il a été élaboré dans le but de permettre une caractérisation rapide et multicritère de systèmes de culture à partir d'une description simple, afin de comparer les performances de systèmes de culture existants à celles de systèmes de culture plus économes en intrants qui pourraient les remplacer (RMT Systèmes de cultures innovants, 2010).

Nous avons utilisé cet outil pour analyser les différents systèmes de cultures sélectionnés pour leur sensibilité potentielle élevée à l'érosion ; il nous a permis de comparer les rotations initiales avec les rotations alternatives présentées dans la partie des résultats.

5. Résultats

5.1. Rotations de culture pour les différents types d'exploitation

Il s'agit des données de sorties de l'outil RPG Explorer. On y retrouve 7 types d'exploitations agricoles pour le secteur Kochersberg-Vallée de la Zorn et le Sundgau. Pour chaque type d'EA, on retrouve les pourcentages surfaciques pour chaque rotation obtenue par l'outil. Les rotations sont classées de façon à avoir les rotations de culture les plus représentatives en premier lieu pour chaque classe.

Secteur Kochersberg-Vallée de la Zorn (FKFZ) :

On remarque que les rotations sont bien toutes représentatives de la classe d'agriculteur définie. Par exemple, pour le type d'EA « Grandes cultures, dominante maïs non irrigué (CM) » présenté en Annexe K, la rotation principale est Mg-Mg-Mg-Mg-Mg-Blé représentant 60,51 % des surfaces pour ce type d'EA.

De même, pour le type d'EA « Eleveurs avec fortes proportions de prairies (EC) », la « rotation » principale est la prairie permanente (pp) représentant 32,15 % des surfaces pour ce type d'EA, suivie de la rotation Blé-Mg-Mg représentant 18,97 % des surfaces.

Secteur du Sundgau (SEV) :

On remarque que les rotations sont également toutes représentatives de la classe d'agriculteur définie. Par exemple, pour le type d'EA : « Elevage et herbe (EH) », la « rotation » principale est pp représentant 54 % des surfaces pour ce type d'EA.

5.2. Stocks et teneurs en carbone organique

Les évolutions obtenues sont fortement fonction des stocks et des teneurs initiales. La validité de ces valeurs initiales est extrêmement difficile à évaluer.

A partir des données de sortie de l'outil Simeos-AMG, le stock et le taux de carbone organique sont obtenus pour chaque situation agronomique à partir de l'état initial jusqu'à un état d'équilibre. Les données sont exprimées par décade jusqu'à 100 ans de pratique. Le fait de stocker du carbone organique permet de limiter la sensibilité à la battance et d'améliorer la stabilité structurale du sol. Des histogrammes permettant de visualiser s'il y a un stockage ou déstockage de carbone organique des différentes situations agronomiques ont été réalisés

Secteur FKFZ :

Les résultats pour le secteur FKFZ sont présentés ci-dessous sur les Figures 17 et 18.

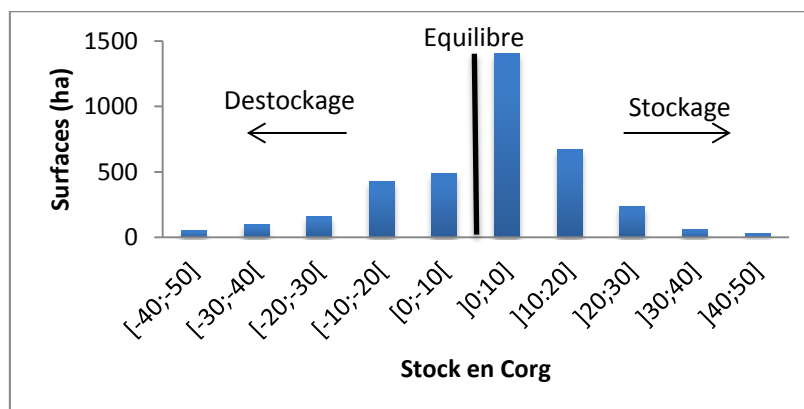


Figure 17: Stock à l'équilibre - Stock à l'état initial en Corg pour les différentes situations agronomiques dans le secteur FKFZ

On remarque que les surfaces concernées en stockage de carbone organique, pour le secteur FKFZ, représentent 2396 ha comparées aux surfaces en déstockage de Corg qui représentent 1228 ha. Le nombre de surfaces en stockage de Corg est 2 fois supérieur aux surfaces en déstockage. La plupart des surfaces en stockage se situent entre 0 et 10 T/ha de Corg, mais il y a environ 600 ha en stockage entre 10 et 20 T/ha.

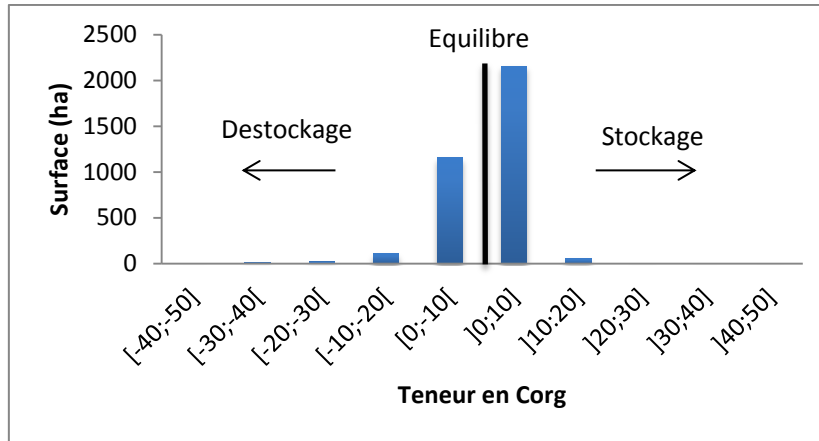


Figure 18: Teneur à l'équilibre - teneur à l'état initial en Corg pour les différentes situations agronomiques dans le secteur FKFZ

La plupart des surfaces sont en situation de stockage pour la teneur en Corg, c'est-à-dire 2212 ha sur les 3513 au total. Les teneurs en stockage sont en majorité situées autour de 1 à 10 g/kg de Corg.

Secteur du Sundgau (SEV) :

Les résultats pour le secteur du Sundgau sont présentés ci-dessous, dans les Figures 19 et 20.

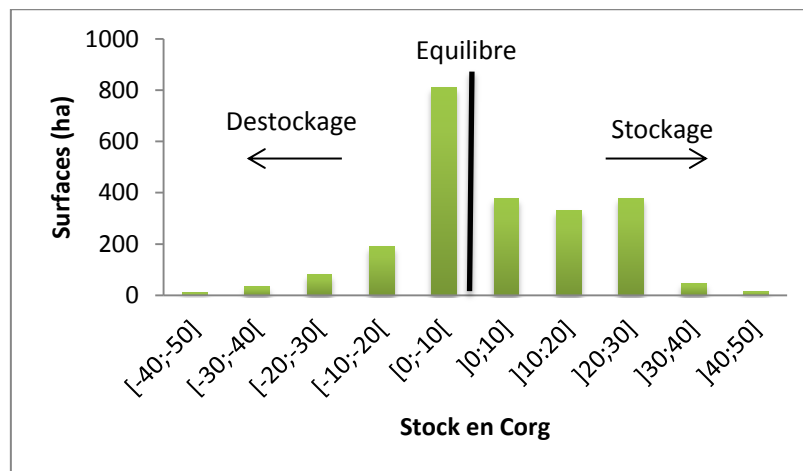


Figure 19: Stock à l'équilibre - stock à l'état initial en carbone organique pour les différentes situations agronomiques dans le secteur SEV

On remarque que les surfaces en stockage de carbone organique, pour le secteur SEV, représentent 1149 ha comparées aux surfaces en déstockage de Corg qui représentent 1123 ha. Dans l'ensemble on arrive à une moyenne autour de l'équilibre.

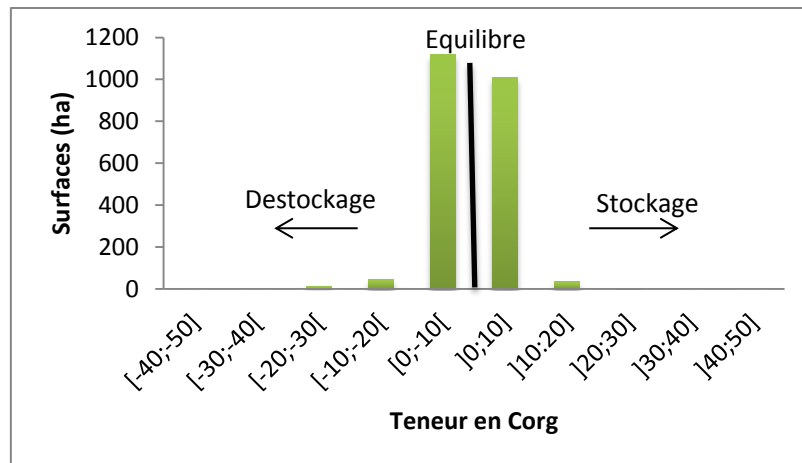


Figure 20: Teneur à l'équilibre - teneur à l'état initial en carbone organique pour les différentes situations agronomiques dans le secteur SEV

Comme précédemment, pour les teneurs en Corg, on retrouve un état d'équilibre, c'est-à-dire 1049 ha en situation de stockage et 1188 ha en déstockage. Les teneurs en stockage et déstockage sont en majorité situées autour de -10 à 10 g/kg de teneur en Corg.

5.3. Indices d'érodibilité et d'exposition combinés

Des graphiques présentant la sensibilité potentielle à l'érosion distinguant les situations en stockage de Corg, en déstockage ou en équilibre. Les données utilisées pour obtenir ces figures sont les teneurs en Corg à l'état initial et à l'équilibre issues des sorties de l'outil Simeos-AMG, pour chaque situation agronomique.

Secteur FKfZ :

La Figure 21 représente les situations agronomiques du secteur FKfZ

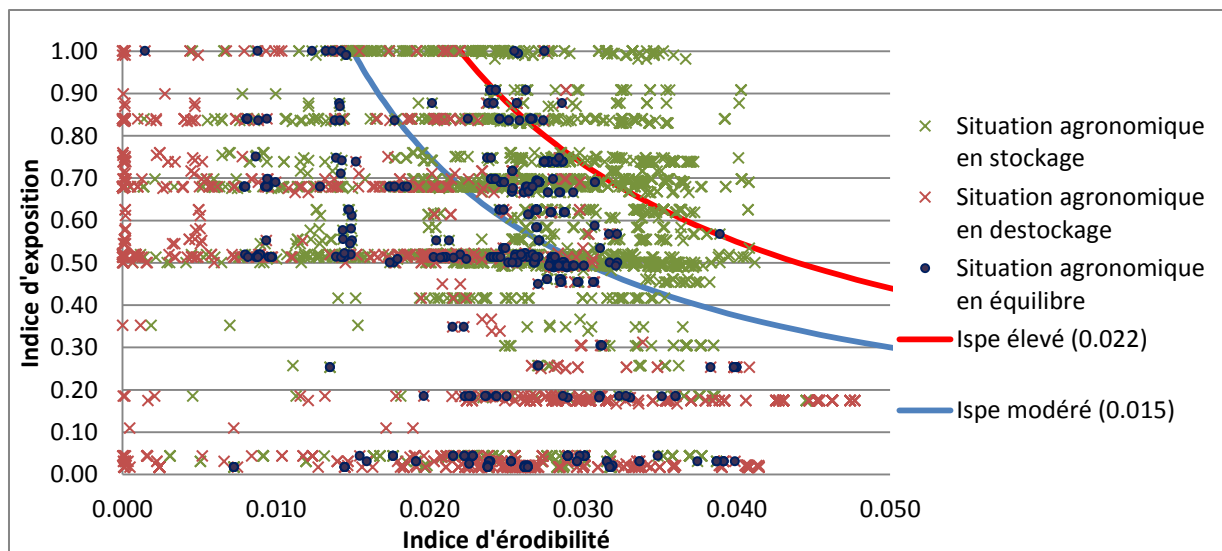


Figure 21: Sensibilité potentielle à l'érosion des différentes situations agronomiques pour FKfZ

On remarque qu'un tiers des situations agronomiques en stockage ont un Ispe élevé. On sait qu'il s'agit entre autre de sols avec un fort taux de matière organique, déjà à l'état initial, du type « Ried Noir ». Il y a très peu de situations agronomiques en déstockage de Corg avec un Ispe élevé, de même pour les situations agronomiques en équilibre. Cependant, on retrouve ces deux situations dans la limite Ispe modéré. On peut également noter que les situations agronomiques en stockage

correspondent à un type d'exploitation en particulier : céréaliers grandes cultures à dominante maïs ou CM où la présence de culture qui couvre peu le sol est importante et qui est donc plus sensible au risque d'érosion.

Pour vérifier si le type de sol est un facteur déterminant pour les situations agronomiques ayant un Ispe élevé, une étude a été réalisée en utilisant la classification des sols du type GEPPA.

La Figure 22 représente les situations agronomiques du secteur FKZ en fonction des textures du sol selon la classification GEPPA.

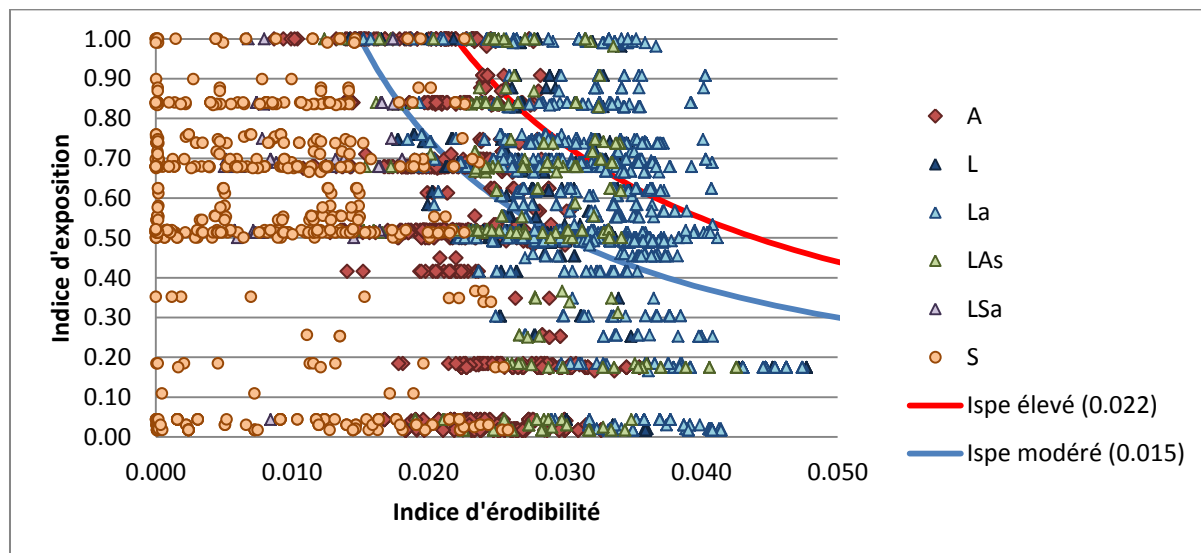


Figure 22: Sensibilité potentielle à l'érosion des différentes situations agronomiques FKZ en prenant en compte les textures du sol (classification type GEPPA)

On observe que les sols du type S ont en général un risque de sensibilité potentielle à l'érosion faible, contrairement aux sols du type La et Las qui ont beaucoup de situations agronomiques à Ispe élevé. Ces résultats sont donc justifiés, car les sols du type limoneux et sablo-limoneux sont des sols particulièrement sensibles à l'érosion, notamment lorsqu'ils sont pauvres en humus (Chambre d'agriculture Nord Pas de Calais, 2013).

Secteur du Sundgau (SEV) :

La Figure 23 représente les situations agronomiques du secteur SEV.

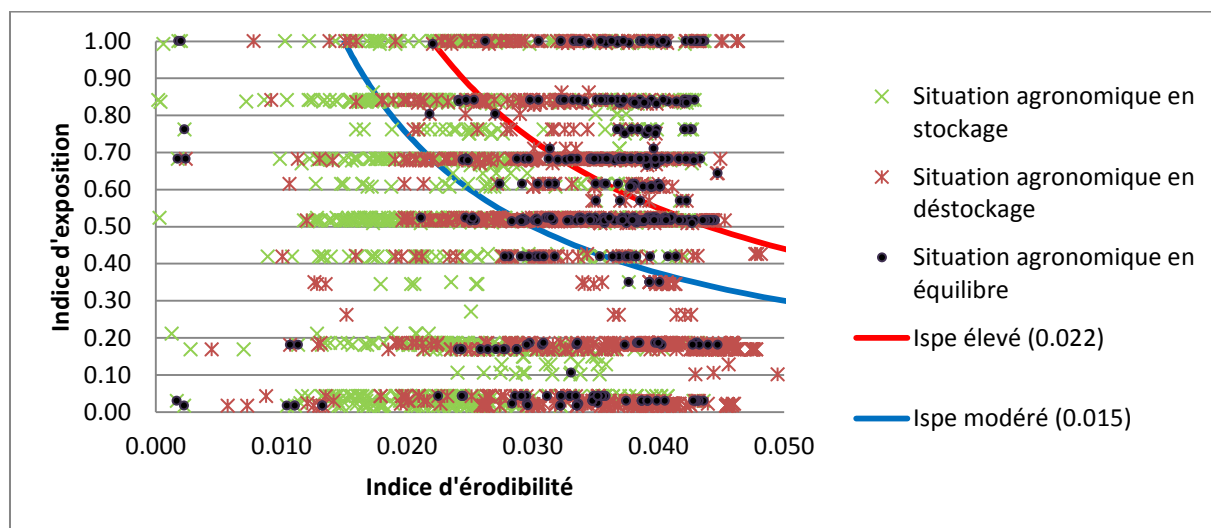


Figure 23: Sensibilité potentielle à l'érosion des différentes situations agronomiques dans le Sundgau

On remarque que contrairement à l'étude pour FKZ, les situations agronomiques en déstockage de Corg ont ici, pour environ un tiers des situations, un I_{spe} élevé. De même pour les situations en équilibre. Les situations en stockage de Corg sont ici peu sensibles à l' I_{spe} ou de manière modérée.

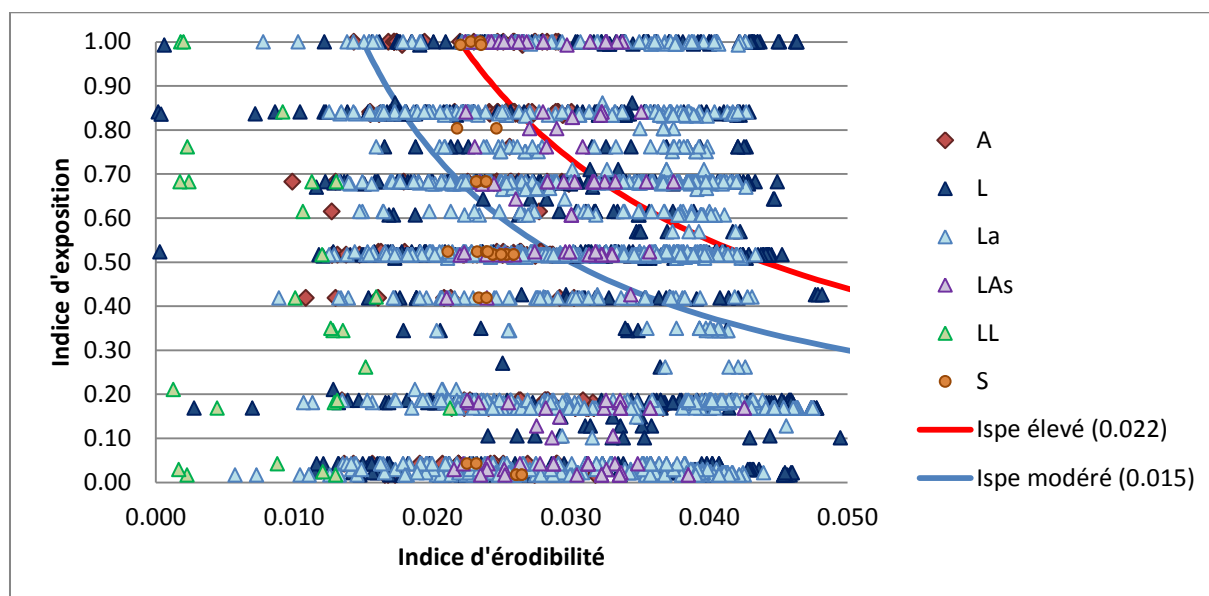


Figure 24: Sensibilité potentielle à l'érosion des différentes situations agronomiques dans le Sundgau en prenant en compte les textures du sol (classification type GEPPA) pour SEV

Sur la Figure 24, les sols du type LL, A et S ont en général un risque de sensibilité potentielle à l'érosion faible, contrairement aux sols du type La, L et Las qui ont beaucoup de situations agronomiques à I_{spe} élevé.

5.4. Cartographie de l' I_{spe}

Secteur FKZ :

La Figure 40, en Annexe L représente une carte avec l'indice de sensibilité potentielle à l'érosion. La sensibilité potentielle à l'érosion est basée sur l'érodibilité du sol et son exposition aux forces érosives au cours de la rotation mais ne prend pas en compte la pente.

On remarque que les parts de la surface de l'UCS de 61 à 75 % et de 31 à 60 %, ayant une sensibilité potentielle à l'érosion élevée, sont concentrées dans les zones où est effectuée le maïs domine les rotations. La culture de maïs ayant un indice d'exposition faible, cela peut expliquer cette concentration de part surfacique ayant un I_{spe} élevé sur la carte.

Secteur SEV :

La carte représentant l'indice de sensibilité potentielle à l'érosion se trouve en Annexe M accompagné des cartes de l'érod et l'expo pour SEV.

On observe que les zones correspondant au part de surfaces de 65 à 75 %, ayant un I_{spe} élevé, correspondent aux zones ayant un l'érod élevé et les parts de surfaces comprises entre 51 à 65 % ayant un I_{spe} élevé correspondent aux zones avec un l'expo élevé. L' I_{spe} élevé est donc lié à l'érodibilité existante dans le secteur et également à l'implantation de cultures ayant un faible indice d'exposition (dans le secteur SEV, il s'agit particulièrement du maïs grain et maïs ensilage).

5.5. Systèmes de culture ayant un Ispe élevé pour les deux secteurs

5.5.1. Systèmes de culture ayant un risque élevé à l'érosion

Etude sur les rotations de culture :

Le Tableau 13 constitue une synthèse de l'ensemble des surfaces par type d'EA pour FKfZ.

Tableau 13 : Surfaces totales et surfaces ayant un Ispe élevé pour les types d'EA de FKfZ

Type d'EA	SAU tot (ha)	SAU tot (%)	Surface Ispe élevé (ha)	Ispe élevé % SAU
CM	9987.12	26.4	5468.82	14.45
CMB	12333.78	32.6	4600.25	12.16
CI	7379.34	19.5	3765.21	9.95
CB	1348.52	3.56	171.33	0.45
EC	6565.15	17.35	72.26	0.19
AV	207.12	0.55	76.86	0.2
D	14.81	0.04	5.17	0.01
TOTAL	37835.84	100	14159.9	37.41

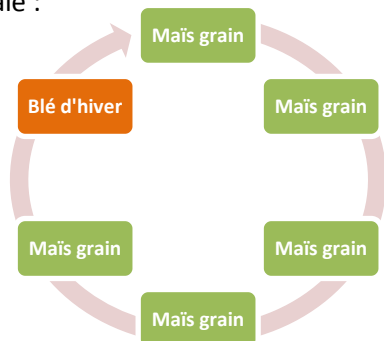
Pour le secteur FKfZ, deux types d'exploitations représentatifs ont été retenus, ayant des surfaces cultivées avec un indice de sensibilité élevée à l'érosion conséquentes. Les deux types d'exploitations retenus sont les céréaliers grandes cultures à dominante maïs ou CM et les céréaliers avec des cultures industrielles et spéciales ou CI. Les rotations initiales à risque élevé d'érosion représentent par rapport au pourcentage total des surfaces de FKfZ :

CM : 26.4 % des surfaces cultivées soit 9 987,12 ha ce qui représente 14,45 % de surface ayant un Ispe élevé ; **CI** : 19,5 % des surfaces cultivées soit 7379.34 ha ce qui représente 9,95 % de surface ayant un Ispe élevé.

Une sélection de rotation de culture initiale avec un indice de sensibilité élevé à l'érosion a été réalisée, pour les deux types d'EA, pour la comparer, sur le plan agronomique, environnemental, économique et social, à une rotation de culture alternative. Ceci, dans le but de limiter le risque de sensibilité élevé à l'érosion pour arriver à un risque modéré. Les rotations de culture des CM et CI, pour le secteur FKfZ, sont présentées ci-dessous (Figures 25 et 26):

Céréaliers grandes cultures dominante maïs ou CM :

Rotation initiale :



Rotation alternative :

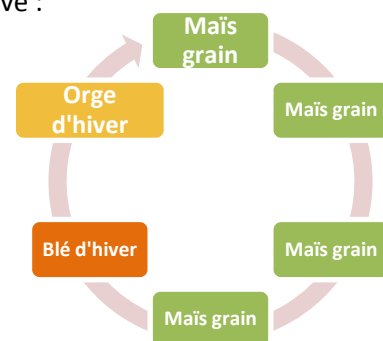


Figure 25: Rotations de culture initiale et alternative pour CM

Céréaliers avec cultures industrielles et spéciales ou CI :

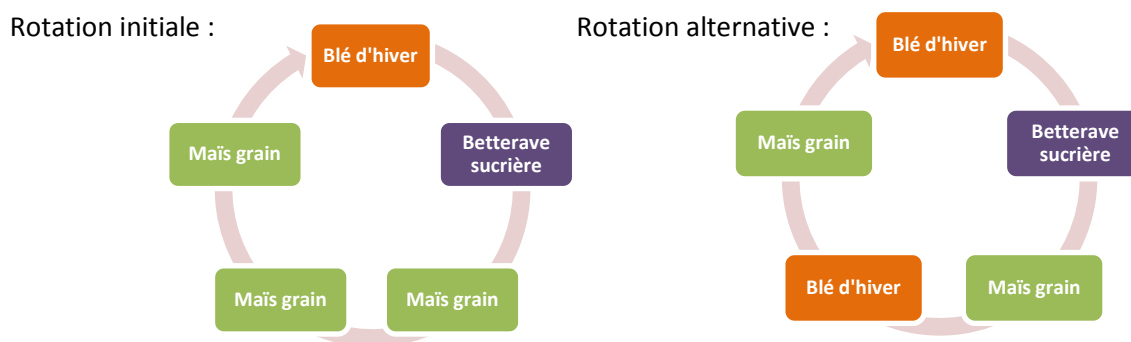


Figure 26: Rotations de culture initiale et alternative pour CI

Pour le secteur SEV, un type d'exploitation représentatif a été retenu de la même manière que précédemment, il s'agit de la classe élevage et herbe ou EH.

Les rotations initiales à risques élevé d'érosion représentent 26,95 % des surfaces cultivées soit 10621.98 ha. Ces résultats sont issues des sorties de l'outil RPG Explorer combinés avec les résultats de Simeos-AMG. Le Tableau 14 reprend de manière synthétique l'ensemble des données concernant les surfaces cultivées par type d'EA.

Tableau 14: Surfaces totales et surfaces ayant un Ispe élevé pour les types d'EA de SEV

Type d'EA	SAU tot (ha)	% SAU tot	Surface Ispe élevé (ha)	Ispe élevé % SAU
CM	12349.49	31.34	6910.24	17.53
EH	24026.97	60.97	10621.98	26.95
EC	2128.51	5.4	307.49	0.78
CB	823.13	2.09	162.48	0.41
DL	27.59	0.07	40.82	0.1
DG	31.53	0.08	0	0
DO	19.72	0.05	0	0
TOTAL	39406.94	100	18043.01	45.77

Eleveurs ou EH :

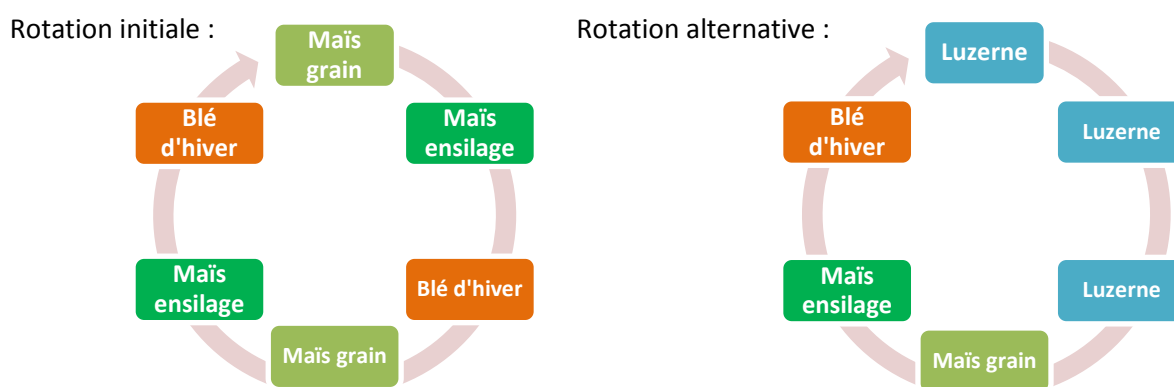


Figure 27: Rotations de culture initiale et alternative pour EH

Les rotations alternatives pour les trois types d'exploitations, présentées sur les Figures 25, 26 et 27, ont été choisies et approuvées par des conseillers de la Chambre d'Agriculture Régionale d'Alsace et l'ARAA (Alves F., Cugnère C., Fritsch B., Geist P., Lebas H., Michael R., Rapp O., Schaub A., Van Dijk P., 2014). Ces rotations ont été définies à partir des grilles de mesures anti-érosion et par rapport aux pratiques et exigences des agriculteurs des deux secteurs.

Etude Stephy (aspects économiques, environnementaux et sociaux) :

Tableau 15: Données issues des sorties des simulations avec l'outil Stephy pour les différents SdC

Aspect	Indicateurs Stephy	Unité	Rotation								
			Initiale, Labour			Alternative, Labour			Initiale, Non Labour		
			CM	CI	EH	CM	CI	EH	CM	CI	EH
Environnement	IFT total		2.8	3.7	3	2.9	3.8	1.5	2.8	3.7	3
	Bilan bascule	Kg d'N/ha	17	15	51	28.4	17.2	39.7	17.2	14.6	51
Economique	Charges opérationnelles	€/ha	536	645	482	528.9	652.8	477.5	536.1	645.5	482.5
	Charges mécanisation et main d'oeuvre	€/ha	302	347	365	312.2	360.7	263.4	325.7	375.4	398.2
	Marge directe	€/ha	678	579	539	597.7	530.5	492.4	654.8	551.2	505.9
Social	Nombre de passage		12.2	13.2	11.7	12.2	13.4	7.7	13.3	14.6	13.3
	Temps de passage	h/ha	5.3	5.6	5.8	5.4	5.8	4.5	6.2	6.7	7

Tableau 16: Définition des indicateurs Stephy

Définition des indicateurs Stephy (formules de calcul)	
IFT total	IFT Total = IFT herbicides + IFT insecticides + IFT fongicides + IFT autres
Bilan bascule	Quantité d'azote minéral apportée + Quantité d'azote organique apportée – (Rendement * Exportation des résidus)
Charges opérationnelles	Charges phytosanitaires herbicides + Charges insecticides + Charges fongicides + Charges autres + Charge engrais + Charges semences
Charges mécanisation et main d'oeuvre	Travaux du sol + Semis + Travaux mécaniques + Fertilisation + Travaux de récolte
Marge directe	Produit brut - Charges opérationnelles – charges de mécanisation et de main d'oeuvre
Nombre de passage	Pulvérisation + Travaux mécaniques
Temps de passage	Temps pulvérisation + Temps pour travaux mécaniques

A partir des Tableaux 15 et 16, ci-dessus, issu des simulations avec l'outil Stephy et à partir des rotations présentées dans le paragraphe précédent, des comparaisons entre les rotations ont été réalisées par type d'exploitation agricole:

Céréalières grandes cultures dominante maïs ou CM :

Rotations initiale et alternative conduites en labour: On remarque qu'au niveau de l'IFT et des charges la comparaison des deux rotations pratiquées en labour ne varie quasiment pas (IFT total ne diffère que de 1,80 %, les charges opérationnelles de -1%, charges de mécanisation et de main d'oeuvre de 3%). Cependant par rapport à la marge directe la rotation alternative est inférieure à celle de la rotation initiale de 12 %. Ceci peut s'expliquer par le remplacement d'une culture ayant un prix de vente plus élevé par une autre ayant un prix de vente moins élevé (la culture du maïs par de l'orge d'hiver).

Rotation initiale en labour et rotation initiale en non labour (différent du semis-direct) : De même que précédemment, la comparaison de la rotation initiale en labour et non labour (différent du semis-direct) ne diffère que très peu. La différence se situe au niveau des charges de mécanisation et de main d'oeuvre, du nombre de passage et du temps de passage plus importants pour le système en non labour (respectivement + 8 % ; + 10 % et + 17,5 %). En effet, pour limiter la dominance des adventices (limité par le labour), des passages de travaux mécaniques (notamment de déchaumage) sont à effectuer en plus pour la pratique du non labour. Ce qui explique également une légère baisse (-3 %) de la marge directe.

Céréaliers avec cultures industrielles et spéciales ou CI :

Rotations initiale et alternative en labour: Avec l'implantation de la culture de blé dans la rotation alternative (en remplacement d'un maïs), on remarque que l'IFT total augmente et les charges opérationnelles légèrement (respectivement + 4,4 % et + 1%). En effet, la culture de blé nécessite des traitements fongicides et de régulateur en plus comparé à la culture du maïs.

Rotation initiale en labour et rotation initiale en non labour (différent du semis-direct) : On remarque que le résultat des deux rotations est quasi identique, en effet la mise en œuvre du non labour n'influe pas l'IFT total ni les charges opérationnelles, elle ne concerne que les travaux du sol. Les seuls changements concernent ainsi les charges de mécanisation et de main d'œuvre ainsi que le nombre et le temps de passage qui sont plus conséquents pour la situation alternative (respectivement +8 % et + 11 % et + 19,9 %) car les travaux mécaniques sont plus conséquents pour palier au labour (notamment les travaux de déchaumage). La marge directe est donc légèrement plus faible (de 5 %) pour la rotation alternative.

Dans l'ensemble, les rotations alternatives pour ces deux types d'exploitations céréalières n'améliorent pas forcément les impacts environnementaux (IFT total et bilan bascule) mais ne les aggravent pas. De même, au niveau économique, les charges opérationnelles varient en fonction des besoins des cultures mises en place nécessitant moins ou plus de traitement phytosanitaire. Dans notre cas, le but est de remplacer une culture de printemps par une culture d'hiver pour couvrir le sol pendant les périodes à risques élevé d'érosion des sols. La culture du maïs se voit donc remplacée par du blé tendre d'hiver ce qui impacte une légère augmentation des traitements fongiques et donc des charges opérationnelles.

Pour limiter l'érosion, la prise en compte du travail du sol est importante. Pour cela, la comparaison du labour et non labour pour les rotations initiales est positive, dans le sens où l'impact pour l'agriculteur au niveau environnemental et économique est très modéré. En effet les seuls changements concernent les charges de mécanisation et de main d'œuvre ainsi que le nombre et temps de passage des outils, c'est-à-dire l'aspect social pour l'agriculteur. Le changement des pratiques au niveau du travail du sol (non labour mais pas de semis-direct) semble être une bonne alternative pour limiter l'érosion. Tout en sachant que cela entraîne du temps de travail en plus et une marge directe un peu moindre comparé au système en labour systématique.

Eleveurs ou EH :

Rotations initiale et alternative en labour : On remarque que l'IFT total diminue de moitié avec la rotation alternative et de même pour les charges opérationnelles. Cela est lié à l'implantation de la culture de luzerne sur trois ans qui ne nécessite aucun traitement phytosanitaire dans notre cas. Les charges de mécanisation et de main d'œuvre, ainsi que le nombre et temps de passages se voient diminués avec la rotation alternative (respectivement - 28 % ; - 34 % et - 21,8 %). Toujours pour les mêmes raisons avec l'implantation de la luzerne sur trois ans, il n'y a que deux fauches à réaliser chaque année aucun autre travail mécanique ou de pulvérisation n'est à effectuer sur cette culture intermédiaire. Néanmoins la marge directe diminue également par rapport à la rotation initiale (-9 %), la luzerne étant valorisée directement pour l'éleveur.

Rotation initiale en labour et rotation initiale en non labour (différent du semis-direct) : On remarque que le fait de ne pas effectuer le labour à les mêmes impacts que précédemment pour les CM et CI. En effet, les seuls changements se trouvent au niveau de la charge de mécanisation et main d'œuvre, du nombre et temps de passage qui augmentent (respectivement + 9 % ; + 14% et + 21,9 %). Cela est lié aux travaux supplémentaires à effectuer en non labour notamment la pratique du déchaumage. La marge directe est donc légèrement impactée avec une diminution de 6 % par rapport au système en labour systématique.

Dans l'ensemble pour le type d'exploitation des éleveurs, l'implantation de la culture de luzerne est très positive au niveau environnemental, économique et social pour l'agriculteur.

Par rapport à la pratique du non labour, les mêmes commentaires sont à faire que pour CI et CM vu précédemment.

5.5.2. Comparaison des résultats pour les systèmes de culture alternatifs à l'érosion

Les Figures 28 et 29 présentées ci-dessous permettent de visualiser l'influence des deux indices lexpo et lerod par rapport aux systèmes de culture et du type d'exploitation agricole.

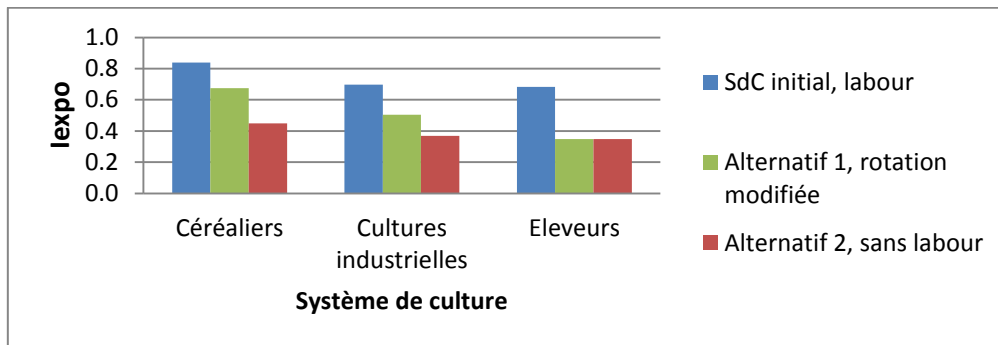


Figure 28: lexpo en fonction du système de culture et du type d'exploitation agricole

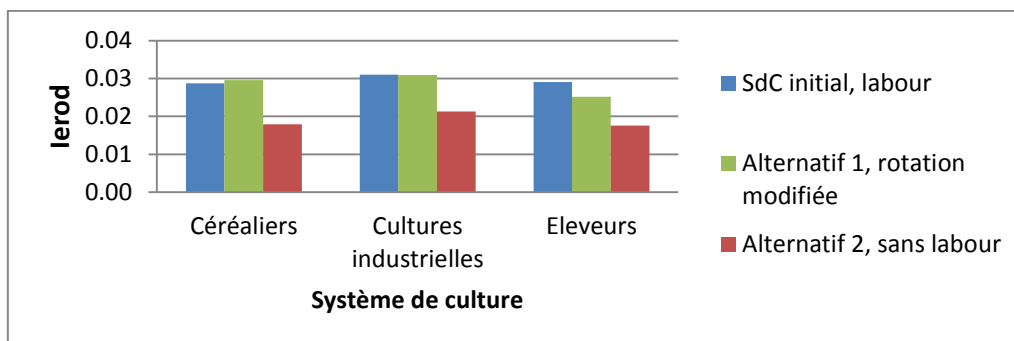


Figure 29: lerod en fonction du système de culture et du type d'exploitation agricole

On remarque qu'en système Alternatif 1, rotation modifiée avec labour, il est difficile de modifier l'indice d'érodibilité (lerod reste supérieur à 0.03, sauf pour les éleveurs). En effet, les solutions proposées en système de labour influencent plus l'exposition de la surface que l'érodibilité. On observe également que le système Alternatif 2, sans labour, influence de façon équilibrée l'indice d'exposition et l'indice d'érodibilité.

Le Tableau 17 ci-contre, nous renseigne sur les Indices de sensibilité potentielle à l'érosion (Ispe) pour les 3 types d'exploitations étudiées précédemment, en fonction du SdC initial avec labour et les deux systèmes de culture alternatifs, c'est-à-dire la rotation initiale avec labour et la rotation alternative. Les rotations sont mises en rappel dans le Tableau 18. Le Tableau 19 présente la réduction en pourcentage de l'Ispe pour les systèmes Alternatifs 1 et 2 comparés au SdC initial.

Tableau 17: Ispe du système de culture initial et les systèmes alternatifs pour les 3 types d'EA

Ispe	SdC initial, labour	Alternatif 1, rotation modifiée	Alternatif 2, sans labour
Céréaliers ou CM	0.024	0.020	0.008
Cultures industrielles ou CI	0.022	0.016	0.008
Eleveurs ou EH	0.020	0.013	0.006

Tableau 18: Rappel des rotations à risque pour chaque type d'EA

Type EA	Rotation Initiale	Rotation Alternative
CM	Mg-Mg-Mg-Mg-Mg-Blé	Mg-Mg-Mg-Mg-Blé-Orge
CI	Blé-BS-Mg-Mg-Mg	Blé-BS-Mg-Blé-Mg
EH	Mg-Me-Blé	Luz-Luz-Luz-Mg-Me-Blé

Tableau 19: Comparaison des Ispe initiaux aux situations alternatives

Réduction Ispe (%)	Alternatif 1, rotation modifiée	Alternatif 2, sans labour
CM	16.7	66.7
CI	27.3	63.6
EH	35.0	70.0

On remarque dans un premier temps que pour les deux systèmes de culture alternatifs l'Ispe a diminué par rapport au SdC initial. Pour les 3 types d'EA, on remarque que le système Alternatif 2 a un effet de diminution de l'Ispe plus important que le système Alternatif 1, comparé au SdC initial. Lorsque l'on compare SdC initial à Alternatif 2, pour CM l'Ispe est diminué de 66,7 % ; pour CI, 63,6 % et pour EH de 70 %. Alors que pour les résultats des systèmes Alternatifs 2 l'Ispe n'est diminué que de 16,7% pour CM ; 27,3 % pour CI et 35 % pour EH. Les résultats du système Alternatif 1 sont 2 à 6 fois inférieurs au système Alternatif 2.

La Figure 30 présente la comparaison des systèmes Alternatifs 1 et 2 par rapport à l'initial pour les trois types d'EA. On remarque que le système alternatif 2 a un impact plus important sur la diminution de l'Ispe pour les 3 types d'EA, comparé au système Alternatif 1. Pour les 3 types d'EA le système Alternatif 2 diminue de plus de 60 % l'Ispe, alors que le système Alternatif 1 ne diminue l'Ispe que de 18 à 38 %.

Le fait de changer les pratiques de travail du sol a dans cette étude un impact plus important sur la diminution de l'Ispe que le fait de modifier la rotation de culture.

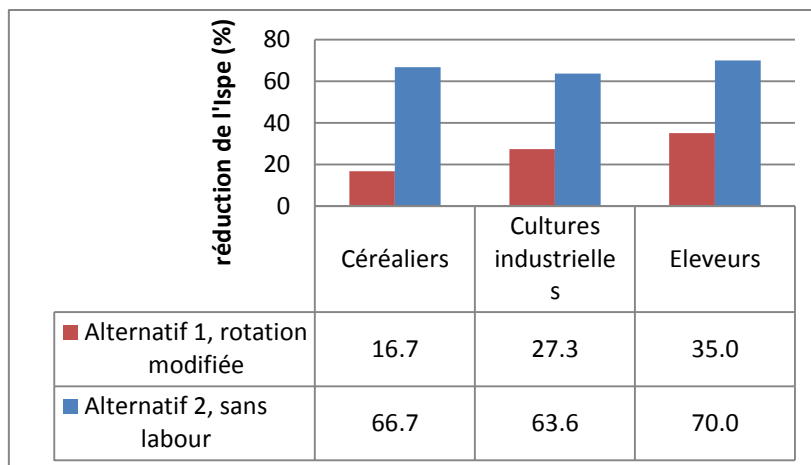


Figure 30: Comparaison du pourcentage de réduction des Ispe pour les systèmes alternatifs comparés au système initial

Le passage de labour systématique au non labour (différent du semis-direct) a un impact par rapport à l'indice de sensibilité potentielle des sols à l'érosion qui est nettement diminué.

L'Ispe élevé de l'état initial passe à un Ispe modéré (< à 0,015) pour les 3 types d'EA pour le système Alternatif 2.

Le fait de modifier la rotation en y introduisant plus de culture d'hiver mais en gardant le labour systématique diminue moins fortement l'indice de sensibilité potentielle à l'érosion des sols.

Pour avoir un effet encore plus efficace sur la diminution de l'Ispe, il serait intéressant d'étudier la combinaison des deux systèmes alternatifs, c'est-à-dire de combiner le non labour aux rotations alternatives.

La Figure 31 permet de visualiser les résultats étudiés précédemment de l'Ispe en fonction du SdC et du type d'EA. On peut tout de même remarquer que les systèmes de cultures initiaux, ayant un Ispe élevé, concernent les céréaliers (CM et CI) comparé au type d'EA d'élevage (EH) qui a un Ispe tout juste à la limite. Le type d'EA avec leur assolement spécifique a également un impact et influence par la suite l'Ispe.

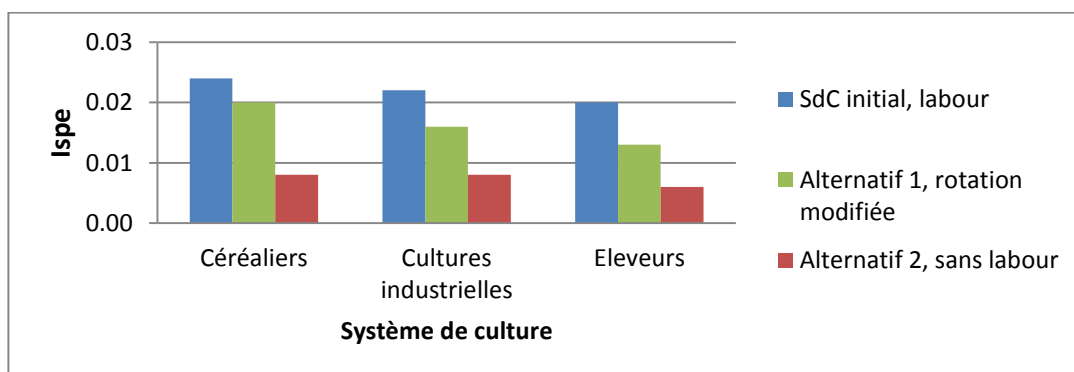


Figure 31: Comparaison des Ispe en fonction du SdC et du type d'EA

Dans notre étude, la conception de systèmes de culture alternatifs qui prennent en compte le stock et la teneur en carbone organique, permet d'atténuer la sensibilité potentielle des sols à l'érosion.

6. Discussion

Dans notre étude, nous avons évalué des facteurs liés à l'érosion qui peuvent être modifiés en intervenant dans le système de culture : l'érodibilité du sol et l'exposition de la surface aux forces érosives. On peut se demander si les deux indices utilisés pour évaluer la sensibilité potentielle à l'érosion, $I_{\text{érod}}$ et I_{expo} sont suffisants pour répondre à la sensibilité des sols à l'érosion et si le choix des valeurs seuils permet d'intégrer toutes les situations les plus sensibles à ce risque. Un facteur que nous n'avons pas considéré, qui est également lié au système de culture, est la rugosité de la surface du sol. Une surface rugueuse permet de stocker plus d'eau en surface avant qu'un ruissellement se déclenche. Il serait donc souhaitable de concevoir un indicateur supplémentaire prenant en compte ce facteur. De plus, l'indice d'exposition (I_{expo}) a été défini pour une application dans le contexte climatique alsacien. Pour l'instant il n'est pas transposable aux territoires français ayant un régime pluviométrique différent et une amélioration de la méthodologie de calcul de l'indice s'impose.

Quelques remarques peuvent être faites par rapport aux outils mobilisés dans l'étude. L'outil RPG-explorer n'a pas encore été validé. Même si les rotations simulées sur les deux secteurs étudiés en Alsace semblent cohérentes dans l'ensemble, une validation systématique et structurée est nécessaire. Cette phase de validation était prévue avant le démarrage du stage, mais elle a été retardée et sera certainement réalisée par la suite. Il reste alors une incertitude par rapport aux assolements de rotations employés dans notre étude sur la sensibilité à l'érosion.

L'outil SIMEOS-AMG a permis la simulation de la plupart des cultures présentes sur les secteurs d'étude, mais pas toutes. Les cultures emblématiques d'Alsace telles que le tabac, le chou à choucroute et le houblon ne sont pas paramétrées dans l'outil et nous avons été obligé de faire des approximations. De plus, dans un souci de représentation de l'ensemble des surfaces agricoles d'un territoire, il serait souhaitable que Simeos-AMG permette de simuler également des cultures permanentes comme les prairies et les vignes.

La pertinence des analyses concernant l'évolution des stocks et teneurs en carbone dépend fortement des valeurs initiales fournies au modèle Simeos-AMG. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur la base de données des sols d'Alsace (RRP). Ceci est un choix critiquable car les valeurs du RRP sont statiques et ne sont pas associées à une période de référence bien définie. Il aurait été intéressant d'utiliser les données issues de la BDAT pour paramétrer les valeurs initiales du carbone organique. La BDAT permet en effet d'identifier une période de référence. Cependant, les tests de mise en œuvre de la BDAT dans ce but ne sont pas concluants à ce jour et il n'est pas encore possible d'associer à l'ensemble des types de sols du RRP une valeur initiale issue de la BDAT. C'est pourquoi nous avons fait le choix pragmatique d'utiliser les valeurs du RRP car pour tous les UTS une valeur est définie. Ceci implique que la validité des résultats d'évolution des stocks et teneurs en carbone organique est difficile à évaluer. Cette incertitude ne s'applique pas à l'estimation de l'érodibilité des situations agronomiques qui est fonction de la teneur en carbone organique à l'équilibre et qui ne dépend pas de la teneur initiale.

Pour les systèmes de culture alternatifs, il serait judicieux de réaliser une étude en combinant les deux systèmes alternatifs actuels (rotation modifiée et rotation sans labour), mais également en modifiant les rotations de cultures alternatives et en y intégrant encore d'autres cultures plus intéressantes au niveau agronomiques pour limiter l'érosion, permettant d'atteindre des teneurs en

carbone organique limitant l'érodibilité et favorisant la stabilité structurale, tout en prenant en compte les problématiques du territoire et les pratiques des agriculteurs. Pour le moment, il s'agit d'une première approche non aboutie qu'il serait intéressant d'approfondir pour aboutir à des systèmes de culture innovants et performants par rapport à la sensibilité à l'érosion.

L'étude multicritère de ces systèmes de cultures alternatifs serait à améliorer. En effet, il existe d'autres outils tels que Criter et Masc (développés par l'INRA et des établissements d'enseignement supérieur) permettant d'avoir une approche plus précise des différents aspects environnementaux, économiques et sociaux ainsi que sur la durabilité et les performances des systèmes dans le temps.

Par rapport à la cartographie de l'Indice de sensibilité potentielle à l'érosion, celle-ci reste actuellement limitée, en effet, nous n'avons pas trouvé de moyen plus précis pour spatialiser les informations qu'à l'échelle de l'UCS.

Deux possibilités pourraient être étudiées : (1) utiliser d'autres unités spatiales : cela reste difficile à réaliser car le territoire des exploitations agricoles est trop fragmenté, la lisibilité cartographique serait faible, les îlots étant dispersés dans l'espace et (2) d'utiliser d'autres grandeurs à afficher à l'échelle de l'UCS en classant les combinaisons « système de culture x UTS x type d'exploitation » par une classe de sensibilité : faible, moyenne et forte attribuée en fonction de leur part surfacique.

7. Conclusion et perspectives

La mobilisation des outils RPG Explorer, Simeos-AMG, des différentes bases de données (RRP, RPG, BDD sols Alsace, Agri-Mieux) et des indicateurs d'érodibilité et d'exposition a permis de réaliser un diagnostic spatialisé de l'état organique des sols cultivés à l'échelle d'un territoire.

La conception et l'évaluation des systèmes de culture, dont le risque potentiel à l'érosion est élevé, ont pu être développés par des méthodes de diagnostic et de démarche d'aide à la décision spécifiques à l'étude.

Des systèmes de cultures alternatifs ont été proposés permettant de passer d'un indice de sensibilité potentielle à l'érosion élevé à un indice modéré à l'échelle du territoire alsacien en prenant en compte les enjeux environnementaux, économiques et sociaux. Ces systèmes de culture alternatifs prennent en compte le teneur du carbone organique dans les sols agricoles. Une évaluation concernant l'impact des systèmes alternatifs à l'échelle du territoire sur le stock en carbone reste à faire pour répondre aux objectifs du projet ABC Terre.

La diminution de l'indice de sensibilité potentielle des sols à l'érosion par les systèmes de culture alternatifs est liée à la modification de l'érodibilité des sols et leur exposition à la surface. Ces deux facteurs sont influencés en fonction du type de mesures proposées et évaluées dans ce stage. On a pu remarquer que pour les systèmes alternatifs testés en labour, il est difficile de modifier l'érodibilité du sol. L'effet sur la sensibilité à l'érosion est quasiment entièrement dû à l'effet sur l'exposition de la surface. Au contraire, le système sans labour influence les deux facteurs de manière équilibrée. Les résultats nous montrent que les solutions testées pour le système de culture sans labour sont plus efficaces pour diminuer la sensibilité à l'érosion des sols que celles testées pour le système en labour.

Des perspectives d'amélioration ont déjà été citées précédemment comme la validation des données de sortie renseignées par l'outil RPG Explorer prévue dans le cadre du projet ABC Terre, ainsi qu'une exploration plus précise de l'association des valeurs initiales des stocks de carbone organique issues de la BDAT à l'ensemble des types de sols du RRP.

Des améliorations seraient à réaliser, notamment concernant l'indice d'exposition et son extrapolation à d'autres secteurs ainsi que le paramétrage de certaines cultures du territoire d'étude dans l'outil Simeos-AMG. Aussi, l'évaluation multicritère des systèmes de culture alternatifs serait à compléter, notamment concernant la durabilité des systèmes.

Pour le moment, seulement une partie du territoire alsacien concernée par l'érosion (FKFZ et SEV) a été caractérisée pour évaluer et adapter des systèmes de culture pour réduire la sensibilité potentielle des sols à l'érosion. Il serait donc intéressant d'étendre ce travail aux autres secteurs sensibles à l'érosion, notamment l'Outre-Forêt et le piémont viticole.

Une étape supplémentaire de réflexion concernant la représentation cartographique des résultats pourrait également venir en complément de cette étude.

Par rapport au projet ABC Terre, il s'agit maintenant d'y apporter ces modifications, de préparer le transfert des méthodes et de communiquer sur le projet.

Liste des références bibliographiques

ADEME, 2014. Carbone Organique des sols. L'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat. [En ligne]. Consulté le 10/07/2014. Disponible sur <<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=92337&p1=30&ref=12441>>

Adeus, 2009. Référentiel paysager du Bas-Rhin. Secteur Kochersberg. [En ligne] Consulté le 15/07/2014. Disponible sur <http://www.bas-rhin.fr/eCommunityDocuments/E34C4D98-631D-459B-AA4E-61C91D2F7BA0/589/document_Conseil-general-bas-rhin-referentiel-paysager-kochersberg.pdf>

AERM, 2010. Agence de l'Eau Rhin Meuse. Données des opérations d'amélioration des pratiques agricoles. Grandes cultures conseil, fiches C3,3,2, p.48-49.

Agreste Alsace, 2014. Atlas régional. Une agriculture alsacienne aux multiples visages. Recensement agricole 2010, p. 95.

Agrotransfert Ressources et territoire, 2005. Gérer l'état organique des sols dans les exploitations agricoles – Les bases de connaissances, Relations entre les matières organiques et la fertilité physique des sol, p.49/61

Agrotransfert Ressources et territoires et INRA, 2011. Guide utilisateur SIMEOS-AMG version 2011. Outil de simulation de l'état organique du sol, p.23.

Ambroise, B., 1999. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, facteurs, modèles. CEREG, EP 2047 CNRS, Ed. a2-a., p.200.

ARAA, 2007. Cartographie : sensibilité à l'érosion selon la méthode MESALES. [En ligne]. Consulté le 02/04/2014. Disponible sur <<http://www.araa-agronomie.org/index.php/thematiques/ruissellement-erosion>>

ARAA, 2013. Association pour la relance agronomique en alsace. [En ligne]. Consulté le 01/04/2014. Disponible sur : <<http://www.araa-agronomie.org/>>

Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J.C., Jayet, P.A., Soussana, J.F., Stengel, P., 2002. Expertise scientifique collective. Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles en France ? Rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'écologie et du développement durable, p.333.

Arrouays, D., Feller, C., Saby, N., Andreux, F., Bernoux, M., & Cerri, C., 2003. Estimation de stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps. Etude et Gestion des Sols, 10(4), p. 347-355.

ASP, 2014. Agence de Service et de Paiement. Mise à disposition du registre parcellaire graphique anonyme [en ligne]. Consulté le 02/04/2014. Disponible sur < <http://www.asp-public.fr/?q=node/856>>

Auzet, A.V., 1987. L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques. Rapport Ministère de l'environnement/Ministère de l'agriculture, p.60.

Auzet, A.V., 1990. L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects aménagements. Rapport Ministère de l'environnement/Ministère de l'agriculture, CERAG-URA 95 CNRS, p. 39.

Auzet, A.V., Boiffin, J., Papy, F., Maucorps, J. & 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 (Ed. By J. Boardman, I.D.L. Foster & J.A. Dearing) John Wiley & Son Ltd, p.383-400.

Auzet, A.V. Heitz, C., Armand, R., Guyonnet, J., Moquet, J.-S., 2005. Dossier CATNAT, « coulées de boue » 67. Analyse à partir des dossiers de demande de l'état catastrophe naturelle. UMR 7507 ULP-CNRS, p.28.

Bockstaller, C. et P. Girardin, 2007. Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO®. UMR INPL(ENSAIA)-INRA Agronomie et Environnement Nancy-Colmar, p. 117.

Boiffin, J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse, INA P-G, Paris, 320p. + annexes.

Boiffin, J., Monnier, G., 1982. Etats, propriétés et comportements des sols : recherche et utilisation des critères de fertilité physique, Bulletin Technique d'Information, p.370 /372, 401-407.

Burtin, M.-L., Probst, J.-C., 2012. Evaluation des modifications de pratiques de gestion de l'azote des agriculteurs de Ferti-Zorn. Rapport final, p.87.

Chambre d'Agriculture du Haut-Rhin, 2002. L'agriculture du département au fil de ses petites régions agricoles. Les cahiers de la Chambre d'Agriculture du Haut-Rhin, p.22.

Chambre d'Agriculture du Nord Pas de Calais, 2013. Guide de l'érosion des sols. [En ligne]. Consulté le 17/07/2014. Disponible sur : < <http://www.agriculture-npdc.fr/fileadmin/documents/Publication/Environnement/guide%20de%20%20erosion.pdf>>

Chambre d'Agriculture Poitou-Charentes, 2012. Le carbone organique des sols cultivés en Poitou-Charentes. Quantification et évolution des stocks. Etude méthodologique RMT Sols et Territoires. [En ligne]. Consulté le 15/07/2014. Disponible sur <http://www.poitou-charentes.chambagri.fr/fileadmin/publication/CRA/18_Connaissance_Sols/Documents/Carbone_des_sols_PC.pdf>

Chambre d'Agriculture Région Alsace, 2009. Regard vers l'avenir. Lutter contre les coulées d'eau boueuse : responsabilités des différents acteurs. [En ligne]. Consulté le 17/07/2014. Disponible sur < http://www.alsace.chambagri.fr/fileadmin/documents/Environnement-Innovation/erosion/dossier_erosion_regards_vers_avenir_2009.pdf>

Chambre d'Agriculture Région Alsace, 2010. Les opérations Agri-Mieux : concilier la production agricole et protection de l'environnement. [En ligne]. Consulté le 09/04/2014. Disponible sur <<http://www.bas-rhin.chambagri.fr/dossiers-thematiques/environnement/eau-et-agriculture/les-operations-agri-mieux.html>>.

Chambre d'Agriculture Région Alsace, 2013. L'agriculture alsacienne, ses régions naturelles. [En ligne]. Consulté le 26/03/2014. Disponible sur < <http://www.alsace.chambagri.fr/menu-horizontal/agrialsace/ses-contours.html>>.

Chenu, C. et Balabane, M., 2001. Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés. Perspectives agricoles, n°272, p.42-45.

Chenu, C., Abiven, S., Annabi, M., Barray, S., Bertrand, M., Bureau, F., Cosentino, D., Darboux, F., Duval, O., Fourrié, L., Francou, C., Houot, S., Jolivet, C., Laval, K., Le Bissonnais, Y., Lemée, L., Menasseri, S., Pétraud, J-P. et Verbèque, B., 2011. Mise au point d'outils de prévision de l'évolution de la stabilité de la structure de sols sous l'effet de la gestion organique des sols. Etude et gestion des sols, Volume 18, 3, 2011 – p. 161-174.

CIGAL, 2013. Coopération pour l'Information Géographique en Alsace. Base de données d'occupation du sol version 2.[En ligne]. Consulté le 20/08/2014. Disponible sur : < http://www.cigalsace.org/metadata/CIGAL/FR-236700019-BdOCS20112012-CIGAL-V2/CIGAL_BdOCSv2_GuideUtilisateur_v131122.pdf>

Commission européenne, 2009. Directive 2009/28/EC of the European parliament and of the council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources. In: Official Journal of the European Union, June, 5th, 2009 Brussels.

Conseil Général du Bas-Rhin, 2011. Le bassin versant de la Zorn. Service Rivières. [En ligne]. Consulté le 18/07/2014. Disponible sur < http://www.bas-rhin.fr/eCommunityDocuments/E34C4D98-631D-459B-AA4E-61C91D2F7BA0/2034/document_conseil-general-bas-rhin-bv-zorn.pdf>

Darboux, F., Le Bissonnais Y., Duval, O., 2008. Diamètre moyen pondéré (MWD) après désagrégation (humectation rapide). UR Science du Sol INRA, Orléans.

Dickey, E. C., Fenster, C. R., Laflen, J. M. et Mickelson, R. H., 1983. Effects of tillage on soil erosion in a wheat-fallow rotation. Trans. ASAE, 26, 814-820.

DONESOL, 2012. Base de données structurant et regroupant les données de bases des profils pédologiques et des informations spatiales UCS et UTS en Alsace.

DRAAF Alsace, 2009. Les régions agricoles, Recensement agricole 2000. [En ligne] Consulté le 02/04/2014. [En ligne]. Disponible sur : < <http://draaf.alsace.agriculture.gouv.fr/Les-petites-regions-agricoles,173>>

DRAAF Alsace, 2014. L'Alsace et ses territoires. Recensement agricole 2010. [En ligne] Consulté le 02/04/2014. [En ligne]. Disponible sur : <<http://www.draaf.alsace.agriculture.gouv.fr/L-Alsace-et-ses-territoires>>

DREAL Alsace, 2010. Risques naturels et hydrauliques. Dossier CATNAT « coulées de boues – 67 ». [En ligne]. Consulté le 09/07/2014. Disponible sur : <<http://www.alsace.developpement-durable.gouv.fr/dossiers-catnat-coulees-de-boue-67.html>>

DREAL Alsace, 2012. Thématiques environnementales, cartographie. Les coulées d'eaux boueuses, autres risque fréquent mais plus localisé. [En ligne] Consulté le 09/07/2014. Disponible sur < http://www.per.alsace.developpement-durable.gouv.fr/accueil/thematiques_environnementales.html>

DREAL Alsace, 2014. Risques naturels et hydrauliques. Coulées d'eaux boueuses. [En ligne]. Consulté le 31/03/2014. Disponible sur < <http://www.alsace.developpement-durable.gouv.fr/coulees-d-eaux-boueuses-r172.html>>.

Dumas, D., 2009. Optimisation des micro-ouvrages de lutte contre les coulées d'eaux boueuses par la modélisation. Mémoire de Master II Mention Géosciences, Environnement, Risques. Université de Strasbourg, 107p.

Duparque, A., Scheurer, O., 2012. Documents projet ABC Terre. Présentation du projet.

EAT Environnement, 1997. Opérations Ferti-Mieux sur le Sundgau, analyse de la situation initiale et diagnostic hydrogéologique p. 1-50.

Gilbert, J.-M. et Franc, A., 1997. Typologie et cartographie du climat dans la moitié nord de la France. Perspectives d'utilisation en relations milieu-production forestière. Ingénieries, EAT, 12, 35-47.

Girard, M.-C., 2014. Glossaire de pédologie. Cours AgroParisTech. [En ligne]. Consulté le 20/08/2014. Disponible sur : <<https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/PEDOLOGIEGLOSSAIRE/php>>

Gregory, J. M., McCarty, T. R., Ghidey, F., et Alberts, E. E., 1985. Derivation and evaluation of a residue decay equation. Transactions of the ASAE 28(1), 98-101.

Guérif, J., Monnier, G., 1982. Evolution de la fertilité physique des sols dans les systèmes de culture fourragers de l'Ouest de la France, Forum des fourrages de l'ouest, Rennes, 23-24 novembre 1982, p.113-129.

Heitz, C., Spaeter, S., Auzet, A-V, Glatron, S., 2008. Local stakeholders' perception of muddy flood risk and implications for management approaches: A case study in Alsace (France). Article in Press, p.9.

Houot, S., Cambier, P., Benoît, P., Bodineau, G., Deschamps, M., Jaulin, A., Lhoutelier, C., Barriuso, E., 2009. Effet d'apports de composts sur la disponibilité de micropolluants métalliques et organiques dans un sol cultivé. Etude et Gestion des Sols 16, 255-274.

Hudson, N., 1981. Soil Conservation. Batsford Academic and Educational Ltd. London.

IFEN, Ministère de l'environnement, 1998. Cartographie de l'aléa « Erosion des sols » en France. Etudes et Travaux n°18. 63p. + annexes.

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, Thèse, INRA P-G, Paris, 231p. + annexes.

Kauark Leite, L.A., 1990. Réflexion sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole. Thèse, ENPC, Paris, 342p. + annexes.

Kirkby, M. J., Y. Le Bissonnais, T. J. Coulthard, J. Daroussin, et M. D. McMahona, 2000. The development of land quality indicators for soil degradation by water erosion. Agriculture, Ecosystems and Environment 81, 125-135.

Lafren, J. M., Moldenhauer, W. C. et Colvin, T. S., 1980. Conservation tillage and soil erosion on continuously row-cropped land. In Crop Production with Conservation in the 80's, Am. Soc. Agr. Eng., St. Joseph, Mich. pp. 121-133.

Lafren, J. M. et T. S. Colvin, 1981. Effect of crop residue on soil loss from continuous row cropping. Trans. ASAE, 24, 605-609.

Langdale, G. W., R. L. Blevins, D. L. Karlen, D. K. McCool, M. A. Nearing, E. L. Skidmore, A. W. Thomas, D. D. Tyler et J. R. Williams, 1991. Cover crop effects on soil erosion by wind and water. In W.L. Hargrove (ed.) : Cover crops for clean water. Soil and Water Conserv. Soc., Ankeny, IA. pp 15–21.

Le Bissonnais, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theorie and methodology, European Journal of Soil Science, Volume 48 (1), 39-48.

Le Bissonnais, Y., Arrouays, D., 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents, European Journal of Soil Science, Volume 48 (1), 39-48.

Le Bissonnais, Y. et Gascuel-Oudou, C., 1998. L'érosion hydrique des sols cultivés en milieu tempéré. In : Sol : interface fragile (Ed. by P. Stengel & S. Guelin), INRA Editions, Coll. Mieux Comprendre, Paris. 129-144p.

Le Bissonnais, Y., Duval, O., 2003. Comment mesurer la stabilité de la structure des agrégats du sol pour évaluer la sensibilité à la battance et à l'érosion ?, Les fertilités du sol et les systèmes de culture, Actes des 6èmes rencontres de l'analyse de terre et de la fertilisation raisonnée, Comifer et Gemas, Blois, 18-19 novembre 2003, 97-106.

Le Bissonnais, Y., Daroussin, J., Jamagne, M., Lambert, J-J., Le Bas, C., King, D., Cerdan, O., Léonard, J., Bresson, L-M., Jones, R. J. A., 2005. European soil crusting and erodibility assessment from the European Soil Geographical Database using pedotransfert rules. Advances in Environmental Monitoring and Modelling, 2-1, 1-15.

Le Bissonnais Y., Blavet, D., De Noni, G., Laurent, J-Y., Asseline, J., Chenu, C., 2007. Macro-agrégats stables > 200 µm (MA200). European Journal of soil science. 58, 188-195.

Lozet, J., Mathieu, C., 2002. Dictionnaire de Science du sol, Edition Technique et Documentation, 575p.

Maes A, Regenass P., 2007. Etude de la protection contre les crues et les coulées de boues provenant du bassin versant aux lieux-dits Grunen Brunnen et Baumgarten. Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, laboratoire de Géotechniques. 30p.

Mathieu, C., Piéltain, F., 1998. Analyse physique des sols méthodes choisies, Edition Technique et Documentation, 275p.

Météo France, 2014. Climat de la région Alsace. [En ligne]. Consulté le 20/08/2014. Disponible sur : <<http://www.meteofrance.com/climat/france/alsace/regi42/normales>>

Ministère de l'Agriculture, 2009. Recensement agricole 2010. [En ligne]. Consulté le 08/04/2014. Disponible sur : <<http://agreste.agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2010/presentation/>>

Ministère de l'Agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2013. Mise en œuvre de la réforme PAC : le résultat de la concertation sur les choix ouverts par les règlements relatifs à la réforme de la PAC dans la perspective du CSO du 17 décembre 2013. [En ligne]. Consulté le 21/07/2014. Disponible sur : <http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/synthese_concertation_nationale_17_decembre_cle8533c8.pdf>

Pacevicus, A.E., 2008. Mémoire de master II. Lutte contre l'érosion des sols et contre les coulées d'eaux boueuses : méthodes rustiques. Faculté de géologie et d'aménagement, Strasbourg, p.50.

Peguy, C.-P., 1970. Précis de climatologie, Paris, Masson et Cie (eds), 468 p.

Pousset J., 2006. Mycorhizes, pourquoi et comment profiter de leurs bienfaits ? Biofil n°44, Janvier-février 2006, 52-54 p.

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2010. La matière organique des sols et le stockage du carbone [en ligne]. Consulté le 01/04/2014. Disponible sur : <<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/272/1122/matiere-organique-sols-stockage-carbone.html>>

Monnier, G. & Stengel, P., 1982. La composition granulométrique des sols : un moyen de prévoir leur fertilité physique. Bulletin technique d'information 370/372 : p.503-512.

Papy, F. & Douyer, C., 1991. Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. Agronomie, 11, p.201-215.

Peyre, Y., 1982. L'érosion par l'eau. Techniques Agricoles, 1385, 16 pages.

Potter, K.N., 1990 ; Alberts, E.E., Nearing, M.A., Wertz, M. A., Risse, L.M., Pierson, F.B., Zhang, X.C., Laflen, J.M., Simanton, J.R., 1995. « Aggregate stability factor b » du modèle WEPP. Chapter 7, Soil Component.

Rémy, J-C., Marin-Lafèche, A., 1974. Analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. Agronomie, 25 (4), p.607-632.

RMT Systèmes de culture innovant, 2010. Le guide Stephy. [En ligne]. Consulté le 15/07/2014. Disponible sur <<http://www.systemesdecultureinnovants.org/moodle/>>

RMT Systèmes de culture innovant, 2013. Agro-Peps, outil web collaboratif d'informations techniques et d'échanges. [En ligne]. Consulté le 12/05/2014. Disponible sur <<http://agropeps.clermont.cemagref.fr/mw/index.php/Accueil>>

Saby, N., Schwartz, C., Walter, C., Arrouays, D., Lemerrier, B., Poland, N., et al., 2004. Base de données des analyses de terre : procédure de collecte et résultats de la campagne 1995-2000. Etude et gestion des sols, 11 (3), p.235-253.

Saxton, K.E., Rawls, W.J., 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil Science Society of America journal 70 (5), 1569-1578.

Schils, R., Kuikman, P., Liski, J., Oijen, M.v., Smith, P., Webb, J., Alm, J., Somogyi, Z., Akker, J.v.d., Billett, M., Emmett, B., Evans, C., Lindner, M., Palosuo, T., Bellamy, P., Jandl, R., Hiederer, R., 2008. Review of existing information on the interrelations between soil and climate change. Disponible sur <http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/climsoil_report_dec_2008.pdf>. Wageningen UR, Wageningen Netherlands, p.208.

Schubertzer, C., 2005. Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) en France. Extrait de l'étude : Impact des Techniques Culturelles Sans Labour sur le ruissellement et l'érosion, p.73.

Schvartz, C., Thorette, J., et Follain, S., 2008. Représentation cartographique nationale d'un indice cantonal d'acceptabilité des sols à l'épandage agricole des boues de station d'épuration calculé à partir de la base de données des analyses de terre. *Etude et gestion des sols*, 15 (1), p.37-49.

Schwertmann, U., Vogl, W., Kainz, M., Mitarbeit von Auerswald, K., Martin M., 1987. *Bodenerosion durch wasser*, Stuttgart.

Sebillotte, M., 1990. Some concepts for analyzing farming and cropping system and for understanding their different effects. First congress European Society of Agronomy, Paris 5th-7th Dec. Proceedings, Ed. A. SCAIFE, 5000, pp. 1-16.

Smith, P., 2004. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy* 20, 229-236.

Sol Conseil (a), 2001. Guide des sols d'Alsace. Petite région naturelle n°11. Sundgau et Jura Alsacien. Région Alsace, 252p.

Sol Conseil (b), 2001. Guide des sols d'Alsace, petite région naturelle n°5. Collines de Brumath, du Kochersberg et de l'Arrière, un guide pour l'identification des sols et leur valorisation agronomique. Région Alsace, 302p.

SRISE Alsace, 2014. Service Régional de l'Information Statistique et Economique. Statistiques agricoles. Orientation technico-économique des exploitations agricoles en Alsace. [En ligne]. Consulté le 20/08/2014. Disponible sur <<http://www.draaf.alsace.agriculture.gouv.fr/Le-recensement-agricole-en-Alsace>>

Swiderski, C., Saby, N.P.A., Party, J.P., Sauter, J., Köller, R., Van Dijk, P., Lemercier, B., Arrouays, D., 2012. Evolution des teneurs organiques dans l'horizon de surface des sols cultivés en Alsace. Analyse à partir de la BDAT. *Etude et gestion des sols*, volume 19, 3 et 4, p.179-192.

TCS, 2013. Techniques Culturelles Simplifiées : Agronomie, écologie et innovation, n°75 dossier ressources Sol et trafic, novembre/décembre 2013, p.30-31.

Torri, D., Poesen, J. et Borselli, L., 1997. K-factor USLE selon Torri. Predictability and uncertainty of the soil reodibility factor using a global dataset. *Catena* 32, 307-308.

Van Dijk, P., 2001. Soil erosion and associated sediment supply to rivers. Seasonal dynamics soil conservation measures and impacts of climate change, p.211.

Van Dijk, P. M. et A.V. Auzet, 2003. Regional impacts of hillslope sediment delivery from agricultural fields to streams: role and dynamics of small-scale linear structures. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Abstracts from the meeting held in Nice, France, 6 - 11 April 2003.

Van Dijk, P. M., Auzet, A.-V. and Lemmel, M., 2005. Rapid assessment of field erosion and sediment transport pathways in cultivated catchments after heavy rainfall events, p. 169-182

Van Dijk, P., Koller, R., Lasserre, D., Gaudillat, D., 2008. L'impact du non labour sur la quantité et la qualité du ruissellement et de la production végétale. Résultats de la campagne 2008 sur le site de Geispitzen, p. 40.

Van Dijk, P., Burtin, M.-L., 2011. Données sur l'agriculture en Alsace pour le modèle Stoffbilanz. Assolements, rendements, fertilisation azotée, cultures intermédiaires et densité de bétail en 2009. ARAA pour le projet LOGAR, 43 p.

Van Dijk, P., 2013. Estimer la densité apparente pour ABC-Terre. Comparaison des fonctions de pédotransfert, p.16.

Van Dijk P., 2014. L'indicateur d'exposition de la surface du sol à l'érosivité des précipitations (lexpo), p.9.

Van Dijk, P., Villerd, J., Koller, R., Bockstaller, C., en prep. A predictive indicator for overland flow potential of cropping systems: accounting for farmers' control on key variables.

Vigot, M., 2011. Spatialisation du diagnostic de l'état organique des sols cultivés à l'échelle d'un territoire : Exploration d'une méthode basée sur le bilan humique AMG, appliquée dans le département du Loiret. Mémoire fin d'étude, ENITA Bordeaux, 64p. + annexes.

Vogt, H., Mettauert, H. et Pautrat, C., 1986. Carte des formations superficielles d'Alsace.

Vopravil J., Janecek M. et Tippl M., 2007. Revised soil erodibility K-factor for soils in the Czech Republic. Research Institute for soil and water conservation, Prague, Czech Republic. Soil and water Research, 2, 2007 (1):1-9.

Vullioud, P., Delabays, N., Frei, P., Mercier, E., 2006. Résultats de 35 ans de culture sans labour à Changins. Evolution des propriétés du sol. Revue suisse Agric. 38 (1), encart, p.3.

Wade, A. J., E. Black, D. J. Brayshaw, M. El-Bastawesy, P. A. C. Holmes, D. Butterfield, S. Nuimat et K. Jamjoum, 2010. A model-based assessment of the effects of projected climate change on the water resources of Jordan. Phil. Trans. R. Soc. A, 368, 5151–5172.

Wischmeier, 1977. K-factor USLE selon Wischmeier. Use and misuse of the universal soil loss equation In: Soil erosion: prediction and control.

Wischmeier, W. H. et Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: guide to conservation planning. USDA, Agriculture Handbook 537. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

Documents élaborés durant le stage :

Alves F., Cugnère C., Fritsch B., Geist P., Lebas H., Michael R., Rapp O., Schaub A., Van Dijk P., 2014. [Consultation d'experts]. Elaboration grille d'évaluation des mesures anti-érosion à l'échelle de la parcelle, p.4.

Chenu, C., Duparque A., Van Dijk, P., 2014. [Consultation d'experts]. Réunion sur la sélection d'un indice d'érodibilité permettant d'étudier la sensibilité potentielle des sols à l'érosion en Alsace. AgroParisTech, 17 avril 2014.

Annexes

Annexe A : Carte de la sensibilité à l'érosion en Alsace

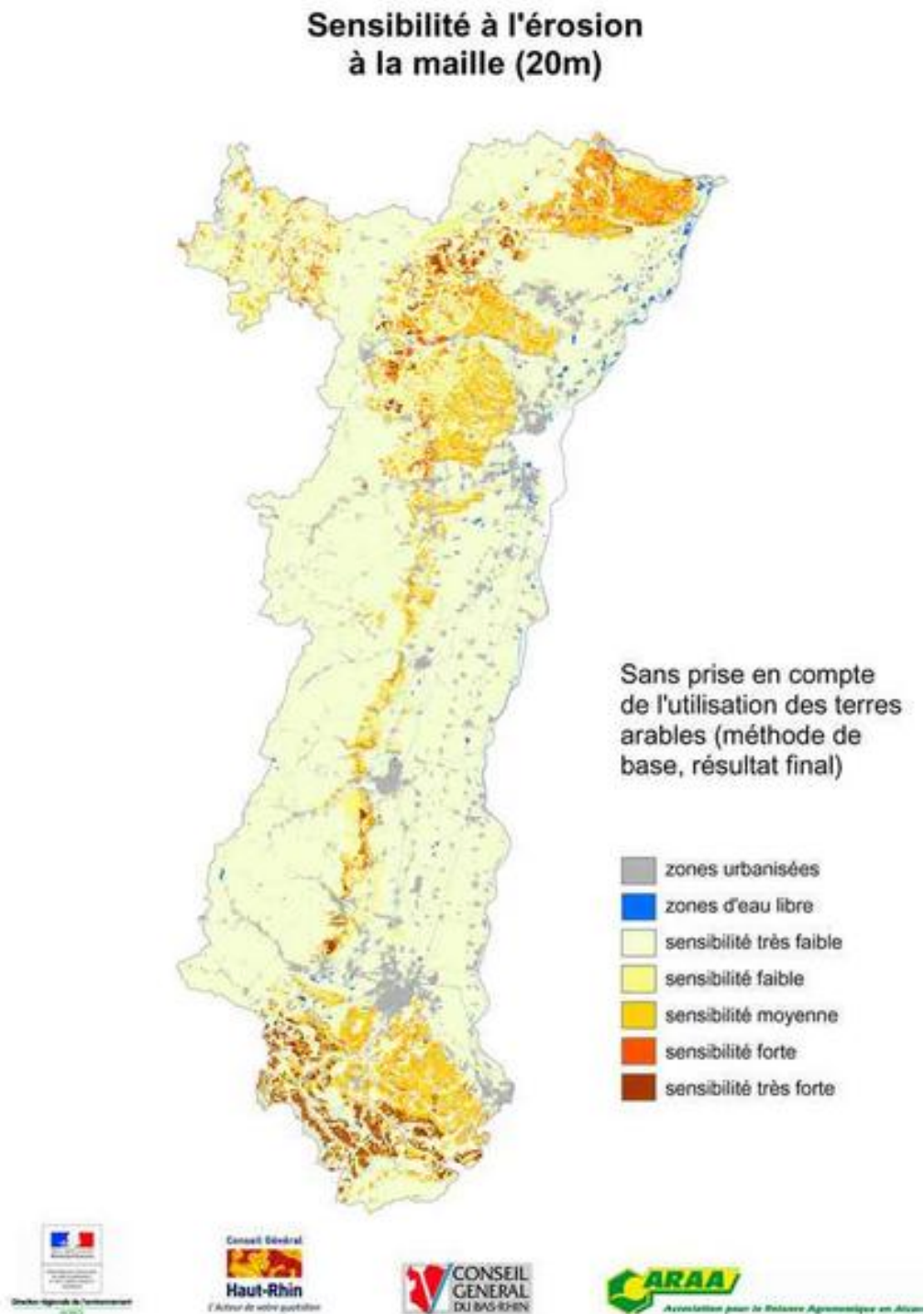


Figure 32: Annexe A: Carte de la sensibilité à l'érosion en Alsace

Source : ARAA, 2009

Annexe B : Les différentes étapes du projet ABC'Terre

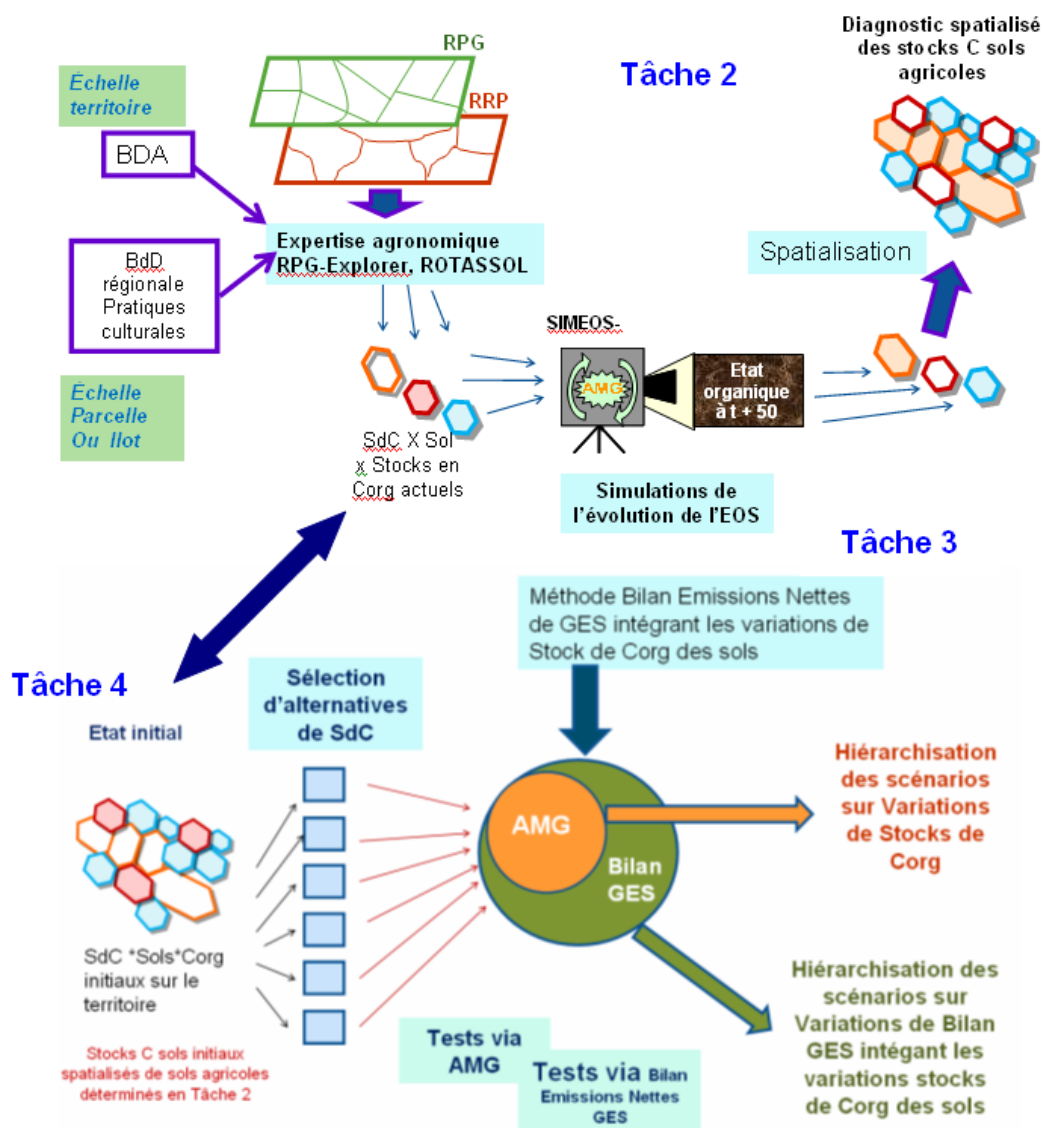


Figure 33: Annexe B: Les différentes étapes du projet ABC Terre
 Source : Document projet ABC Terre (Duparque *et al.* 2012)

Annexe C : Petits Domaines Morphologiques (PDM) de la carte des sols d'Alsace

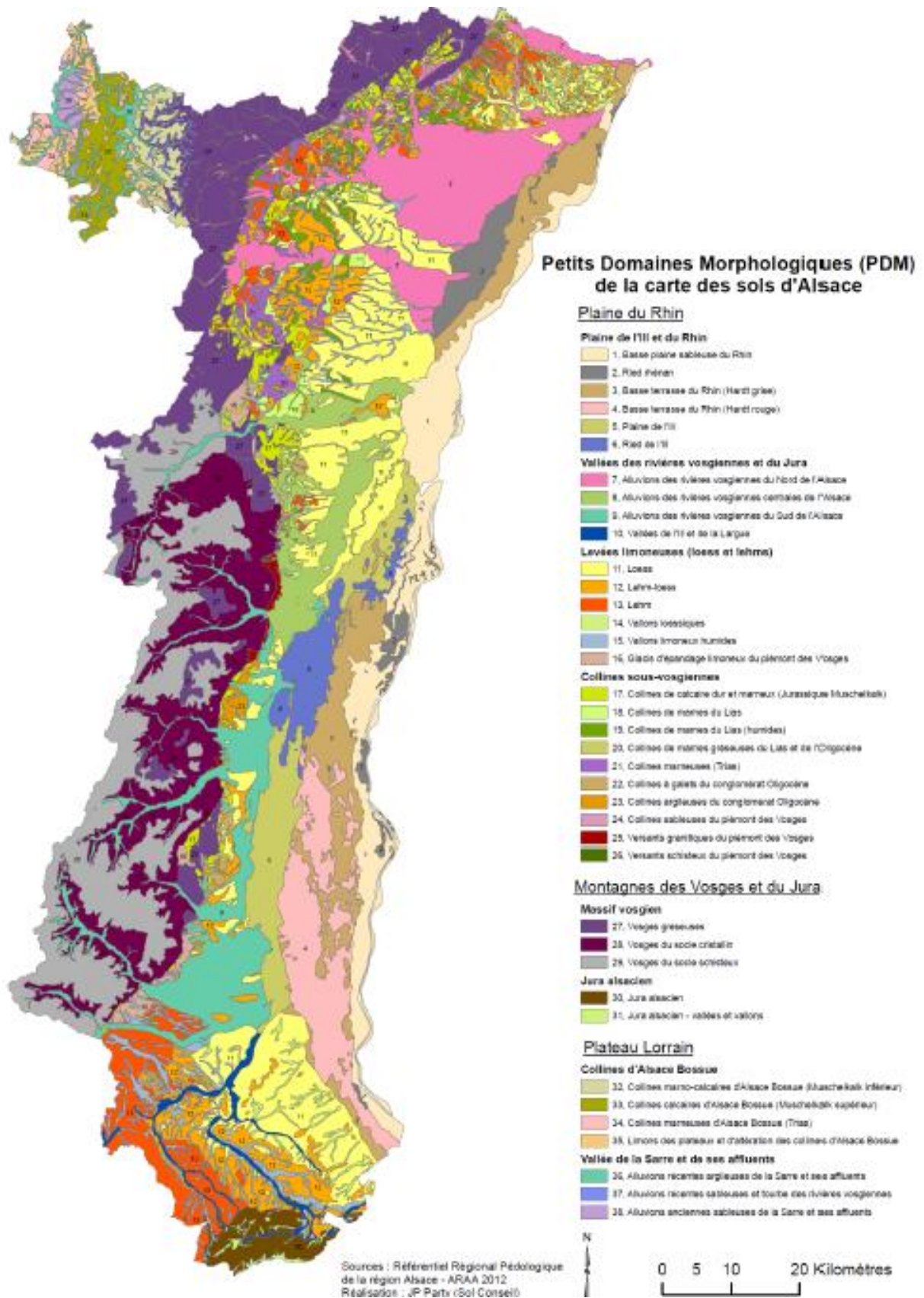


Figure 34: Annexe C: Petits Domaines Morphologiques d'Alsace
Source : RRP Alsace, ARAA (2012)

Annexe D : Carte simplifiée des sols du Sundgau

Figure 2.

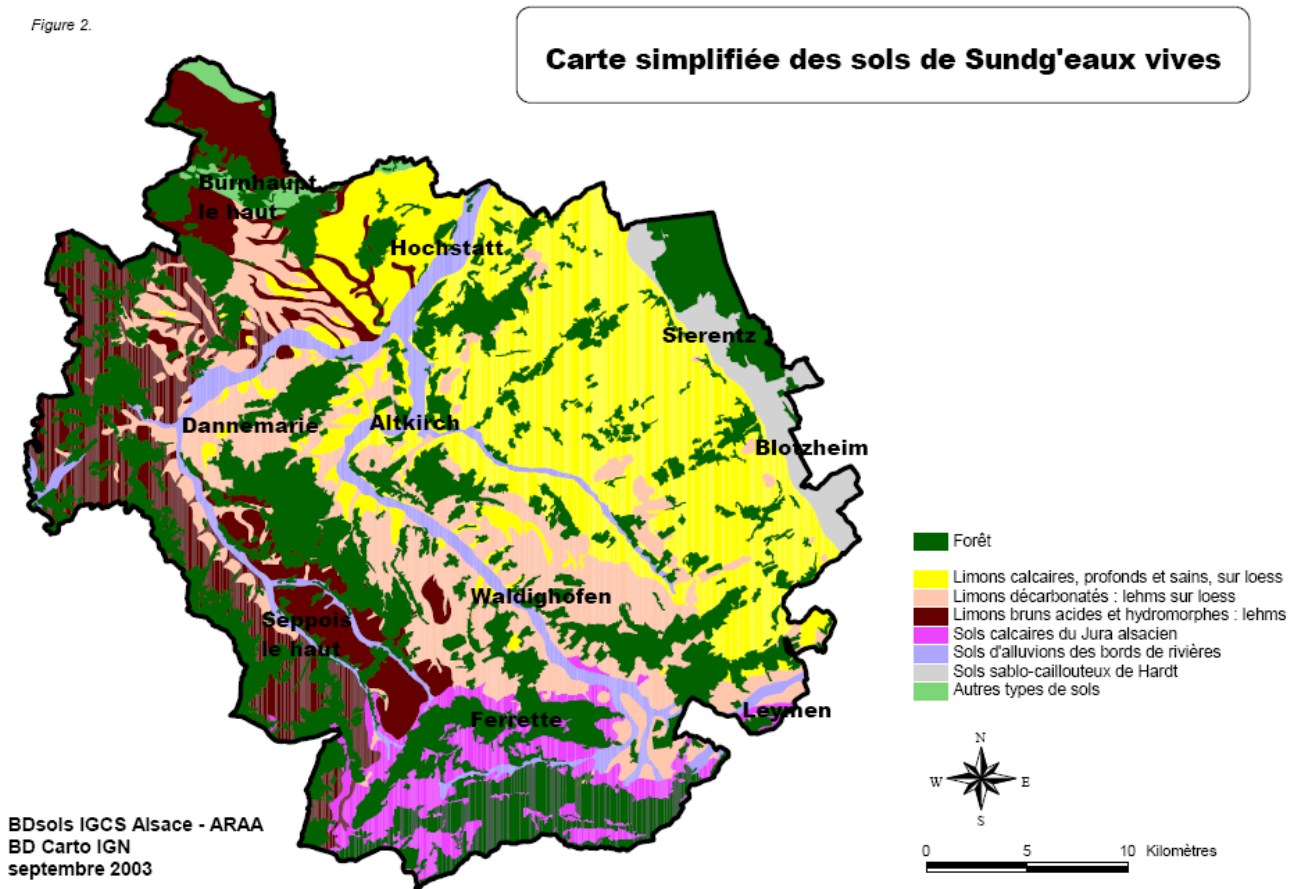


Figure 35: Annexe D: Carte simplifiée des sols du Sundgau

Source: BDSols IGCS Alsace, ARAA (2003)

Annexe E: Cartes des sols de Ferti-Kochersberg et Ferti-Zorn

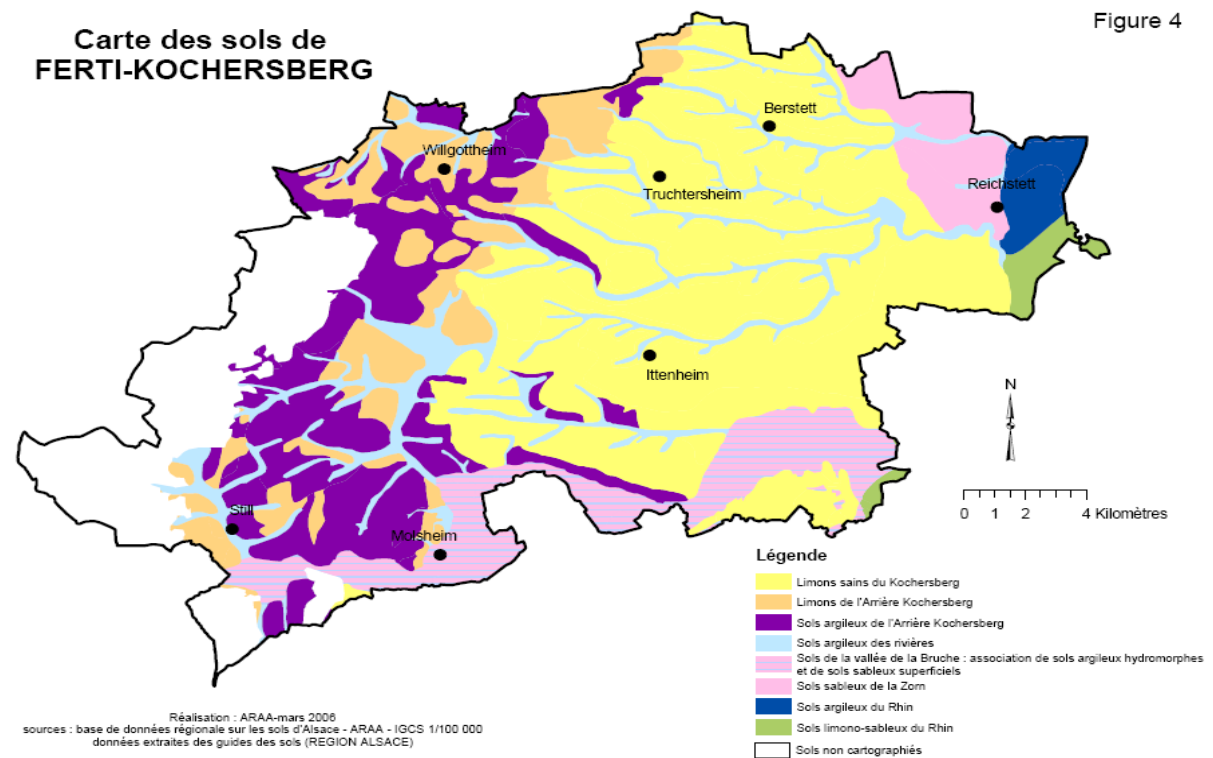


Figure 36: Annexe E: Carte des sols de Ferti-Kochersberg
 Source: BDSols IGCS Alsace, ARAA (2006)

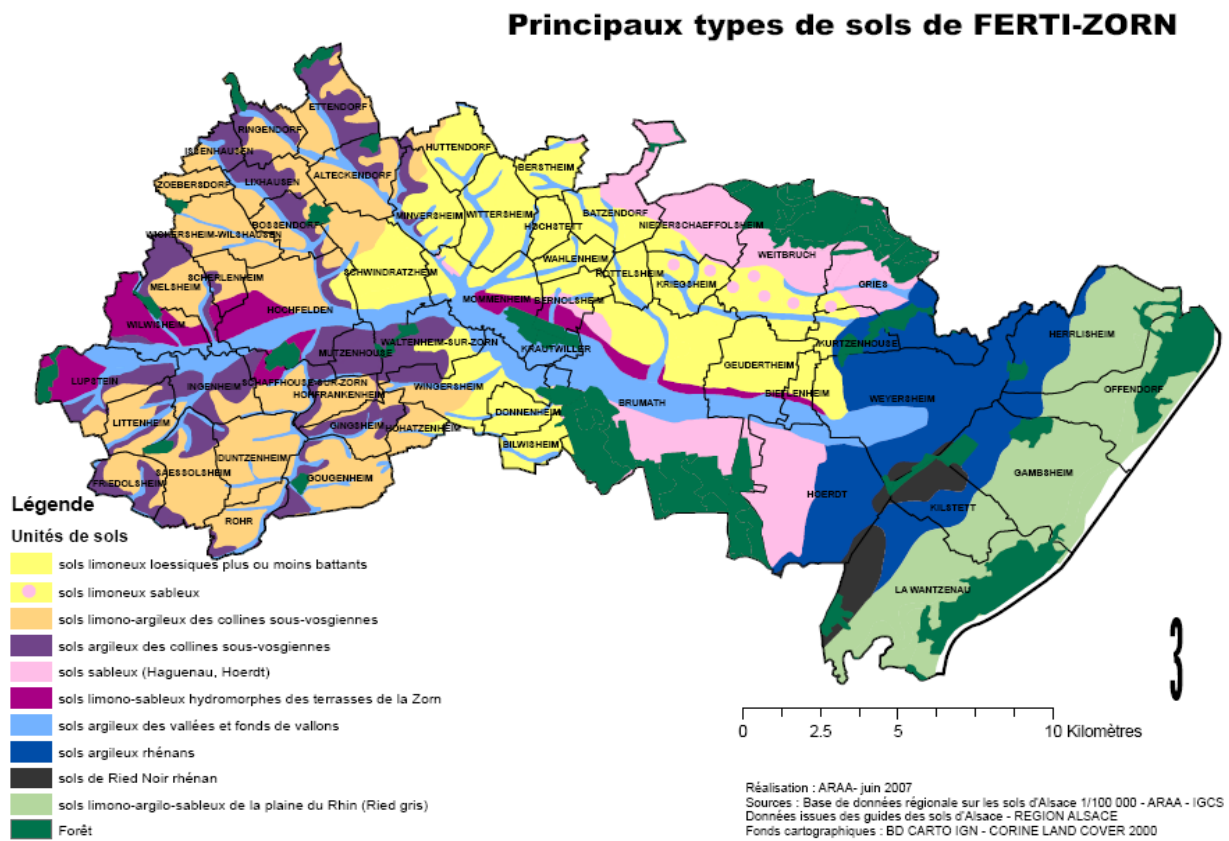


Figure 37: Annexe E: Carte des sols de Ferti-Zorn
 Source: BDSols IGCS Alsace, ARAA (2007)

Annexe F : Nomenclature des cultures pour RPG

Tableau 20: Annexe F: Nomenclature des cultures pour RPG

N°	Nom
1	Blé tendre
2	Maïs grain et ensilage
3	Orge
4	Autres céréales
5	Colza
6	Tournesol
7	Autre oléagineux
8	Protéagineux
9	Plantes à fibres
10	Semences
11	Gel sans production
12	Gel industriel
13	Autre gel
14	Riz
15	Légumineuse à grain
16	Fourrages
17	Estives landes
18	Prairies permanentes
19	Prairies temporaires
20	Vergers
21	Vignes
22	Fruits à coque
23	Olivier
24	Autres cultures industrielles
25	Légumes-Fleurs
26	Canne à sucre
27	Arboriculture
28	Divers

Annexe G : Tableau des contraintes et valeurs agronomiques des précédents/suivants

Tableau 21: Annexe G : Tableau des contraintes et valeurs agronomiques des précédents/suivants

Précédent	Suivants																	
	arboriculture(arb)	autres_legumes(aut_leg)	autres_oleagineux(aut_ol)	avoine(av)	avoine_fourragere(av_fou)	betterave_sucriere(bett_s)	ble(ble)	chanvre(chanv)	colza(col)	divers(div)	escourgeon(esc)	estives_landes(estives)	feverole(fev)	fruits_coques(fr_coq)	gel_industriel(gel_ind)	houblon(houb)	jachere(jach)	
arboriculture(arb)	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
autres_legumes(aut_leg)	8	2	8	10	8	8	10	4	4	6	10	8	8	8	4	0	1	
autres_oleagineux(aut_ol)	8	6	1	8	4	4	8	2	6	6	8	6	8	6	0	1		
avoine(av)	8	10	8	4	10	10	10	8	8	6	10	10	8	8	0	1		
betterave_fourragere(bett_f)	8	2	4	10	1	1	10	4	0	6	6	4	6	8	0	1		
betterave_sucriere(bett_s)	8	2	2	10	2	2	10	2	0	6	2	5	6	8	0	1		
ble(ble)	8	10	8	10	10	10	4	8	8	6	10	10	10	8	8	0	1	
chanvre(chanv)	8	8	6	8	8	8	8	2	6	6	8	8	6	8	6	0	1	
colza(col)	8	6	6	10	4	4	10	4	1	6	8	10	4	8	0	1		
divers(div)	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	6	0	1	
escourgeon(esc)	8	10	8	6	10	10	6	8	10	6	6	10	10	8	10	0	1	
estives_landes(estives)	8	8	10	10	6	6	10	10	6	6	8	4	4	8	6	0	1	
feverole(fev)	8	6	4	10	6	6	10	2	4	6	6	10	1	8	4	0	1	
fruits_coques(fr_coq)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	1	
gel_industriel(gel_i)	8	6	6	10	4	4	10	4	1	6	8	10	4	8	1	0	1	
houblon(houb)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	
jachere(jach)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	
legumineuses_grains(leg_gr)	8	6	6	10	8	8	10	4	4	6	6	6	2	8	4	0	1	
lin(lin)	8	8	2	8	8	8	8	4	6	6	8	8	6	8	6	0	1	
lupin(lup)	8	6	2	10	6	6	10	2	4	6	6	10	2	8	4	0	1	
mais_ensilage(m_e)	8	8	6	8	4	4	10	6	2	6	8	6	6	8	2	0	1	
mais_grain(m_gr)	8	8	6	8	6	6	8	6	2	6	6	6	6	8	2	0	1	
orge_printemps(o_pr)	8	6	8	6	10	10	6	8	10	6	6	10	8	8	10	0	1	
pois(pois)	8	6	4	10	6	6	10	2	4	6	6	10	0	8	4	0	1	
pomme_de_terre_conso(pdt_c)	8	4	6	10	10	10	10	4	6	6	6	8	6	8	6	0	1	
pomme_de_terre_fecule(pdt_fec)	8	4	6	10	10	10	10	4	6	6	6	8	6	8	6	0	1	
prairie_permanente(pp)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
prairie_temporaire(pt)	8	8	10	10	6	6	10	10	6	6	8	4	4	8	6	0	1	
ray_gras_gel(rgg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
riz(riz)	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	6	0	1	
semences(sem)	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	6	0	1	
soja(soj)	8	4	4	8	4	4	10	4	6	6	6	10	4	8	6	0	1	
sorgho(sorg)	8	10	4	8	8	8	10	2	6	6	2	6	6	8	6	0	1	
tabac(tab)	8	6	10	8	6	6	10	4	10	6	10	8	10	8	10	0	1	
tournesol(tour)	8	4	8	10	6	6	10	4	4	6	8	6	4	8	4	0	1	
triticale(tri)	8	10	10	10	10	10	2	8	10	6	10	10	10	8	8	0	1	
verger(verg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
vignes(vin)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Suivants																					
Précédent	gumineuses_grai	lin(lin)	lupin(lup)	mais_ensilage	mais_grain	orge_printemps	pois(pois)	pdt_conso	pdt_fecule	pp	pt	ray_gras_ge	riz(riz)	semences	soja(soj)	sorgho(sorg)	tabac(tab)	tournesol(tour)	triticale(tri)	verger(verg)	vignes(vin)
arboriculture(arb)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
autres_legumes(aut_leg)	8	8	4	4	4	10	8	8	8	0	4	0	6	6	8	4	10	8	10	0	0
autres_oleagineux(aut_ol)	6	2	2	8	8	8	6	6	6	0	8	0	6	8	4	8	10	8	10	0	0
avoine(av)	10	4	8	10	10	10	10	10	10	0	10	0	6	10	10	6	8	10	8	0	0
betterave_fourragere(bett_f)	6	10	4	8	8	10	6	6	6	0	4	0	6	4	10	8	8	6	8	0	0
betterave_sucriere(bett_s)	8	10	2	8	8	8	6	6	6	0	5	0	6	5	10	8	8	6	8	0	0
ble(ble)	10	10	8	10	10	10	10	10	10	0	10	0	6	10	10	8	10	10	6	0	0
chanvre(chanv)	6	6	2	8	8	8	6	6	6	0	8	0	6	6	6	6	8	4	8	0	0
colza(col)	6	10	4	4	4	8	4	6	6	0	10	0	6	10	8	8	6	4	1	0	0
divers(div)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	6	0	6	6	6	6	6	6	6	0	0
escourgeon(esc)	10	10	8	10	10	8	10	10	10	0	10	0	6	10	10	10	10	10	6	0	0
estives_landes(estives)	2	4	10	10	10	6	4	8	8	0	4	0	6	4	4	10	4	6	10	0	0
feverole(fev)	4	2	2	8	8	6	0	6	6	0	10	0	6	10	4	6	4	6	2	0	0
fruits_coques(fr_coq)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ge_industriel(g_i)	6	10	6	8	8	8	4	6	6	0	10	0	6	10	8	8	10	4	1	0	0
houblon(houb)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
jachere(jach)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
legumineuses_grains(leg_gr)	2	6	4	8	8	6	2	6	6	0	6	0	6	6	6	6	4	6	6	0	0
lin(lin)	6	6	1	8	8	8	6	6	6	0	8	0	6	6	6	6	8	4	8	0	0
lupin(lup)	4	2	6	8	8	10	2	10	10	0	10	0	6	6	4	2	4	2	10	0	0
mais_ensilage(m_e)	8	10	6	8	8	8	6	6	6	0	6	0	6	6	10	4	10	6	10	0	0
mais_grain(m_gr)	8	10	6	8	8	8	6	6	6	0	6	0	6	6	10	4	10	6	10	0	0
orge_printemps(o_pr)	8	8	8	10	10	4	8	10	10	0	10	0	6	10	8	8	10	10	6	0	0
pois(pois)	4	2	2	8	8	6	1	6	6	0	10	0	6	10	4	8	4	6	10	0	0
pomme_de_terre_conso(pdt_c)	6	6	4	8	8	6	6	1	2	0	8	0	6	8	6	4	6	6	10	0	0
pomme_de_terre_fecule(pdt_fec)	6	6	4	8	8	6	6	0	1	0	8	0	6	8	6	4	6	6	10	0	0
prairie_permanente(pp)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
prairie_temporaire(pt)	0	4	10	10	10	6	4	8	8	0	10	0	6	4	4	10	4	6	10	0	0
ray_gras_ge(rrg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
riz(riz)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	6	0	6	6	6	6	6	6	6	0	0
semences(sem)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	6	0	6	6	6	6	6	6	6	0	0
soja(soj)	4	4	4	8	8	10	4	8	8	0	10	0	6	6	6	4	4	4	10	0	0
sorgho(sorg)	4	10	6	4	6	10	10	10	10	0	6	0	6	6	10	4	6	6	10	0	0
tabac(tab)	8	8	4	6	6	10	10	10	10	0	8	0	6	6	10	8	0	8	10	0	0
tournesol(tour)	6	4	8	6	6	10	4	6	6	0	6	0	6	6	4	4	10	4	10	0	0
triticale(tri)	10	10	8	8	8	6	10	10	10	0	10	0	6	6	10	8	10	10	0	0	0
verger(verg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
vignes(vin)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10

Annexe H : Les différents indices concernant la stabilité structurale

Comparaison des différents indices de stabilité structurale, d'érodibilité :

Source : Document issue de la Réunion AgroParisTech, Chenu C., Duparque A., Van Dijk P., 2014

2. Comparaison des différents indices de stabilité structurale / d'érodibilité

2.1. Les méthodes testées et leurs sensibilités à la teneur en Corg

- **Indice de battance** (Rémy et Marin-Laflièche, 1974)
- « **Aggregate stability factor b** » du modèle WEPP (Potter et al., 1990; Alberts et al., 1995)
- **Diamètre moyen pondéré (MWD) après désagrégation** (humectation rapide) (Darboux et al., 2008)
- **Macro-agrégats stables > 200 µm (MA200)** (Le Bissonnais et al, 2007)
- **K-factor USLE selon Wischmeier** (1977)
- **K-factor USLE selon Torri et al.** (1997)

2.1.1. Indice de battance (Rémy et Marin-Laflièche, 1974) (Ib)

$$IB = \frac{(1,5 \times \% \text{ de limons fins}) + (0,75 \times \% \text{ limons grossiers})}{(\% \text{ argile} + 10 \times \% \text{ de matière organique})} - C$$

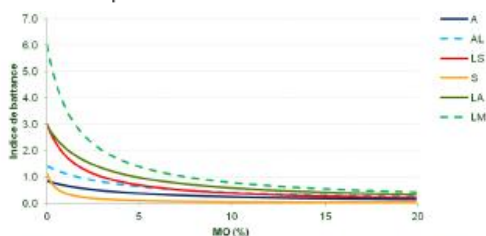
si pH < 7, C = 0 ;

si pH > 7, C = 0,2 (pH - 7)

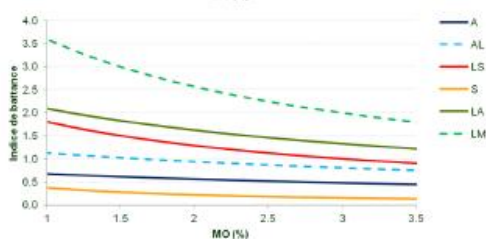
Interprétation :	IB > 2	très battant
	IB = 1,8 - 2	battant
	IB = 1,6 - 1,8	assez battant
	IB = 1,4 - 1,6	peu battant
	IB < 1,4	non battant

N=40, R2=0.59 (comparé aux résultats de test de stabilité de Hénin)

Sols uniquement limoneux ?



- LM et LA sensibles
- A et S peu sensibles
- Définition valeur objective possible pour les sols limoneux (1.6 ?)



2.1.2. Soil stability factor b WEPP

$$RR_t = RR_i e^{-C_{br} \left(\frac{R_c}{b} \right)^{0.6}}$$

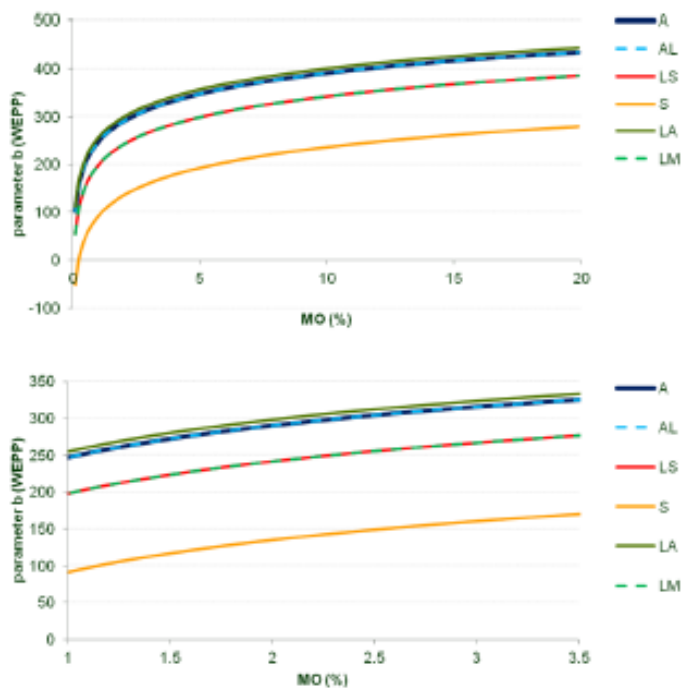
$$b = 63 + 62.7 \ln(50 \text{ orgmat}) + 1570 \text{ clay} - 2500 \text{ clay}^2$$

where *orgmat* is the soil organic matter content (0-1), and *clay* is the soil clay content (0-1).

Source : WEPP documentation (1995), Chapter 7

Chapter 7. SOIL COMPONENT

E.E. Alberts, M.A. Nearing, M.A. Wetz, L.M. Risse, F.B. Pierson, X.C. Zhang, J.M. Lallen and J.R. Simanton



- Influence texture uniquement à travers de l'argile
- Impact MO identique pour toutes les classes de texture
- Sols sableux les plus sensibles car pas de cohésion
- Valeur objective : difficile à définir

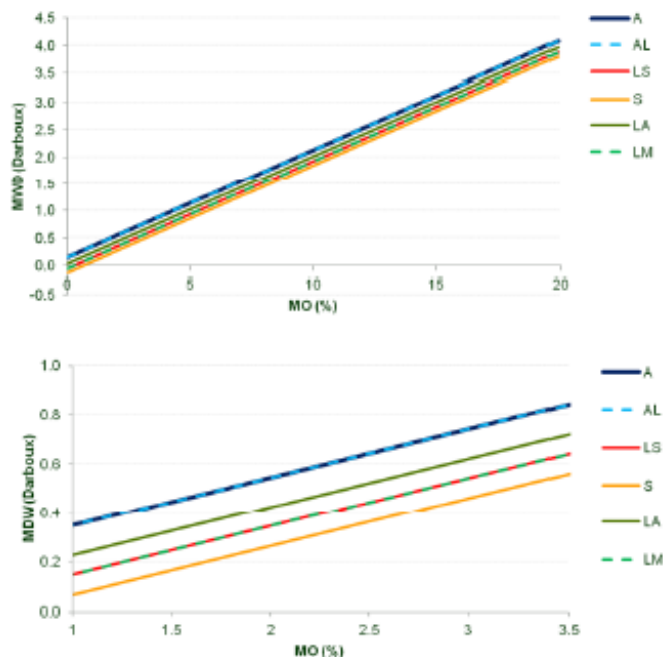
2.1.3. Diamètre moyen pondéré (MWD) après désagrégation (humectation rapide)

$$\text{MWD} = 0,34 C + 0,008 \text{ Argile} + \text{Usage}$$

Où MWD est exprimé en mm, Corg et Argile en %.

N=380, R2=0,84

Source : Darboux et al. (2008) ; Chenu et al. (2011)



- Impact MO très dominant
- Influence texture faible et uniquement à travers de l'argile
- Sols sableux les plus sensibles car pas de cohésion
- Valeur objective : difficile à définir

2.1.4. Macro-agrégats stables > 200 µm (MA200) (Le Bissonnais et al, 2007)

$$MA200 = -27.56 + 0.98F(SOC) + 0.41[\text{clay-plus-fine silt}] + 0.13CaCO_3, \quad (3)$$

where $F(SOC)$ is a exponential transformation of the SOC variable:

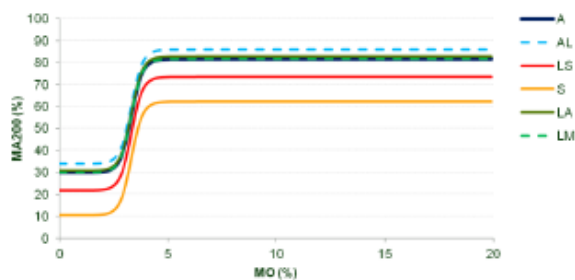
$$F(SOC) = 35.6 + 52.86 / (1 + 4.14 \times 10^5 \times \exp(-0.67SOC)), \quad (4)$$

N=68, R2=0.88, mais que quelques sols calcaires méditerranéens

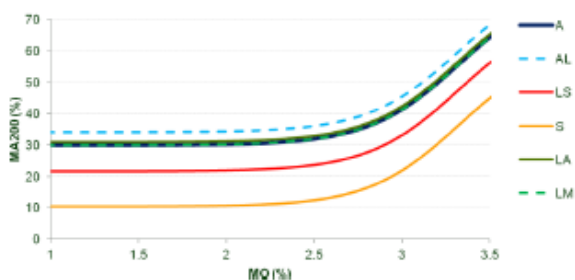
Table 3 Physico-chemical topsoil properties (0–5 cm) of the three sites (average of 4–15 samples for each farming system)

Stations	Situations	Clay (0–2 µm)	Silt (2–50 µm)	Sand (50–2000 µm) /g kg ⁻¹	Gravels (> 2000 µm)	Organic C	CaCO ₃	pH (water)
Corconne village	Garrigue ^a	327	510	163	226	52	556	7.7
	Fallow	353	494	153	88	49	523	7.7
	Vine	405	392	203	97	9	552	7.9
Pradel	Vine	341	413	246	132	27	342	7.7
Roujan	Vine ^a	180	414	406	33	15	309	7.8

^aSites used for the second phase of the study.



- Impact MO restreint mais fort entre 2.5 et 5% MO
- Influence texture principalement à travers de l'argile
- Sols sableux les plus sensibles car pas de cohésion
- Valeur objective : difficile à définir



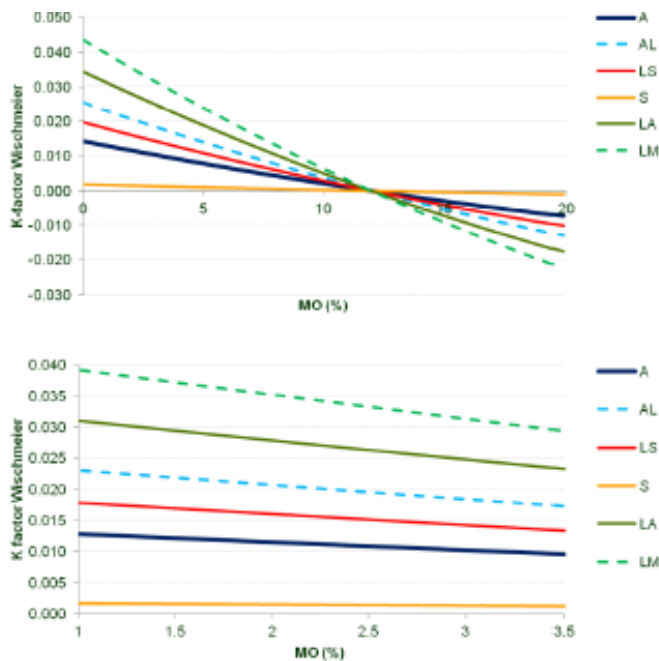
2.1.5. K-factor USLE selon Wischmeier (1977) (K_w)

the equation proposed by Wischmeier (1977):

$$K_w = (12 - OM)[p(100 - C)]^{1.14}$$

where OM and C are expressed as percentages and p equals the percentage of grain diameters between 0.002 and 0.100 mm.

Basé sur 55 sols majoritairement de texture « moyenne » (<70% de limons) des USA (mid-west), simulation de pluies.



- Forte influence texture
- Impact MO fonction de la texture !
- Equation pas valide pour $MO > 12\%$
- Sols sableux pas sensibles car peu ruisselants, sols argileux peu sensibles car très cohésifs
- Valeur objective : difficile à définir

2.1.6. K-factor USLE selon Torri et al. (1997) (K_t)

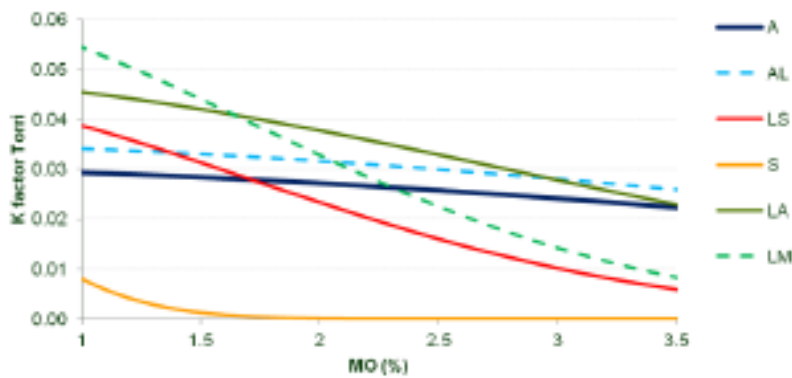
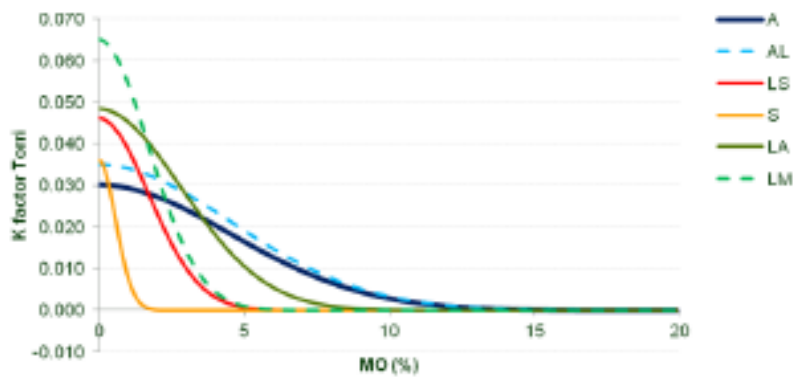
$$K = 0.0293(0.65 - D_g + 0.24D_g^2) \times \exp\left\{-0.0021 \frac{OM}{C} - 0.00037 \left(\frac{OM}{C}\right)^2 - 4.02C + 1.72C^2\right\} \quad (5)$$

with a correlation coefficient $r^2 = 0.41$ ($n = 207$) and where D_g is as defined in Eq. (1), OM is expressed as a percentage and C as a fraction. K is expressed in SI units.

Avec $D_g = \log$ du diamètre géométrique moyenne des particules :

$$D_g = \frac{-3.5C - 2.0L - 0.5S}{100} \quad (3)$$

where C , L and S are respectively the percentage of three main textural classes Clay, Loam and Sand;



- Impact MO fonction de la texture !
- Forte influence MO mais pas linéaire
- Equation cohérente
- Sols sableux pas sensibles car peu ruisselants, sols argileux peu sensibles car très cohésifs
- Valeur objective : définition possible (entre 0.03 et 0.035 ?)

Annexe I : La grille de mesure anti-érosion

Source : Agro-PEPS (outil collaboratif d'informations techniques et d'échanges, développé par le RMT Systèmes de culture innovants)

Grille d'évaluation Mesures anti-érosion à l'échelle de la parcelle

Ci-dessous le questionnaire précédent la **conception de systèmes de cultures alternatifs au risque d'érosion et de battance des sols.**

Il y a quatre paramètres à noter pour chaque mesure avec **une note allant de 1 à 4**. La note de 1 étant une note faible et 4 une note élevée.

Les paramètres concernent la pertinence de la mesure, la faisabilité (uniquement au niveau technique), l'acceptabilité sur le terrain pressentie, et les effets collatéraux entraînés par la mesure (gestion des adventices,...).

Dans notre étude en Alsace, les périodes concernant les risques d'érosion sont concentrées au printemps (surtout les mois de mai et juin). Les différentes mesures dans la grille ci-dessous concernent donc les **cultures de printemps**.



N°	Levier pour limiter le ruissellement et l'érosion et le détachement des particules du sol en favorisant l'infiltrabilité et en limitant la formation de croûte de battance	Type d'effet du levier (couverture culture ou résidus, stabilité structurale, structure/battance, rugosité et activité biologique)	Note de 1 à 4 (1= faible à 4 = élevé)			
			Pertinence de la mesure	Faisabilité technique	Acceptabilité sur le terrain pressentie	Effets collatéraux (1=beaucoup d'effet 4 = peu d'effet)
Travail du sol						
1	Adapter le travail du sol perpendiculaire au sens de la pente	Effet rugosité	2	2	1	3
2	Effacer les traces de roues de semis suffisamment en profondeur	Effet rugosité et structure du sol	3	4	3	4
3	Pratiquer le désherbage mécanique - Herse étrille, houe rotative	Effet structure et rugosité du sol	2	2	2	3
	Pratiquer le désherbage mécanique - Bineuse		1	3	4	4
4	Pratiquer le strip-till	Effet stabilité structurale et rugosité (inter-rang) et activité biologique du sol	3	3	2	2
5	Pratiquer un travail superficiel du sol après la récolte	Effet couverture du sol, stabilité structurale, rugosité et activité biologique	4	4	2	3
6	Réaliser un travail du sol plus grossier	Effet rugosité et structure du sol	3	3	2	3
7	Réaliser un travail du sol superficiel après la récolte (cas maïs ensilage)	Effet couverture du sol et rugosité	2	4	1	2
8	Drainage, limitant le risque de ruissellement par saturation (hivernal)	Effet structure du sol	1	1	1	3
9	Pratiquer le semis direct des cultures de printemps	Effet stabilité structurale et biologique	4	(*)	1	2

(*) N° 9 : Faisabilité (avec un semoir adapté)	
Betterave sucrière	1
Tabac	1
Choux	1
Maïs	2
Tournesol	2
Soja	3

Légende :

	1	--
	2	-
	3	+
	4	++

N°	Levier pour limiter le ruissellement et l'érosion et le détachement des particules du sol	Type d'effet du levier	Note de 1 à 4 (1= faible à 4 = élevé)			
			Pertinence de la mesure	Faisabilité technique	Acceptabilité sur le terrain pressentie	Effets collatéraux (1=beaucoup d'effet 4 = peu d'effet)

Couverture du sol

10	Cultiver des espèces pluriannuelles	Effet couverture du sol	4	4	4 éleveurs 2 céréaliers	4
11	Favoriser les repousses après la récolte (colza, blé)	Effet couverture du sol	1	4	3	4
12	Planter des cultures dérobées et labourées avant semis de printemps	Effet couverture du sol et stabilité structurale	1	3	3	4
13	Planter des cultures dérobées et semis direct de la culture de printemps	Effet couverture du sol et stabilité structurale	4	2	1	2
14	Appliquer le sous-semis	Effet couverture du sol et stabilité structurale	1	3	1	4
15	Planter des cultures intermédiaires à fortes production de biomasse ou des espèces gélives ou des légumineuses	Effet stabilité structurale	3	3	3	4
16	Choix des successions de cultures : (1) Augmenter la fréquence de culture d'hiver dans la rotation	Effet couverture du sol, stabilité structurale et rugosité	3	4	2	4
17	(2) Augmenter la fréquence de culture d'hiver dans la rotation sur les parcelles à fort risque (pente,...)		4	4	3	4

Mesure hydraulique

18	Maximiser l'efficacité des apports d'eau en cas d'irrigation : 'goutte à goutte'	Effet structure/battance et rugosité du sol	2	1	1	4
----	--	---	---	---	---	---

Apports organiques, amendements

19	Réaliser des apports organiques (compost, effluents organiques,...)	Effet stabilité structurale et activité biologique	4	4 éleveurs	4 éleveurs	3
				3 céréaliers	2 céréaliers	
20	Réaliser des apports d'amendements minéraux basiques pour limiter la battance	Effet stabilité structurale	3	4	4	4

Annexe J : Simulations Simeos-AMG

Avec labour systématique:

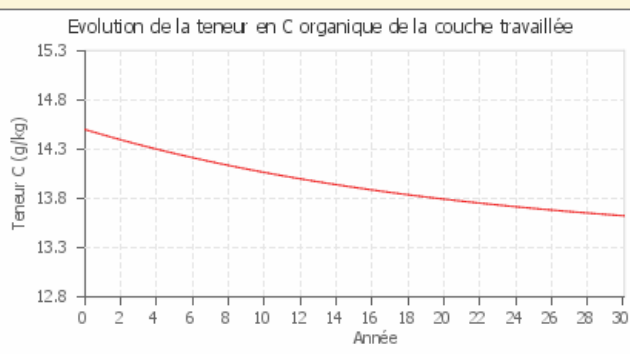
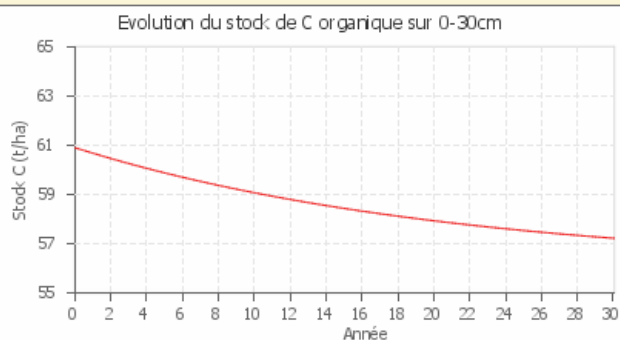
Exploitation : *Christine Rosenfelder*
Parcelle : *Test Matière organique*
Scénario : *Labour et Non labour*

Stock à l'équilibre : 56.05 T/ha

Année	Stock C 0-30 cm t/ha	Teneur moyenne sur Zone travaillée 0-30 cm		Teneur moyenne sur prof de prélèvement 0-30 cm	
		Teneur C g/kg	Teneur MO %	Teneur C g/kg	Teneur MO %
0	60,90	14,50	2,90	14,50	2,90
2	60,46	14,40	2,88	14,40	2,88
4	60,06	14,30	2,86	14,30	2,86
6	59,70	14,21	2,84	14,21	2,84
8	59,37	14,14	2,83	14,14	2,83
10	59,07	14,06	2,81	14,06	2,81
12	58,80	14,00	2,80	14,00	2,80
14	58,55	13,94	2,79	13,94	2,79
16	58,32	13,89	2,78	13,89	2,78
18	58,12	13,84	2,77	13,84	2,77
20	57,93	13,79	2,76	13,79	2,76
25	57,53	13,70	2,74	13,70	2,74
30	57,22	13,62	2,72	13,62	2,72
35	56,97	13,57	2,71	13,57	2,71
40	56,78	13,52	2,70	13,52	2,70
45	56,62	13,48	2,70	13,48	2,70
50	56,50	13,45	2,69	13,45	2,69
100	56,09	13,36	2,67	13,36	2,67

Flux de biomasse végétale restituée au sol :

Biomasse aérienne moy. restituée : 7.93 T de MS/ha/an
Biomasse racinaire moy. restituée : 3.02 T de MS/ha/an



► Répartition sur la profondeur de prélèvement (30 ans)

Sans labour :

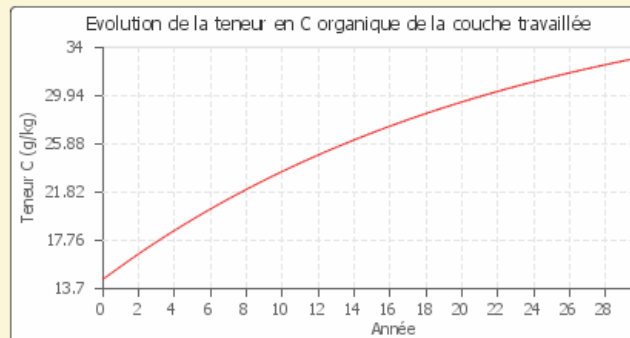
Exploitation : *Christine Rosenfelder*
Parcelle : *Test Matière organique*
Scénario : *Labour et Non labour*

Stock à l'équilibre : 60.43 T/ha

Année	Stock C 0-30 cm t/ha	Teneur moyenne sur Zone travaillée 0-4 cm		Teneur moyenne sur prof de prélèvement 0-30 cm	
		Teneur C g/kg	Teneur MO %	Teneur C g/kg	Teneur MO %
0	60,90	14,50	2,90	14,50	2,90
2	61,29	16,65	3,33	14,59	2,92
4	61,62	18,62	3,72	14,67	2,93
6	61,90	20,43	4,09	14,74	2,95
8	62,14	22,08	4,42	14,80	2,96
10	62,34	23,59	4,72	14,84	2,97
12	62,50	24,97	4,99	14,88	2,98
14	62,63	26,24	5,25	14,91	2,98
16	62,73	27,40	5,48	14,94	2,99
18	62,81	28,46	5,69	14,95	2,99
20	62,87	29,43	5,89	14,97	2,99
25	62,93	31,52	6,30	14,98	3,00
30	62,90	33,19	6,64	14,98	3,00
35	62,82	34,54	6,91	14,96	2,99
40	62,71	35,61	7,12	14,93	2,99
45	62,56	36,48	7,30	14,90	2,98
50	62,41	37,17	7,43	14,86	2,97
100	61,11	39,67	7,93	14,55	2,91

Flux de biomasse végétale restituée au sol :

Biomasse aérienne moy. restituée : 7.93 T de MS/ha/an
Biomasse racinaire moy. restituée : 3.02 T de MS/ha/an



► Répartition sur la profondeur de prélèvement (30 ans)

Source : *Simulations Simeos AMG, outil Agrotransfert*

Annexe K : RPG Explorer : rotations de culture en fonction du type d'EA

Exemple de sortie RPG Explorer : Céréaliers à dominante maïs (CM) pour le secteur FKfZ

Rotations	CM	%cumulé
ble-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr	60.51%	60.51%
bett_s-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr	7.65%	68.16%
tab-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr	3.41%	71.57%
aut_leg-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr	4.25%	75.82%
jach	2.16%	77.98%
pt	2.15%	80.13%
pp	2.01%	82.14%
tri-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr	1.89%	84.03%
ble-m_gr-m_gr	1.58%	85.61%
pdt_fec-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr	1.39%	87.00%
ble-bett_s-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr	1.89%	88.88%
esc-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr	2.62%	91.51%
pt-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr	1.08%	92.58%
m_gr-m_gr-m_gr-pt-pt-pt	0.85%	93.43%
pt-jach	0.69%	94.12%
div	0.56%	94.69%
ble-col-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr	0.51%	95.20%
verg	0.40%	95.60%
pdt_fec-ble-bett_s-m_gr-m_gr-m_gr	0.63%	96.23%
m_gr-m_gr-m_gr-m_gr-ble-aut_leg	0.32%	96.56%
pt-m_gr-tab-pt-pt-pt	0.31%	96.87%
m_gr-m_gr-m_gr-m_gr-ble-esc	0.31%	97.18%
vin	0.30%	97.49%
m_gr-m_gr-m_gr-ble-bett_s	0.27%	97.76%
ble-pdt_fec-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr	0.27%	98.02%
m_gr-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr-fev	0.43%	98.45%
pt-pt-pt-m_gr-pt-pt	0.24%	98.69%
m_gr-m_gr-m_gr-m_gr-ble-tab	0.20%	98.89%
m_gr-m_gr-m_gr-aut_leg-ble-m_gr	0.20%	99.09%
m_gr-bett_s-m_gr-m_gr-m_gr	0.16%	99.25%
pt-ble-m_gr-pt-pt-pt	0.15%	99.40%
ble-col-m_gr-m_gr-m_gr-chanv	0.13%	99.53%
m_gr-tab-pt-pt-pt-o_pr	0.11%	99.64%
m_gr-m_gr-ble-esc	0.10%	99.74%
m_gr-jach	0.08%	99.82%
m_gr	0.07%	99.89%
ble-tab	0.07%	99.96%
esc-m_gr-m_gr-m_gr-m_gr-ble	0.03%	99.98%
pt-pt-pt-esc-m_gr-pt	0.02%	100.00%
aut_leg-bett_s-m_gr-ble-m_gr-m_gr	0.00%	100.00%
...		

Annexe L : Carte du secteur Ferti-Zorn et Ferti-Kochersberg de la sensibilité potentielle l'érosion des systèmes de culture

Cartographie I_{spe} FKZ

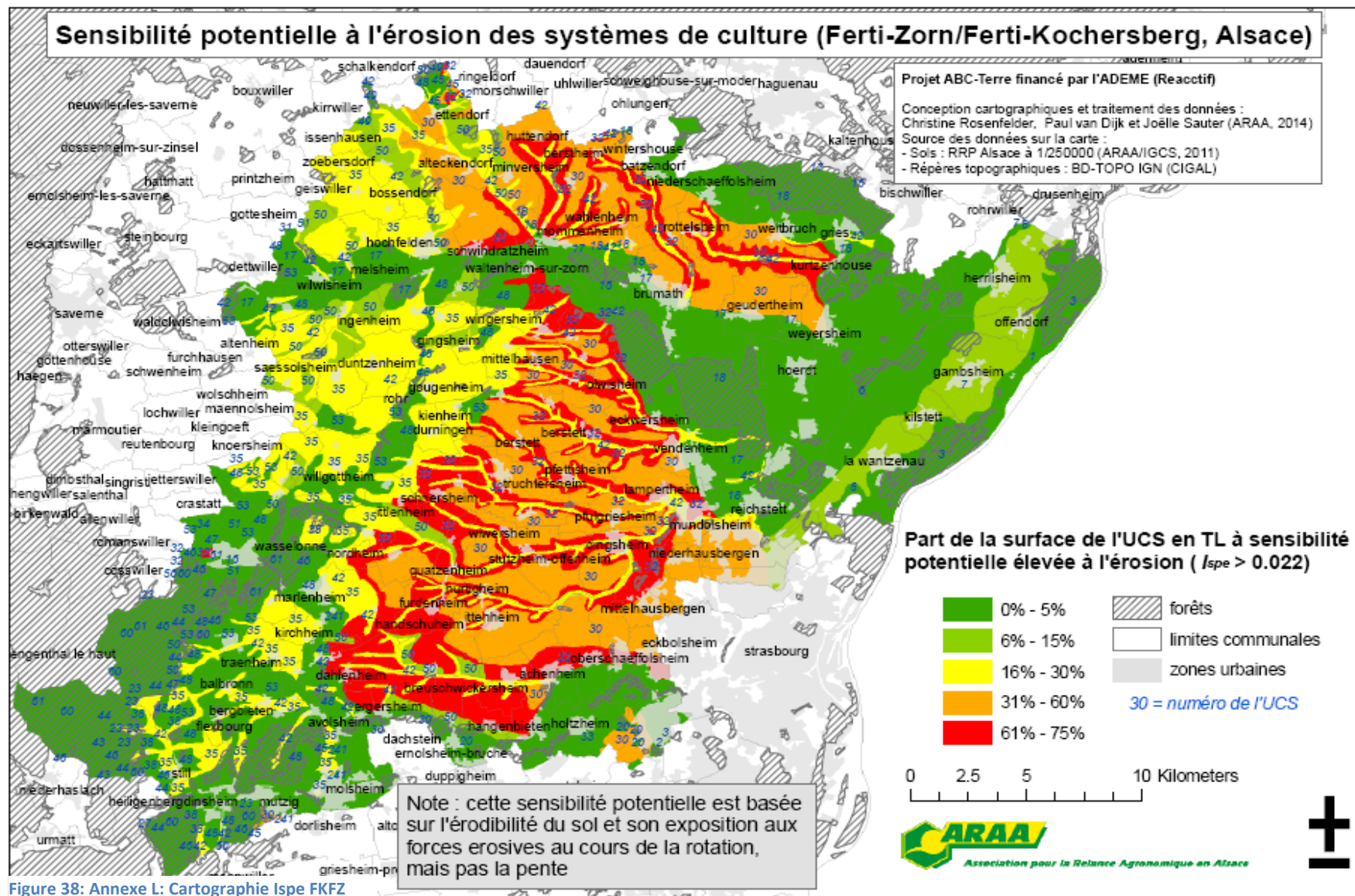
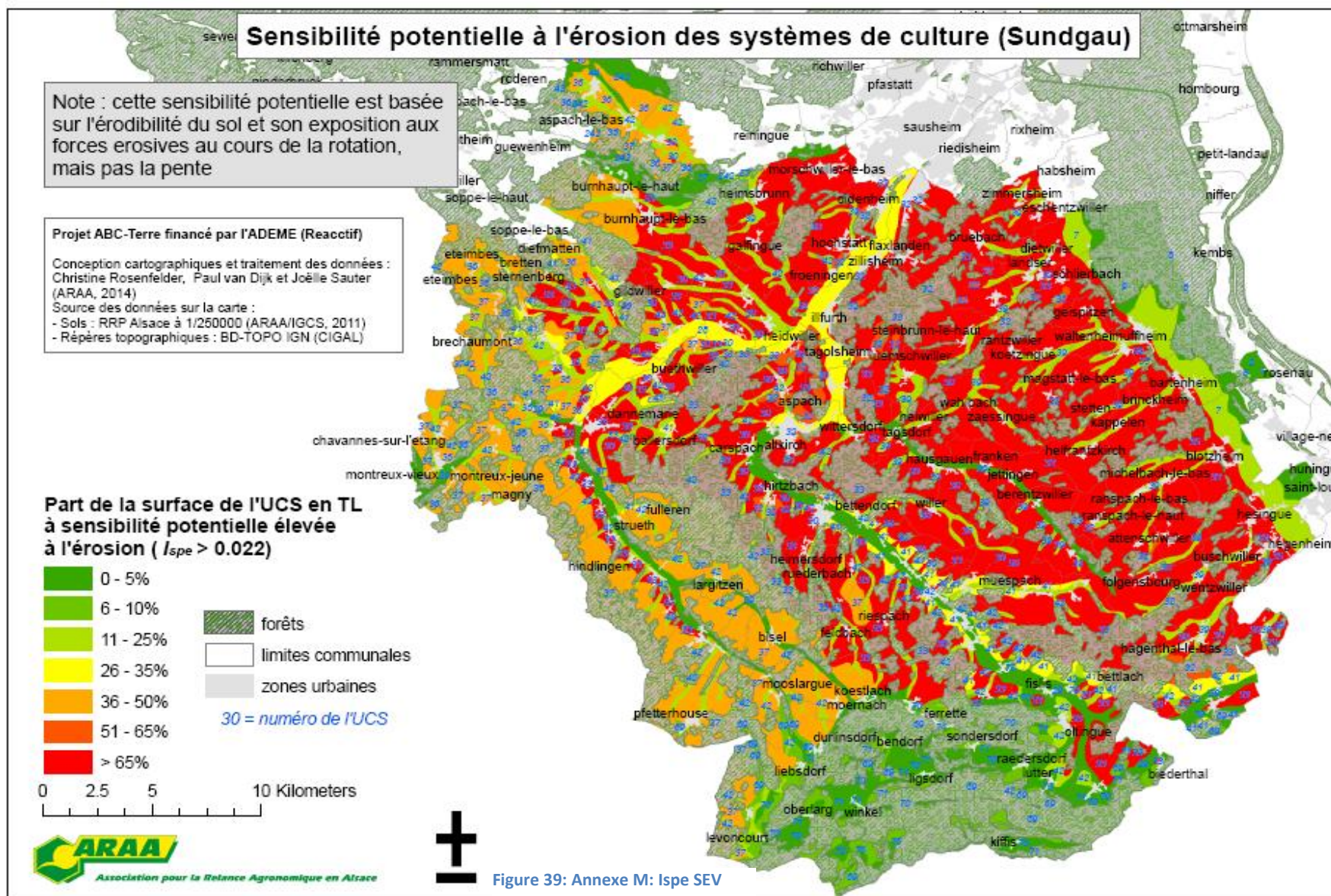


Figure 38: Annexe L: Cartographie I_{spe} FKZ

Annexe M : Cartes du secteur du Sundgau de la sensibilité potentielle l'érosion des systèmes de culture

Cartographies I_{spe} SEV ; I_{erod} SEV ; I_{expo} SEV



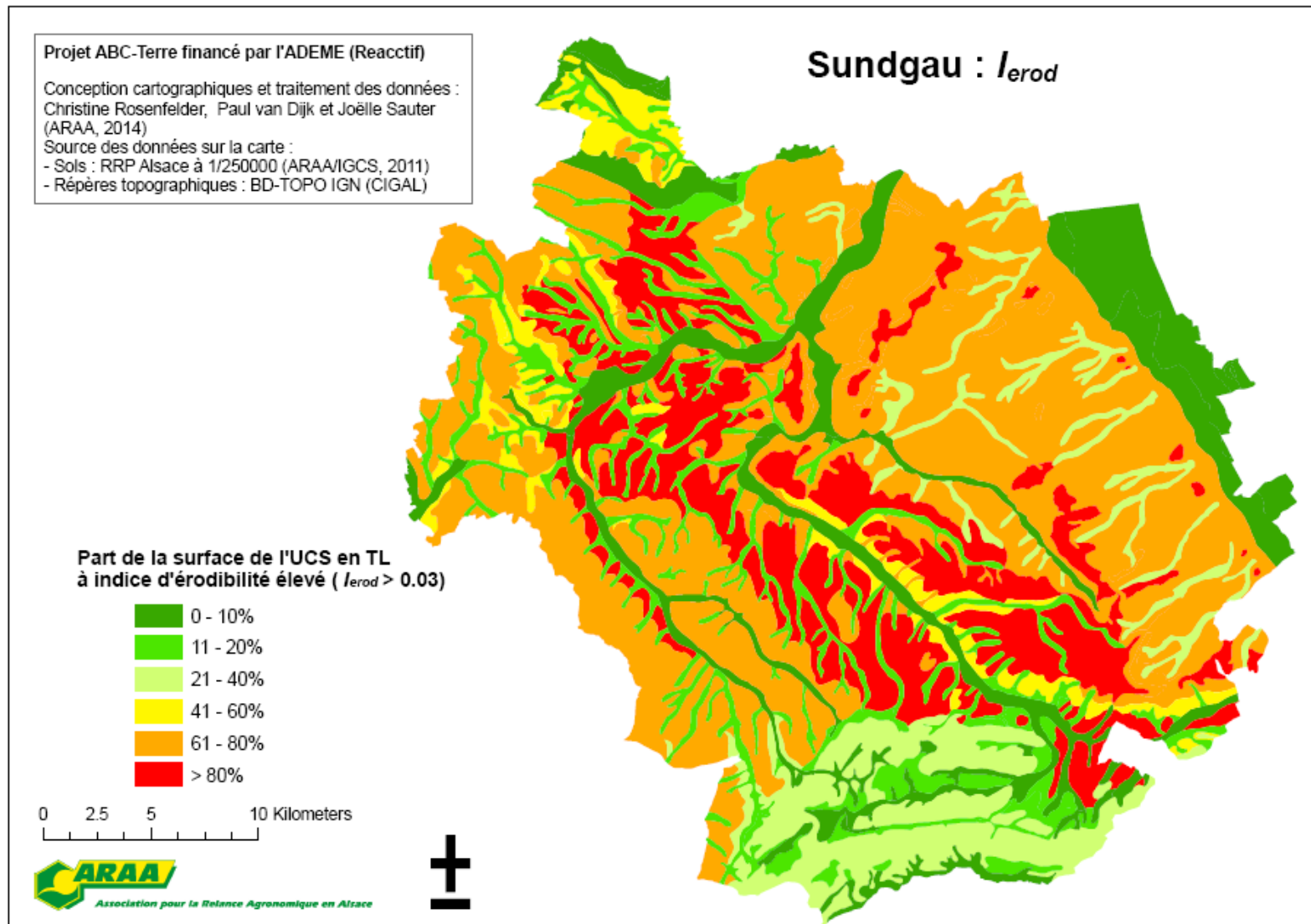


Figure 40: Annexe M: I_{erod} SEV

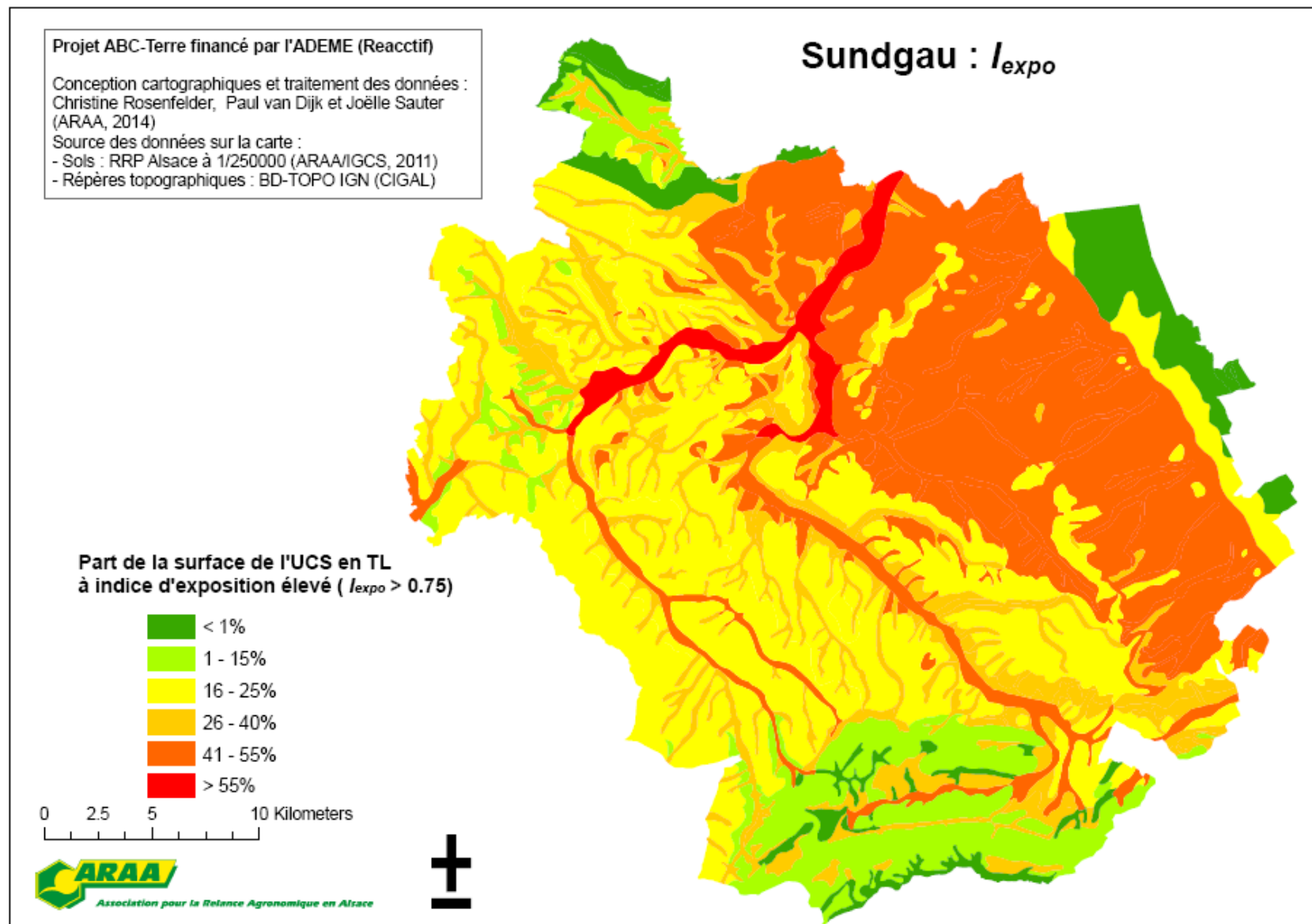


Figure 41: Annexe M: I_{expo} SEV

