

Juin 2016
volume n° 6 / numéro n° 1
www.agronomie.asso.fr

Agronomie

environnement & sociétés



La revue de l'association française d'agronomie

Regards agronomiques sur les relations entre
agriculture et ressources naturelles

ASSOCIATION FRANÇAISE
AGRONOMIE

Agronomie, Environnement & Sociétés

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa)

Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05.

Secrétariat : 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2.

Contact : douhairi@supagro.inra.fr, T : (00-33)4 99 61 26 42, F : (00-33)4 99 61 29 45

Site Internet : <http://www.agronomie.asso.fr>

Objectif

AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

ISSN 1775-4240

Contenu sous licence Creative commons



Les articles sont publiés sous la *licence Creative Commons 2.0*. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Directeur de la publication

Marc BENOÎT, président de l'Afa, Directeur de recherches, Inra

Rédacteur en chef

Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra

Membres du bureau éditorial

Pierre-Yves LE GAL, chercheur Cirad

Hervé SAINT MACARY, directeur adjoint du département Persyst, Cirad

Philippe PRÉVOST, directeur Agreenium Université en ligne

Danielle LANQUETUIT, consultante Triog et webmaster Afa

Comité de rédaction

- Marc BENOÎT, directeur de recherches Inra

- Valentin BEAUVAL, agriculteur

- Jacques CANEILL, directeur de recherches Inra

- Joël COTTART, agriculteur

- Thierry DORÉ, professeur d'agronomie AgroParisTech

- Sarah FEUILLETTE, cheffe du Service Prévision Evaluation et Prospective Agence de l'Eau Seine-Normandie

- Yves FRANCOIS, agriculteur

- Jean-Jacques GAILLETON, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole

- François KOCKMANN, chef du service agriculture-environnement Chambre d'agriculture 71

- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inra et agricultrice

- Aude JOMIER, enseignante d'agronomie au lycée agricole de Montpellier

- Jean-Marie LARCHER, responsable du service Agronomie du groupe Axérial

- François LAURENT, chef du service Conduites et Systèmes de Culture à Arvalis-Institut du végétal

- Francis MACARY, ingénieur de recherches Irstea

- Jean-Robert MORONVAL, enseignant d'agronomie au lycée agricole de Chambray, EPLEFPA de l'Eure

- Christine LECLERCQ, professeure d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais

- Adeline MICHEL, Ingénieure du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche

- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro

- Philippe PRÉVOST, directeur Agreenium Université en Ligne

- Hervé SAINT MACARY, directeur adjoint du Département Persyst, Cirad

Secrétaire de rédaction

Philippe PREVOST

Assistantes éditoriales

Sophie DOUHAIRIE et Danielle LANQUETUIT

Conditions d'abonnement

Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément

(voir conditions à <http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>)

Périodicité

Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage

Tous les numéros sont accessibles à l'adresse <http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/>

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (<http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs

Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/pour-les-auteurs/>

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « *Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu [envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques] et les techniques agricoles* ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

Lisez et faites lire AE&S !

Sommaire

Avant-propos

O. RÉCHAUCHÈRE (Rédacteur en chef) et M. BENOÎT (Président de l'Afa)

Éditorial

B. DAVIRON, T. DORÉ, J.L. FORT, M.H. JEUFFROY et T. NESME (coordonnateurs du numéro)

Etat des lieux des ressources concernées

P13- Agriculture et ressources naturelles : de quoi parlons-nous ?

T. NESME, T. DORÉ, D. LEENHARDT, S. PELLERIN

P23- Agriculture et économie : du solaire au minier... et retour ?

B. DAVIRON

Contribution de l'agriculture à la raréfaction des ressources naturelles, évolution de l'activité agricole pour réduire cet impact, et solutions agronomiques pour faire face à cette raréfaction

P35- Une approche agronomique territoriale pour lutter contre le ruissellement et l'érosion des sols en Alsace

P. VAN DIJK, C. ROSENFELDER, O. SCHEURER, A. DUPARQUE, P. MARTIN, J. SAUTER

P49- Quelle(s) agriculture(s) pour une eau de qualité ?

S. FEUILLETTE, M. BENOIT

P59- Les bordures extérieures de champs en Beauce, des espaces à valoriser : ne laissons pas la biodiversité au bord du chemin

C. LE BRIS

P65- Vers des systèmes de grande culture moins dépendants des énergies fossiles

F. ANGEVIN, C. COLNENNE-DAVID, M.H. JEUFFROY, E. PELZER, T. DORÉ

P77- Avancées et perspectives sur l'amélioration de la disponibilité du phosphore dans les systèmes de culture

M.P. FAUCON, E. MICHEL, H. LAMBERS, D. HOUBEN

P87- Respect et valorisation des ressources naturelles et agriculture biologique : des principes forts se déclinant dans la conception et la gestion agronomique des systèmes de production

L. FOURRIÉ, B. LECLERC, A. CADILLON

P93- Agriculture biologique et ressources naturelles : pas si simple !

P. VIAUX

Organisation de la conception des solutions

P99- Le recyclage agricole des résidus organiques : une ressource naturelle pour en préserver d'autres

T. WASSENAAR, J. QUESTE, J.M. PAILLAT

P109- Entretien avec A. Gosselin : clés de réussite pour une urbanisation équilibrée et durable préservant au mieux la ressource sol

A. GOSSSELIN, T. DORÉ

P115-Regards croisés sur des démarches de protection de l'eau associant le monde agricole

F. BARATAUD, R. REAU, F. HELLEC

P127- Observatoire et tableau de bord pour un pilotage dynamique des pertes de nitrate dans une aire d'alimentation de captage

L. PAVARANO, L. PROST, R. REAU

P135- Biodiversité à l'échelle du paysage : plan d'aménagement dans l'AOC viticole Saumur-Champigny

G. PAIN, M. VAN HELDEN, J. PITHON

Notes de lecture

P145- Nature à vendre – Virginie Maris

T. DORÉ

P147- Concevoir l'écosystème, un nouveau défi pour les agronomes – Elsa Berthet

T. DORÉ

P149- Agriculture et cycles biogéochimiques globaux : analyse des transformations des cycles de l'azote et du phosphore à des échelles spatiales larges, du territoire à la planète – Thomas Nesme

T. DORÉ

Annexe

P151- Appel à contribution du numéro



Une approche agronomique territoriale pour lutter contre le ruissellement et l'érosion des sols en Alsace

Reducing runoff and soil erosion in the Alsace using a territorial agronomic approach

Paul VAN DIJK¹ - Christine ROSENFELDER¹
Olivier SCHEURER² - Annie DUPARQUE³ –
Philippe MARTIN⁴ - Joëlle SAUTER¹

¹ Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA)

² Institut polytechnique LaSalle Beauvais

³ Agrotransfert-Ressources et territoires

⁴ AgroParisTech - UMR SADAPT

Auteur correspondant : p.vandijk@alsace.chambagri.fr

Résumé

Environ un tiers de la surface agricole utile en Alsace est concerné par une sensibilité moyenne à très élevée à l'érosion, et le problème semble s'aggraver. Une analyse des évolutions des facteurs déterminants de l'érosion montre (a) une forte augmentation de la part des terres arables exposée aux forces érosives sous l'effet de la spécialisation des productions végétales (maïs en particulier) et de la diminution de l'élevage, (b) une augmentation probable de l'érosivité des précipitations due au changement climatique et (c) une érodibilité des sols en augmentation en lien avec une décroissance du taux de matière organique des sols agricoles dans certains secteurs sous l'effet des changements des systèmes de culture.

Les systèmes de culture ont donc une forte influence sur la sensibilité à l'érosion d'une parcelle. Une méthode permettant d'identifier les systèmes de culture à sensibilité élevée à l'érosion sur un territoire et de mobiliser la modification des systèmes de culture comme levier d'action dans la lutte contre l'érosion a été mise en place. Un travail de co-conception exploratoire montre des résultats encourageants qui permettent d'aboutir à des solutions adaptées, acceptables et efficaces.

Mots-clés

Érosion des sols, coulées d'eaux boueuses, système de culture, érodibilité, carbone organique, indicateur.

Abstract

About one third of the agricultural land in the Alsace has a moderate to strong erosion sensitivity and this situation continues to degrade. The evolution of erosion controlling factors in the Alsace shows (a) an increase of the surface of rainfall exposed arable land during spring storms due to crop specialization (maize in particular) and decreasing livestock, (b) a probable increase of rainfall erosivity due to climate change, and (c) an increase in soil erodibility due to decreasing soil organic carbon content (the average content has decreased by 0.15 % in ten years).

Cropping systems can thus be a major control on soil erosion. Therefore, a method was developed which allows for the identification of erosion sensitive cropping systems in an area. The method provides the possibility to assess the impact of modified crop-

ping systems on erosion sensitivity through indicators on soil surface exposition and soil erodibility. A pilot study using co-conception in order to define erosion reducing cropping systems has yielded encouraging results and has led to the definition of appropriate, acceptable and effective solutions.

Introduction

L'érosion hydrique¹ des sols, à l'origine des coulées d'eaux boueuses (CEB), survient en Alsace notamment à l'occasion des orages de printemps et de début d'été, lorsque la couverture végétale des sols est faible (figure 1), dans les secteurs agricoles des collines limoneuses et dans une moindre mesure dans le piémont viticole (Auzet *et al.*, 2005 ; Van Dijk *et al.*, 2005). Les sols limoneux à faible teneur en matière organique sont les plus concernés par le ruissellement et l'érosion : en effet, en raison de la faible stabilité structurale, la surface de ces sols se ferme sous l'impact des précipitations battantes et devient ruisselante (Auzet, 1987 ; Boiffin *et al.*, 1988 ; Le Bissonais et Gascuel-Oudou, 1998). Le cumul des écoulements chargés de matières en suspension détachées par les fortes pluies et par le ruissellement progresse vers l'aval et provoque des inondations boueuses qui occasionnent des dégâts matériels parfois importants, et qui peuvent dans certains cas nuire à la sécurité des personnes. De plus, ces processus dégradent progressivement les sols (pertes de matières organiques et perte de fertilité), la qualité des eaux (transports des sédiments, de polluants) et celle des écosystèmes aquatiques (colmatage des fonds de rivière notamment des frayères). Le ruissellement et l'érosion des sols sont donc des processus à multiples enjeux, qui risquent de s'accroître avec le changement climatique : les épisodes de précipitations extrêmes deviendront très probablement plus intenses et fréquents sur les continents des moyennes latitudes d'ici la fin de ce siècle, en lien avec l'augmentation de la température moyenne en surface (GIEC, 2013).



Figure 1. Événement d'érosion le 14 mai 2009 à Breuschwickersheim (Bas-Rhin). Photo : A. Schaub (ARAA)

Il existe un consensus sur l'urgence d'agir pour limiter l'érosion des sols et les coulées d'eaux boueuses. Une cartographie des zones à risque d'érosion et de coulées d'eaux

¹ Érosion hydrique : processus de détachement, de transport et de dépôt des particules de la surface du sol sous l'action de l'eau, c'est-à-dire des précipitations et du ruissellement.

boueuses a été réalisée par l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA) en 2007, permettant de cibler les zones d'action (Van Dijk et al., 2009 ; DREAL Alsace, 2014). Dans ces zones, des programmes de mesures sont mis en place notamment grâce aux actions des Conseils Départementaux et grâce à l'animation des conseillers de la Chambre d'agriculture d'Alsace (CAA).

Les techniques mises en œuvre ont souvent une fonction d'interception des flux : des bassins de rétention et des digues à l'aval du bassin versant, et des éléments paysagers linéaires comme des fascines, des haies et des bandes enherbées plus en amont. Des observations de terrain dans la région et des études de modélisation ont montré les limites des aménagements d'hydraulique 'douce', notamment par rapport à la pérennité de l'efficacité dans le temps en l'absence de mesures préventives limitant les émissions (Pacevicus, 2008 ; Dumas, 2009).

D'autres mesures s'appliquent au niveau des parcelles agricoles et agissent à la source (réduction du ruissellement et de l'émission des particules de terre) et/ou sur le transfert des flux. Les mesures les plus employées sont les assolements concertés et les techniques culturales sans labour (TCSL). Ces dernières ont fait preuve d'une bonne efficacité pour réduire le ruissellement et l'érosion dans le contexte pédoclimatique alsacien (Van Dijk et al., 2007 ; Ali, 2008 ; Armand et al., 2009) mais peinent encore à se généraliser dans les secteurs à risque.

Jusqu'à présent, ces différentes mesures préventives sont raisonnées à l'échelle de la culture (par exemple : culture d'hiver vs culture de printemps) ou par rapport au type de travail primaire du sol (labour vs TCSL). Pour réduire efficacement l'érosion et les coulées d'eaux boueuses, il est nécessaire de disposer d'un cadre méthodologique qui intègre l'ensemble des choix et des possibilités d'action des agriculteurs d'un territoire pouvant influencer la sensibilité à l'érosion du sol : la rotation, la gestion des résidus de culture, les apports en produits résiduels organiques (PRO), le travail du sol et la gestion de l'interculture.

Cet article dresse un état des lieux des problèmes liés à l'érosion des sols en Alsace, y compris en termes d'évolution, et propose une nouvelle approche d'analyse de la sensibilité potentielle à l'érosion des systèmes de culture présents sur un territoire. La finalité est de pouvoir proposer au conseil agricole un nouveau levier d'action de lutte contre l'érosion à la source : l'adaptation des systèmes de culture.

Ampleur et évolution des problèmes liés à l'érosion des sols en Alsace

Deux sources permettent de caractériser l'ampleur de la problématique liée à l'érosion en Alsace : la cartographie de la sensibilité à l'érosion et du risque potentiel de coulées d'eaux boueuses effectuée par l'ARAA, et les Arrêtés de catastrophes naturelles (CatNat) en lien avec les coulées de boues.

Cartographie de la sensibilité à l'érosion et du risque de coulées d'eau boueuses

Afin de cibler les actions de prévention de ces risques liés à l'érosion des sols, la DREAL Alsace et les deux Conseils Dé-

partementaux ont mandaté l'ARAA en 2007 pour réaliser une cartographie du risque potentiel de coulées d'eaux boueuses en Alsace, qui a été effectuée en deux étapes. La première étape résidait dans la cartographie de la sensibilité potentielle à l'érosion des terres (figure 2 ; Van Dijk et al., 2009) selon la méthode MESALES (Modèle d'Evaluation Spatiale de l'ALéa Erosion des Sols : Le Bissonnais et al., 1998 ; Cerdan et al., 2006). MESALES permet d'identifier les zones potentielles d'émission de sédiments via un arbre de décision qui combine plusieurs caractéristiques du sol, du terrain (type d'occupation du sol, pente) et du climat (intensité et hauteur des précipitations). A l'échelle de la région Alsace, la méthode MESALES montre que les surfaces de sensibilité à l'érosion élevée à très élevée représentent 36 600 ha et celles de sensibilité moyenne 66 800 ha. Au total 103 400 ha, soit 30 % de la SAU alsacienne, présentent une sensibilité à l'érosion significative.

Les coulées d'eaux boueuses peuvent être visibles en aval alors que les émissions peuvent être élevées plutôt en amont (détachement et transport de particules depuis les parcelles agricoles). C'est pourquoi la deuxième étape prend en compte les liens spatiaux entre les zones d'émission et le milieu récepteur (habitations, voiries, etc.). Un indicateur (I_{CEB}) agrégeant la sensibilité à l'érosion des bassins versants connectés aux zones urbaines a été développé dans le but d'identifier les communes concernées par un risque potentiel de coulées d'eaux boueuses (Van Dijk et al., 2009 ; DREAL Alsace, 2014). La cartographie de ce risque montre un risque élevé pour 75 communes du Bas-Rhin (14 %) et 80 communes du Haut-Rhin (21 %). Ces communes ne sont pas toujours celles qui sont concernées par une sensibilité à l'érosion forte sur leur propre territoire communal (Van Dijk et al., 2009) ; de ce fait, elles ne sont pas en mesure de maîtriser le problème par elles-mêmes et la gestion du risque doit se faire à l'échelle intercommunale, ou mieux encore au niveau du bassin versant. La reconnaissance de l'enjeu « préservation du capital sol » par tous les acteurs est importante dans ce contexte, car elle permet de mobiliser également les communes qui ne sont pas concernées par les coulées d'eaux boueuses. De plus, l'action à la source est la seule qui permette de cibler l'ensemble des enjeux, c'est-à-dire à la fois de maintenir la productivité agricole, de préserver les milieux aquatiques et de réduire les impacts de l'érosion sur les zones urbaines.

Les cartographies mettent en évidence les principaux secteurs concernés par ces problèmes, à savoir le Sundgau, certaines parties du piémont, le Kochersberg et l'Arrière-Kochersberg, les collines de Brumath et de la vallée de la Zorn, et l'Outre-Forêt. A part le piémont, ces secteurs sont caractérisés par des collines couvertes de sols limoneux et une agriculture orientée vers une dominance de grandes cultures et notamment du maïs grain.

Les différentes cartes issues de ces études sont consultables librement sur le site de la DREAL Alsace et servent de documents de diagnostic éventuel pour la gestion de l'urbanisation, mais également pour la définition d'actions dans le cadre des PAPI (Programmes d'Action de Prévention des Inondations). La Chambre d'agriculture d'Alsace (CAA) utilise ces cartes comme premier élément de diagnostic lors d'actions de conseil dans des bassins versants touchés par des coulées d'eaux boueuses. Depuis le début des années

2000 les mesures de lutte qui impliquent les agriculteurs sont notamment les assolements concertés, souvent mis en place sous l'animation de la CAA pour augmenter la part des cultures d'hiver, et le travail du sol sans retournement (TCSL). Une approche intégrée à l'échelle du système de culture associant la rotation, le travail du sol, mais aussi la gestion de l'interculture, les résidus de culture et les apports en produits résiduels organiques, manque encore à ce jour.

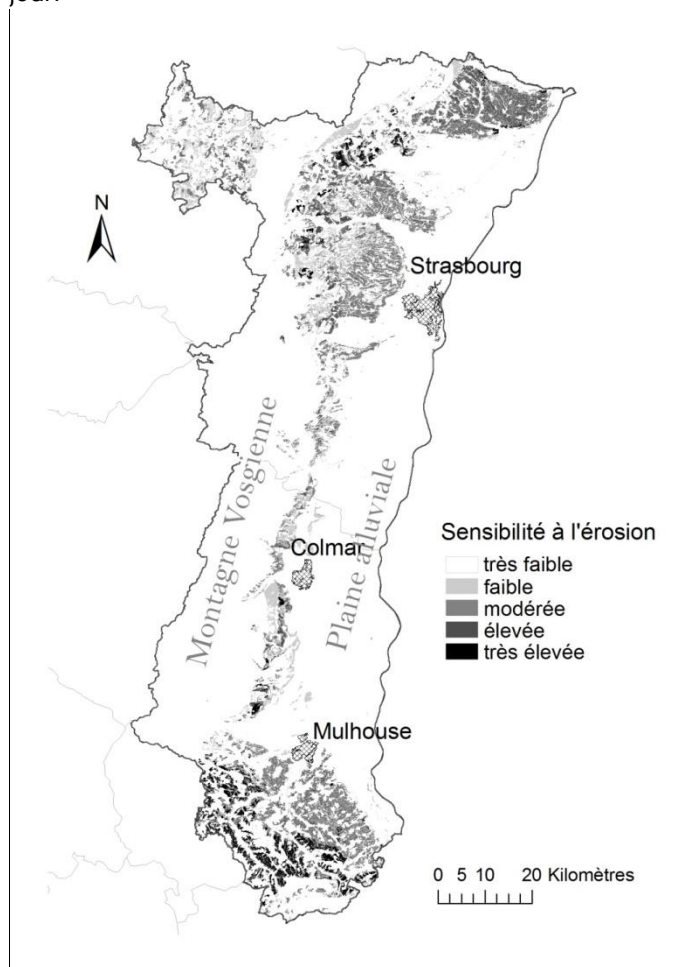


Figure 2. Sensibilité à l'érosion en Alsace selon la méthode MESALES (Le Bissonnaï et al., 1998). Source : ARAA, Van Dijk et al. (2009).

Analyse des données Catastrophes Naturelles : ampleur et évolution du risque de coulées d'eaux boueuses

La deuxième source d'information permettant de décrire l'ampleur de la problématique en Alsace est la base de données sur les Catastrophes Naturelles ou « CatNat » (Auzet et al., 2005). La base de données Gaspar (<http://macommune.prim.net/gaspar/index.php>) contient ces données CatNat par commune et par an à partir de 1985 et permet de visualiser l'évolution du risque de catastrophes naturelles, mais elle ne distingue pas les inondations des coulées d'eaux boueuses. Un traitement basé sur l'indicateur I_{CEB} mentionné ci-dessus a été effectué pour séparer au mieux ces deux types d'événements. Cette analyse montre que 112 sur 527 communes du Bas-Rhin et 92 sur 377 communes du Haut-Rhin ont subi des coulées d'eaux boueuses sur la période 1985-2014. Ces chiffres sont approximatifs car il n'existe pas de certitude absolue sur l'origine exacte de la catastrophe naturelle.

Les données montrent qu'il y a des coulées d'eaux boueuses quasiment tous les ans dans les deux départements (8 ans

sur 10 en moyenne). L'ampleur en nombre de communes concernées semble en augmentation dans le Bas-Rhin (figure 3). Pour le Haut-Rhin, la tendance est moins claire, mais elle ne signifie en aucun cas que le problème est maîtrisé.

Un autre aspect est la période des coulées d'eaux boueuses dans l'année (figure 4). Dans le Bas-Rhin elles surviennent très majoritairement pendant les mois de mai et juin, tandis que dans le Haut-Rhin un certain nombre est aussi enregistré plus tard dans l'été, notamment en août. Au fil des années, les coulées d'eaux boueuses arrivent de plus en plus tôt dans l'année dans le Bas-Rhin, et sont devenues les plus fréquentes au mois de mai, suivi du mois en juin.

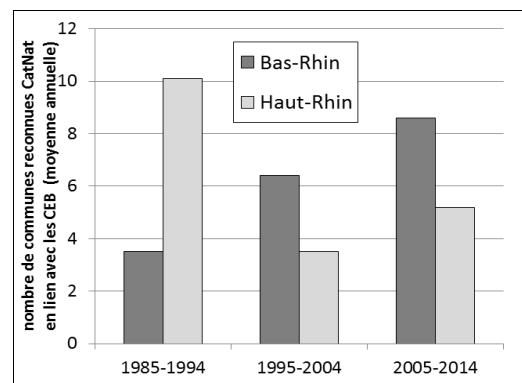


Figure 3. Nombre de dossiers CatNat reconnus en lien probable avec des coulées d'eaux boueuses par tranche de 10 ans sur la période 1985 à 2014. Source des données : BD Gaspar.

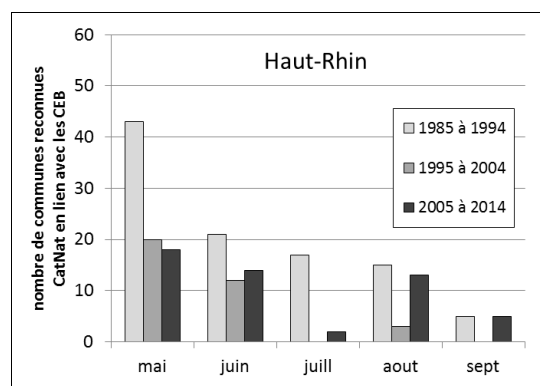
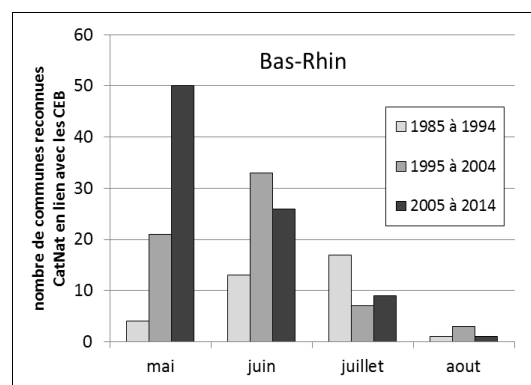


Figure 4. Le nombre de dossier CatNat reconnus en lien probable avec les CEB par mois pour les deux départements alsaciens par tranche de 10 ans sur la période 1985 à 2014. Source des données : BD Gaspar.

Les facteurs explicatifs : une coïncidence des évolutions

Les problèmes d'érosion et des coulées d'eaux boueuses sont donc conséquents et leur évolution est préoccupante. Ces tendances peuvent s'expliquer par une combinaison de facteurs évolutifs liés au climat, à l'agriculture, à la structure

paysagère, et à l'urbanisation. Le tableau 1 résume, sans prétendre être exhaustif, les principales évolutions sur le territoire alsacien qui influencent l'érosion et les coulées d'eaux boueuses. Certains processus impactent plutôt les émissions, c'est-à-dire la production du ruissellement et la mobilisation des sédiments par érosion dans les parcelles agricoles, qui dépendent principalement de l'érosivité du climat, de la couverture protectrice du sol et de l'érodibilité² du sol ; d'autres facteurs affectent davantage les transferts de flux vers l'aval qui dépendent plutôt de la structure paysagère (par ex. le parcellaire, les éléments paysagers comme les haies et les talus, les infrastructures des chemins et des routes, le réseau hydrographique des fossés et des cours d'eau) qui peuvent freiner ou accélérer les transferts et ainsi intercepter plus ou moins de flux sur le chemin de transfert. Les processus et leurs évolutions sont discutés par la suite en suivant la structure du tableau 1.

Évolutions influençant le transfert des flux par ruissellement vers l'aval

Le remembrement est un processus qui en Alsace aussi a fortement changé la structure paysagère : depuis les années 1950, plus de 90 % de la SAU alsacienne a fait l'objet d'un remembrement (Peignot et al., 1999). Ceci a conduit à une augmentation de la surface moyenne des parcelles agricoles, à la perte d'une mosaïque des milieux et à la suppression d'éléments paysagers tels que des haies (Froehlicher et al., 2016), des chemins et des talus, ainsi qu'au recalibrage et/ou rectification des cours d'eau. Ces modifications paysagères ont pour conséquence de faciliter le transfert de flux par ruissellement vers l'aval. L'urbanisation a contribué à augmenter la vulnérabilité des zones réceptrices des coulées d'eaux boueuses. En Alsace, les surfaces artificialisées ont augmenté de 1047 ha/an pendant la période 1984-2000 (Région Alsace, 2009). Cette tendance s'est poursuivie aussi après 2000 (CIGAL, 2013).

Les villages se sont souvent étendus en suivant les fonds de vallons, en supprimant les zones "tampons" que constituaient les vergers et prairies traditionnellement localisées autour des villages (Heitz, 2009 ; Heitz et al., 2009). Ces évolutions, facilitant les transferts des flux et augmentant la vulnérabilité des zones urbaines, ont contribué à l'augmentation du risque de coulées d'eaux boueuses en Alsace.

Évolutions influençant les émissions des sédiments dans les parcelles agricoles

Érosivité des précipitations

La pluviométrie annuelle et la température (moyenne annuelle) ont augmenté les 40 dernières années pour la station d'Entzheim (tableau 2). L'intensité des précipitations d'été d'origine convective, souvent de type orageux, est corrélée à la température moyenne de l'air à proximité de la surface du sol (Klein Tank et Können, 1993). Ceci est lié au fait que l'air chaud augmente l'évapotranspiration et peut contenir plus de vapeur d'eau ; le refroidissement par con-

vection peut ainsi générer des précipitations plus intenses. L'augmentation de la température mène alors à une augmentation sensible de l'érosivité³ des précipitations (Asselman, 2000 ; Van Dijk, 2001).

Au-delà de l'augmentation des hauteurs annuelles de précipitations, la distribution des précipitations dans l'année a tendance à se déplacer, avec plus de précipitations en fin de printemps et en début d'été (figure 5) ; ceci augmente le risque d'érosion du fait de la dominance des cultures de printemps peu couvrantes pendant ces mois. Cette évolution des précipitations peut expliquer en partie l'augmentation du nombre des coulées d'eaux boueuses au cours des mois de mai et juin dans le Bas-Rhin.

L'exposition de la surface du sol aux forces érosives

Certaines évolutions de l'agriculture en Alsace impactent le risque d'érosion par le biais de leur effet sur les périodes d'exposition de la surface aux forces érosives des précipitations et du ruissellement (figure 6, source : Agreste, Recensements agricoles de 1970, 1979, 1988, 2000 et 2010). Si la surface agricole utile (SAU) alsacienne est restée relativement stable depuis 1970 autour de 336000 ha, la part de terres arables a fortement augmenté, passant de 54 % de la SAU à 71 % en 2010, au détriment des surfaces toujours en herbe (STH) qui sont passées de 40 à 23 %. Entre 1980 et 2000, dans les terres labourables, les surfaces fourragères et les céréales d'hiver à paille ont fortement diminué et laissé la place au maïs grain semé généralement vers la mi-avril et peu couvrant jusqu'à mi-juin. Ces surfaces sont alors exposées aux forces érosives des orages de printemps et de début d'été. A partir de 2000, le maïs grain occupe environ 56 % des terres labourables contre moins de 10 % en 1970. Cette spécialisation de la production céréalière et la diminution des surfaces en herbe et fourragères ont conduit à une forte augmentation de l'exposition de la surface des sols à une érosivité pluviométrique en hausse.

² L'érodibilité est définie ici comme la facilité d'un sol à être érodé. 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 (Wischmeier et Smith, 1978 ; Römken et al., 1996).

³ L'érosivité de la précipitation est son potentiel érosif, fonction de son intensité et sa durée.

Thème	Processus	Evolution	principaux effets sur les déterminants de l'érosion et des coulées d'eaux boueuses			
			érosivité	exposition de la surface du sol	érodibilité du sol	connectivité et transferts
Climat	Changement climatique	Augmentation de l'intensité des précipitations	+			
		Augmentation de la fréquence des événements extrêmes	+			
		Augmentation de la minéralisation des MO du sol (effet température)			+	
		Croissance plus tôt et plus rapide des cultures		-		
Structure paysagère	Remembrement	Suppression des éléments paysagers (haies, chemins ruraux, talus, etc)				+
		Augmentation de la taille des parcelles				+
		Rectification des cours d'eau, densification des systèmes de drainage				+
Agriculture	Spécialisation des productions végétales	Plus de cultures de printemps		+		+
	Intensification des pratiques agricoles	Diminution de la vie biologique des sols (effets du travail du sol et des intrants)			(+)	
		Augmentation de la minéralisation des MO du sol (effet travail du sol sur l'aération et l'augmentation de la température du sol)			(+)	
		Augmentation du tassement du sol			(+)	
	Diminution élevage	Moins de production et d'épandage de déjections animales		+	+	
		Moins de surface de cultures fourragères et de l'herbe		+		
Emprise urbaine	Urbanisation progressive	Suppression des zones "tampons" de type vergers et prairies				+
		Imperméabilisation des surfaces			-	+

- = diminue la valeur du déterminant de l'érosion ; + = augmente la valeur du déterminant de l'érosion

(+) = augmente la valeur du déterminant de l'érosion, mais pas de données et/ou d'indicateurs disponibles permettant de valider l'évolution du processus sur le territoire alsacien

Tableau 1. Évolutions liées au climat, à la structure paysagère, l'agriculture et à l'urbanisation en Alsace après 1960 et leurs principaux effets sur les déterminants de l'érosion et des coulées d'eaux boueuses.

Période	1951-1980	1961-1990	1971-2000	1981-2010
T moyenne annuelle (°C)	10,0	10,1	10,5	11,0
P (mm), moyenne des sommes annuelles	585	611	631	665

Tableau 2. Normales climatiques (températures T et précipitations P) de la station Météo-France d'Entzheim (Bas-Rhin, Alsace). Source : Météo-France

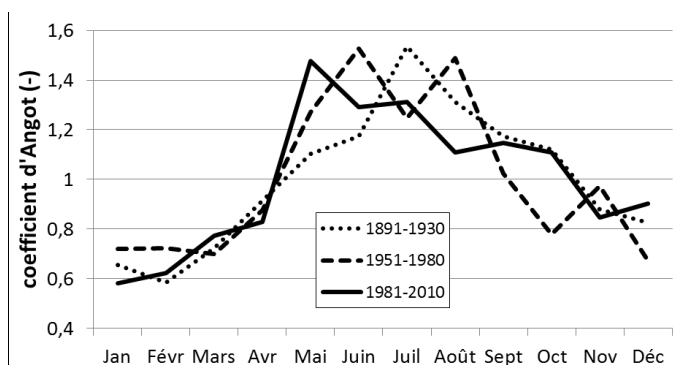


Figure 5. Valeurs mensuelles des coefficients d'Angot (rapport entre la pluviométrie du mois et la pluviométrie annuelle rapportée au mois) pour trois normales pluviométriques de la station Météo-France d'Entzheim. Source des données : Météo-France.

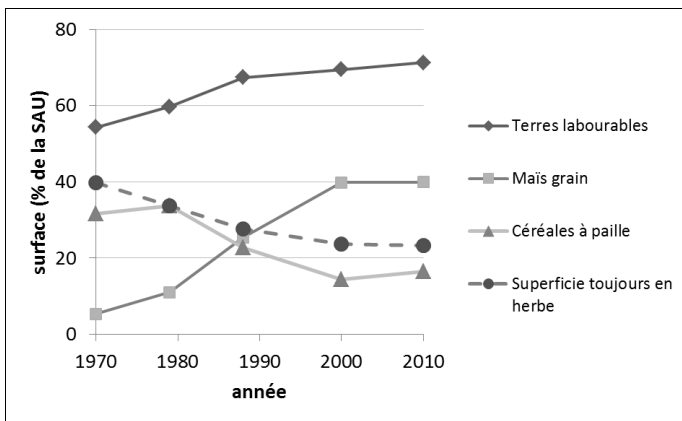


Figure 6. Quelques évolutions des surfaces agricoles en Alsace dans la période de 1970 à 2010 en lien direct avec l'exposition de la surface du sol aux forces érosives. Source des données : Agreste, Recensements agricoles de 1970, 1979, 1988, 2000 et 2010.

L'érodibilité des sols exposés aux forces érosives et le rôle du carbone organique du sol

Non seulement la part de la SAU non protégée par des couverts végétaux a augmenté, mais il existe également des indications sur le fait que les sols exposés, et notamment ceux des collines limoneuses concernés par l'aléa érosif, sont devenus moins résistants aux forces érosives. Ceci est principalement dû aux évolutions de l'état humique de ces sols. Un paramètre central dans ce contexte est la teneur en carbone organique du sol qui joue un rôle essentiel sur la structure du sol et sa stabilité (Chenu *et al.*, 2011), la rétention en eau, la fertilité du sol et l'activité biologique qu'il incite. A ce jour, il existe peu de données permettant de mettre en évidence des évolutions des teneurs en carbone organique des sols alsaciens, à l'exception de la Base de Données des Analyses de Terre (BDAT ; Saby *et al.*, 2014 ; Swiderski *et al.*, 2012 ; Lemerrier *et al.*, 2006). La BDAT regroupe les résultats d'analyses d'horizons de surface des sols de parcelles agricoles effectuées à la demande des agriculteurs sur l'ensemble du territoire national depuis 1990. Elle consiste majoritairement en des données issues des terres arables, mais contient également des résultats d'échantillons issus de prairies, vergers et vignes. Une extraction des informations de la BDAT est affichée dans la figure 7. On observe, après une augmentation de la teneur en carbone organique des sols dans les années 90, sa diminution dans la période 2000-2010. La diminution est plus forte pour les moyennes (0,15 %) que pour les médianes (0,07 % environ). Les tendances sont quasiment identiques pour les deux départements mais il y a une différence systématique au niveau des teneurs, qui sont plus élevées d'environ 0,1 % dans le Bas-Rhin. Une analyse de la BDAT du territoire alsacien à résolution spatiale plus élevée est fournie par Swiderski *et al.* (2012) : ils ont constaté que sur 28 % des cantons alsaciens, les teneurs en carbone organique ont évolué de façon significative, baissant dans 2/3 de ces cantons sur la période de 1995-99 à 2005-09. Les cantons montrant des tendances à la baisse se trouvent notamment dans les secteurs à sensibilité élevée à l'érosion du Bas-Rhin, comme par exemple les cantons de Brumath, de Truchtersheim et de Saverne. Malgré le fait que les évolutions constatées semblent faibles, cette tendance est plutôt préoccupante.

L'évolution des stocks et teneurs en carbone organiques du sol constitue la réponse à un système agropédoclimatique complexe en évolution perpétuelle. Pour un sol donné, le changement climatique et l'évolution du système de culture modifient l'état humique des sols à moyen et long terme. En Alsace, l'évolution de l'état humique des sols est impacté par :

- les effets du changement climatique qui mène à une accélération de la minéralisation des matières organiques due aux températures plus élevées ;
- la diminution progressive de l'élevage dans la région (ce qui explique la diminution des surfaces fourragères signalée précédemment), et notamment l'élevage bovin, qui est passé de plus de 290000 têtes en 1979 à environ 165000 en 2010, soit une diminution de 44 % (Agreste, Recensements Agricoles). Cette forte diminution réduit les apports des déjections animales, traditionnellement sous forme de fumier, sur les parcelles agricoles. Contrairement au lisier, qui a peu d'impact sur le statut organique du sol, le fumier et le compost de fumier favorisent une bonne stabilité structurale essentielle pour lutter contre l'érosion. Aujourd'hui, les installations de jeunes polyculteurs-éleveurs alsaciens se font majoritairement dans des systèmes tout lisier, principalement pour des raisons de main d'œuvre. Ces deux effets (moins de déjections animales et une part plus importante de lisier dans les épandages), fragilisent l'état humique des sols alsaciens ;
- l'augmentation des surfaces en maïs grain, avec un effet favorable sur l'état humique des sols : les résidus de culture de maïs grain sont systématiquement restitués au sol, contrairement aux céréales à paille dont les résidus sont le plus souvent récoltés, notamment par les polyculteurs-éleveurs mais aussi par les céréaliers (Rosenfelder, 2014). Ceci contrebalance une partie de l'effet de moindres apports en déjections animales, notamment sur les parcelles de céréaliers. Les dernières années, les résidus de maïs grain commencent à être utilisés pour alimenter les méthaniseurs pour la production de biogaz. Une généralisation de cette tendance peut présenter une menace pour la stabilité structurale et l'érodibilité des parcelles agricoles qui ne reçoivent pas de produits résiduels organiques par ailleurs. Hormis ces évolutions qui influencent la stabilité structurale du sol via la teneur en carbone organique, des effets mécaniques liés au travail du sol sont également à prendre en compte. L'utilisation de machines agricoles plus lourdes peut induire des problèmes de compaction, notamment sur des sols à faible stabilité structurale, et ainsi réduire l'infiltrabilité des sols. Un autre exemple est l'utilisation plus fréquente d'outils animés pour le travail du sol superficiel (préparation de lits de semis) qui ont tendance à trop affiner les agrégats du sol et à accélérer la formation des croûtes de battance. L'utilisation des intrants ainsi que la généralisation du labour peuvent impacter l'activité biologique du sol et augmenter son érodibilité. Aucun indicateur ou donnée n'est disponible avec un historique suffisant permettant de démontrer des évolutions sur le territoire alsacien, ni par rapport à l'intensification des pratiques agricoles, ni par rapport à l'activité biologique des sols alsaciens.

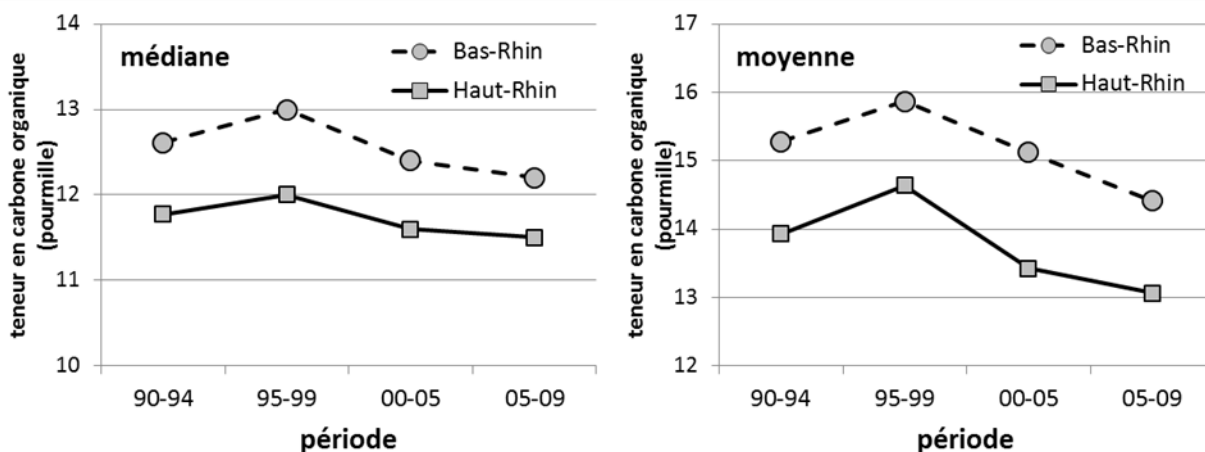


Figure 7. Evolution des teneurs en carbone organique (en pour mille) par période de 5 ans (chaque point est basé sur environ 4000 à 6000 valeurs). Source des données : BDAT.

Évaluer la sensibilité à l'érosion des systèmes de culture d'un territoire

Dans le prolongement du constat sur l'ampleur de la problématique de l'érosion des sols, de ses tendances et facteurs explicatifs, on peut poser le postulat que les systèmes de culture peuvent constituer un levier d'action important pour gérer deux facteurs clefs du risque érosif : l'exposition de la surface du sol aux forces érosives et l'érodibilité des sols. Dans le cadre du projet ABC'Terre (financement ADEME, lauréat de l'AAP REACTIF et coordonné par Agro-Transfert Ressources et Territoires) une méthodologie a été développée, afin d'identifier les systèmes de culture à risque érosif élevé d'un territoire au travers d'indicateurs et de concevoir des systèmes de culture alternatifs en prenant en compte les contraintes (relatives aux assolements, à la valorisation des résidus de culture et aux apports en PRO) liées aux types d'exploitations. Dans le projet, l'outil SIMEOS-AMG, conçu pour simuler les stocks et les teneurs en carbone organique du sol en fonction du système de culture, joue un rôle central. SIMEOS-AMG (SIMuler l'évolution de l'Etat Organique des Sols) a été développé par Agro-Transfert-RT à partir du modèle de calcul de bilan humique AMG de l'INRA de Laon (Andriulo *et al.*, 1999 ; Duparque *et al.*, 2011).

Identification des systèmes de culture à sensibilité élevée à l'érosion

Le diagnostic de la situation actuelle, illustré ci-dessous avec l'exemple d'application sur le territoire « Zorn-Kochersberg » dans le Bas-Rhin, se fait en trois temps (figure 8).

1. Reconstitution des combinaisons « rotation de cultures x type de sol x type EA » : RPG-explorer

L'outil RPG Explorer (Levasseur *et al.*, 2015) permet d'obtenir des assolements de rotation par type de sol et par type d'exploitation agricole sur un territoire. Il utilise en entrée un couple de deux années successives de données du Registre Parcellaire Graphique (RPG) et de données du Référentiel Régional Pédologique (RRP).

L'outil procède d'abord à la filiation des îlots de culture entre années et à la reconnaissance des séquences de culture. Sur la base de règles agronomiques définies au préalable pour le secteur en question, RPG-explorer maximise la

fonction de la valeur agronomique des couples précédent/suivant en prenant en compte la fréquence de retour maximale des cultures dans la rotation. Pour cela, l'outil utilise la méthode CROPROTA de Schönhart *et al.* (2011). Les assolements de rotations en sortie sont croisés avec les unités cartographiques des sols (UCS) du RRP et avec la typologie des exploitations agricoles. La typologie des exploitations agricoles (EA) a été élaborée en se basant sur les données RPG de 2009 : une analyse K-means (nuées dynamiques) a permis de regrouper les exploitations agricoles aux assolements similaires. Sur la base d'une cartographie de ces groupes et de l'assolement 'central' (barycentre) de chaque groupe, un type a été attribué à chaque groupe. Le résultat de cette typologie a été validé par un croisement de ces types avec la typologie créée par la DRAAF-Alsace et la CAA en 2013 (CAA, 2013).

On obtient à ce stade les rotations présentes sur le territoire et leur part surfacique dans chaque UCS par types d'exploitations agricoles. Une deuxième fonction d'optimisation permet d'associer ces rotations aux types de sols (UTS) dont on connaît la surface mais pas la localisation dans les UCS. Cette phase d'optimisation prend en compte les contraintes culturelles liées aux caractéristiques du sol telles que la teneur en éléments grossiers, la teneur en argile, l'hydromorphie et la réserve utile. Le résultat final est la part surfacique de toutes les combinaisons « rotation de cultures x type de sol x type EA » du territoire étudié (figure 8). Sur le territoire du secteur Zorn-Kochersberg il s'agit de 7720 combinaisons.

2. Affectation de pratiques culturelles à ces combinaisons pour obtenir des assolements de systèmes de culture.

Le passage vers les combinaisons « systèmes de culture x type de sols x type EA » demande d'associer des pratiques agricoles aux rotations. Pour cela, nous avons utilisé la base de données Agri-Mieux de l'ARAA qui permet de caractériser par type d'EA et par culture la gestion des résidus, le travail du sol, les apports en PRO (nature, dose et fréquence des apports), la gestion de l'interculture et les rendements. Les tableaux 3 et 4 présentent des exemples des résultats obtenus pour le secteur Zorn-Kochersberg.

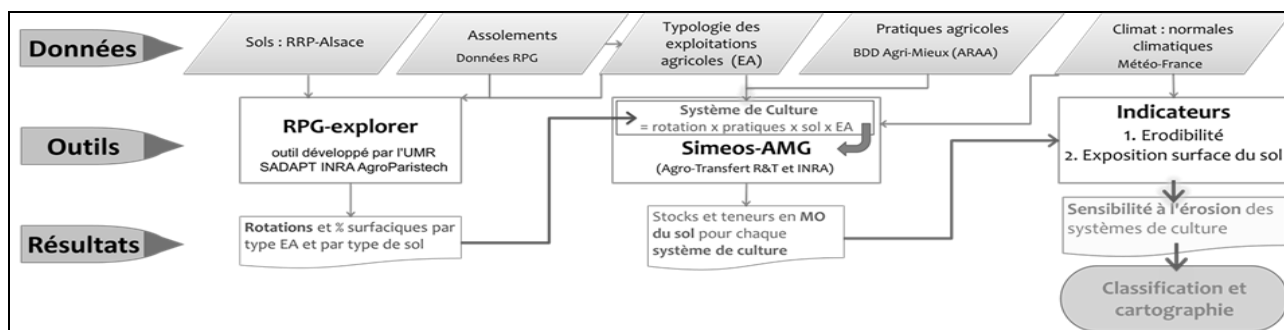


Figure 8. Schéma de la méthodologie mis en place pour l'évaluation de la sensibilité à l'érosion des systèmes de culture sur un territoire.

Hormis pour le blé d'hiver, les polyculteurs-éleveurs apportent plus souvent de la matière organique que les céréaliers (tableau 3), et ce sont a priori des matières plus stables (fumier plutôt que lisier ou boues de stations d'épuration). L'analyse de la base de données a montré que les doses par apport sont fonction du type de PRO mais pas du type d'exploitation (Rosenfelder, 2014). La gestion des résidus de cultures dans le secteur « Zorn-Kochersberg » est assez similaire pour les céréaliers et les polyculteurs-éleveurs (tableau 4) : les céréaliers récoltent aussi souvent les pailles, qui sont régulièrement échangées contre du fumier ou du lisier des éleveurs. Ceci explique les apports de déjections animales par les céréaliers (tableau 3). La base de données Agri-Mieux permet également de différencier les rendements de certaines cultures (maïs, blé et betteraves) par type de sol. Ces rendements interviennent dans le bilan humique du sol du modèle SIMEOS-AMG via la quantité de résidus de culture restitués au sol.

Les résultats des analyses de la BD-Agri-Mieux sont ensuite associés aux combinaisons « rotation de cultures x type de sol x type EA » du territoire étudié grâce à de nombreuses règles plus ou moins complexes d'affectation des pratiques (Mata et al., 2014 ; Rosenfelder, 2014). Cette affectation se fait le plus souvent sur la base de la présence d'une culture dans la rotation et l'appartenance à un type d'exploitation, et parfois suivant le type de sol. On obtient ainsi une description de l'ensemble de systèmes de culture présents sur le territoire avec toutes les informations nécessaires pour faire tourner le modèle SIMEOS-AMG (voir l'étape suivante).

Type PRO	Céréaliers	Polyculteurs-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 3 : Fréquence annuelle des apports de produits résiduels organiques (PRO) en fonction de la culture et du type d'exploitation agricole pour le secteur « Zorn-Kochersberg ». Source : BD-Agri-Mieux (ARAA). Exemple : 0,25 apports/an = 1 apport tous les 4 ans.

Culture principale	Restitution des résidus (part restituée)		Culture intermédiaire (après la culture principale) *	Rendement moyen culture principale **
	Céréaliers	Polyculteurs-Eleveurs		
Maïs grain	1	1	non	105 q/ha
Maïs ensilage	-	0	non	18 T MS/ha
Blé d'hiver	0,1	0	oui	75 q/ha
Escourgeon - Orge d'hiver	0,2	0,05	oui	64 q/ha
Betterave sucrière	1	1	non	88 T/ha
Colza d'hiver	1	1	oui	36 q/ha
Luzerne	-	0	non	8,5 T MS/ha

* Selon la réglementation en zone vulnérable.

** Valeurs indicatives et moyennes : les rendements retenus et utilisés par la suite varient selon les types de sol.

Tableau 4. Pratiques de restitution des résidus de culture, présence des cultures intermédiaires et rendements des cultures en fonction de la culture et du type d'EA pour le secteur « Zorn-Kochersberg ». Source : BD-Agri-Mieux (ARAA)

3 . Évaluation de la sensibilité à l'érosion des SdC à l'aide de deux indicateurs (exposition et érodibilité)

Les systèmes de culture peuvent impacter la sensibilité à l'érosion de deux façons principales : à travers l'érodibilité via l'état humique du sol, et à travers la couverture de la surface du sol par la culture et les résidus de culture, cette couverture déterminant l'exposition de la surface du sol aux forces érosives. Un indicateur a été mis en place pour chacun de ces deux facteurs.

Pour rendre compte du risque érosif lié à l'exposition de la surface sur l'ensemble d'une rotation, il est nécessaire de croiser simultanément la dynamique de la couverture végétale (culture et résidus) avec celle de l'érosivité des précipitations. C'est une démarche similaire à celle du facteur C (culture) de l'équation générale des pertes en terre (USLE = Universal Soil Loss Equation ; Wischmeier et Smith, 1978). Ainsi, l'indicateur d'exposition (I_{expo}) est composé d'une part d'un indice d'érosivité des précipitations ($i_{erosivité}$) et d'autre part d'un indice prenant en compte l'effet de la couverture végétale sur la protection de la surface contre l'érosion (i_{cv}). Ces deux derniers indices sont croisés au pas de temps décennal sur l'ensemble de la rotation. Les couvertures sont corrigées en cas de présence de résidus de culture à la surface dans le cas des TCSL (Rosenfelder, 2014).

Pour un régime pluviométrique donné, cette méthode fournit dans un premier temps des valeurs de I_{expo} par culture (figure 9) qui sont ensuite agrégées au niveau de la rotation puis normalisées sur une échelle de 0 à 1. La valeur 1 correspond à la monoculture de la culture ayant la valeur I_{expo} la

plus élevée ; pour le secteur Zorn-Kochersberg il s'agit de la monoculture de maïs. Du fait de cette normalisation, la méthode permet de trier des systèmes de culture par rapport à l'exposition de la surface pour un secteur donné, mais pas de comparer les valeurs absolues entre secteurs analysés séparément. Le tableau 5 montre quelques exemples des valeurs de I_{expo} pour quelques rotations types du secteur d'étude.

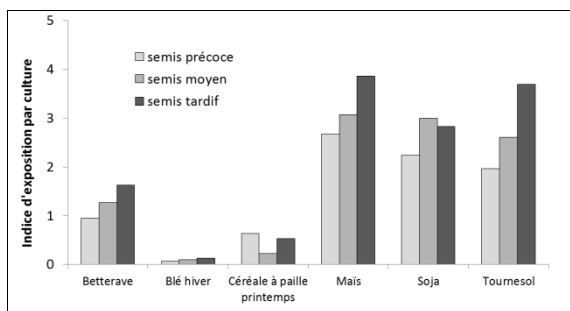


Figure 9. L'indicateur d'exposition (I_{expo}) pour quelques cultures en fonction de la date de semis pour les conditions climatiques du secteur Zorn-Kochersberg dans le Bas-Rhin.

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

Légende : Mgr = maïs grain, Blé = blé d'hiver, Bett = betteraves sucrières.

Tableau 5. Quelques exemples de l'indicateur d'exposition à l'échelle de la rotation pour les conditions climatiques du secteur Zorn-Kochersberg dans le Bas-Rhin.

Pour le choix d'un indicateur d'érodibilité (I_{erod}), six méthodes ont été testées. Le K-factor selon l'équation de Torri et al. (1997 et 2002) a été retenu parce qu'il présente une sensibilité à la texture du sol et à la teneur en matière organique (MO) qui correspond à l'expertise de terrain, et que l'équation est mathématiquement cohérente. La figure 10 montre que les effets des teneurs en MO sur l'érodibilité sont particulièrement importants sur des sols à textures limoneuses (LA et L). L'érodibilité est considérée élevée pour les valeurs de $K > 0,03$ (Vopravil et al., 2007). Les sols agricoles en Alsace concernés par les problèmes d'érosion sont majoritairement de texture limono-argileuse (LA) avec une fourchette de teneurs en matière organique allant de 1,5 à 3 %, c'est-à-dire dans la partie des courbes où ce facteur varie le plus vite en relation avec la variation de matière organique. Des faibles augmentations des teneurs en matière organique peuvent donc induire des diminutions significatives de l'érodibilité.

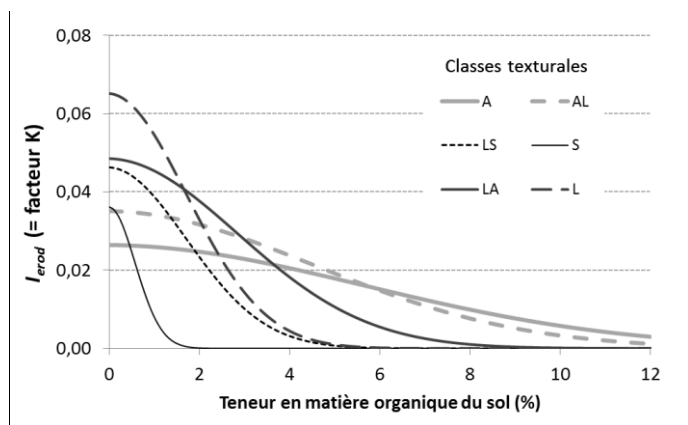


Figure 10. Indicateur d'érodibilité en fonction du pourcentage de matière organique pour quelques classes texturales (classification du GEPPA). Modifiée d'après Rosenfelder (2014).

L'évolution de la teneur en carbone organique de l'horizon de surface est simulée avec le modèle SIMEOS-AMG pour tous les systèmes de culture présents sur le territoire. SIMEOS-AMG calcule les entrées et les pertes annuelles de carbone du sol en se basant sur les données du système de culture ainsi que sur les caractéristiques du sol, de la parcelle et du climat local. On obtient en sortie des courbes d'évolution des stocks et des teneurs en carbone organique du sol d'une parcelle. La teneur en carbone organique à l'équilibre (obtenue en général après plus de 50 ans) est utilisée pour calculer l'érosivité des sols à l'aide de l'indicateur I_{erod} . Ce choix, critiquable par ailleurs, permet la meilleure différenciation entre les systèmes de culture à évaluer.

La figure 11 montre le résultat final des calculs des deux indicateurs pour le secteur Zorn-Kochersberg et permet de positionner les 7720 combinaisons simulées selon leur sensibilité à l'érosion. Il y a une bonne dispersion des points sur l'ensemble de l'espace $I_{erod} * I_{expo}$, ce qui montre que la méthode permet une très bonne différenciation des situations présentes sur le territoire sur la base de ces deux critères. Les systèmes de culture sont classés selon leur sensibilité à l'érosion de la façon suivante : $I_{erod} * I_{expo} < 0.015$ (sensibilité faible), 0.015 à 0.022 (sensibilité modérée) et > 0.022 (sensibilité élevée). Le seuil de 0.022 pourrait par exemple correspondre à une rotation avec du maïs 3 années sur 4 et une érodibilité $I_{erod} > 0.030$.

Les sols à texture argileuse ont souvent des valeurs de I_{expo} relativement faibles car ils sont plus souvent associés à des prairies, des cultures fourragères et/ou des cultures d'hiver (figure 11). Les sols limoneux se trouvent majoritairement dans les classes de sensibilité modérée et élevée, ce qui confirme leur fragilité et leur utilisation en grande culture dominée par les cultures de printemps. La figure 12 montre une représentation cartographique des résultats. Au total, 37 % de la SAU du secteur est classé en sensibilité élevée à l'érosion.

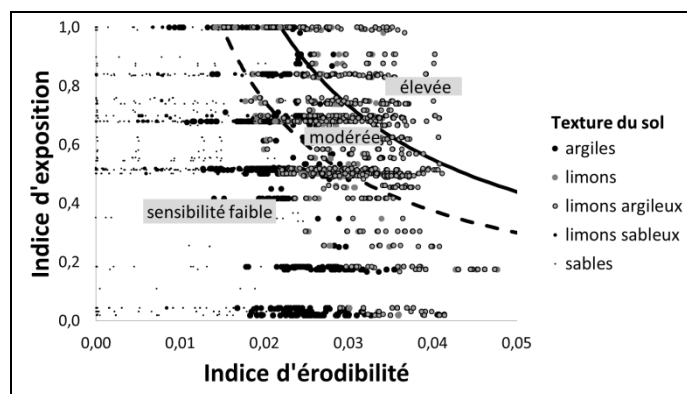


Figure 11. La sensibilité à l'érosion de tous les systèmes de culture du secteur Zorn-Kochersberg selon les deux indicateurs I_{expo} et I_{erod} .

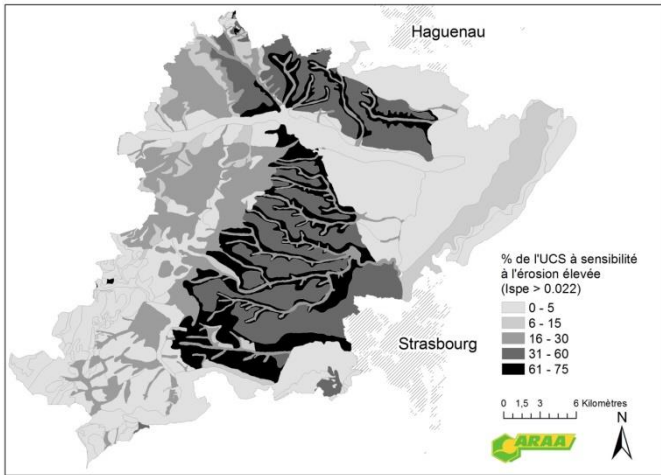


Figure 12. Cartographie de la sensibilité à l'érosion des systèmes de culture dans le secteur Zorn-Kochersberg. UCS = Unité Cartographique des Sols.

Co-conception de systèmes de culture alternatifs pour limiter la sensibilité à l'érosion

La méthode permet d'identifier les systèmes de culture de sensibilité à l'érosion élevée, puis de les modifier pour ramener cette sensibilité à un niveau acceptable. Un travail exploratoire d'adaptation des systèmes de culture a été entamé en collaboration avec les conseillers agricoles du secteur pour pouvoir arriver à des solutions pertinentes et à un bon niveau d'acceptabilité sur le terrain.

En premier lieu, un catalogue de mesures anti-érosion à l'échelle de la parcelle a été établi en s'inspirant des mesures proposées dans la rubrique « limiter érosion » du site AgroPEPS (RMT Systèmes de culture innovants (2013)). Toutes les mesures du catalogue ont été notées par le groupe de travail sur quatre critères : pertinence de la mesure, faisabilité (uniquement au niveau technique), acceptabilité sur le terrain pressentie et effets collatéraux entraînés par la mesure (gestion des adventices, ...). Ce catalogue permet de fournir les éléments permettant de construire les systèmes de culture alternatifs (Rosenfelder, 2014).

En second lieu, deux systèmes de culture à sensibilité élevée ont été sélectionnés, correspondants aux exploitations sans élevage (tableau 6 ; les types d'exploitation CM et CI). Les systèmes de culture avec élevage du secteur étudié ont généralement des sensibilités à l'érosion plus faibles. Cependant, pour explorer aussi une situation avec élevage, un troisième système de culture à sensibilité modérée à l'érosion a été ajouté correspondant aux polyculteurs-éleveurs (type CE). Pour chacun des trois systèmes de culture sélectionnés, le groupe de travail a voulu proposer une solution pour les agriculteurs souhaitant rester en système de labour, par le biais d'une modification de la rotation (tableau 6) et des pratiques associées, ainsi qu'une autre pour ceux souhaitant passer en TCSL. Dans ce dernier cas, pour pouvoir identifier la sensibilité des indicateurs aux techniques sans labour, la rotation n'est pas modifiée, et la charrue (travail à 30 cm de profondeur) est remplacée par un outil à dents travaillant jusqu'à 15 cm de profondeur.

Type d'exploitation agricole	Rotation Initiale	Apports PRO	Réstitution résidues	Rotation alternative
Grandes cultures, maïs dominant non irrigué (CM)	Mg-Mg-Mg-Mg-Mg-Mg-Blé	non	Toujours	Mg-Mg-Mg-Mg-Mg-Blé-Orge
Grandes cultures, orientées cultures industrielles et spéciales (CI)	Blé-BS-Mg-Mg-Mg	non	Toujours	Blé-BS-Mg-Blé-Mg
Élevage et cultures (CE)	Mg-Me-Blé	fumier bovin pailleux (1 an sur 3)	Mg	Luz-Luz-Luz-Mg-Me-Blé

Mg = maïs grain, Me = maïs ensilage, BS = betteraves sucrières, Luz = luzerne
 Culture intermédiaire : moutarde, uniquement après céréales à paille

Tableau 6. Les systèmes de culture sélectionnés pour une adaptation « anti-érosion » et la rotation modifiée, issue de la co-conception.

Enfin, pour chaque scénario, SIMEOS-AMG a été utilisé pour déterminer les teneurs en carbone organique sur la profondeur travaillée, puis les indicateurs I_{expo} et I_{erod} ont été calculés pour évaluer leur performance « anti-érosion ». Chaque système alternatif a également été soumis à une évaluation multicritères avec le calculateur Stephy (Attoumani-Ronceux, 2011) pour s'assurer de la leur pertinence globale, notamment par rapport à l'utilisation des produits phytosanitaires (IFT) et aux impacts économiques (charges opérationnelles, de mécanisation et de main d'œuvre, marge directe) et sociaux (nombre de passages, temps de travail). Les résultats de cette analyse sont décrits dans Rosenfelder (2014).

Même si le travail de conception des systèmes de culture alternatifs est encore à développer, des résultats intéressants ont déjà été obtenus (figure 13). Les différentes modifications des systèmes de culture réduisent la sensibilité à l'érosion de 17 à 70 % par rapport à la situation initiale. Il s'avère que les solutions en TCSL sont plus performantes que les solutions en labour car elles réduisent à la fois fortement l'érodibilité et l'exposition du sol aux forces érosives, tandis que celles en labour ne diminuent peu ou pas l'érodibilité. En système de labour des céréaliers, la restitution des résidus est essentielle pour maintenir un état humique du sol satisfaisant, et l'apport des produits résiduels stables (des produits compostés par exemple) est préconisé. Les parcelles des exploitations d'élevage sont en général moins érodibles, à l'exception des systèmes d'élevage fortement orientés vers le maïs ensilage avec une exportation systématique des résidus de culture et des retours des matières organiques peu stables sur ces parcelles en forme de lisier.

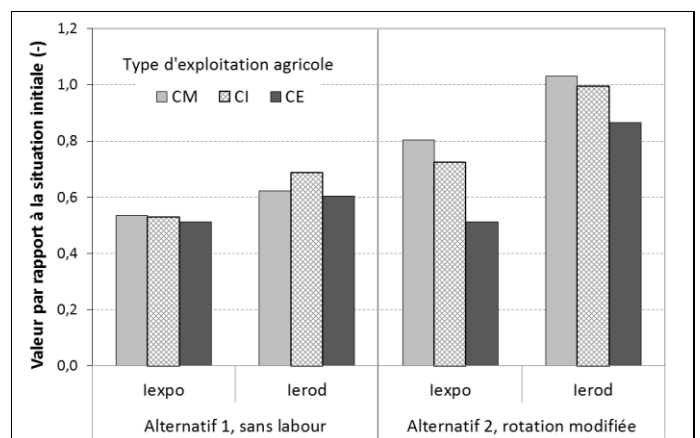


Figure 13. Les valeurs de I_{expo} et I_{erod} des systèmes de culture modifiés, exprimées en fraction des valeurs initiales des trois systèmes de culture originales non-modifiés.

Conclusion et perspectives

La modification des systèmes de culture peut être une mesure de lutte efficace contre l'érosion des sols. Le raisonnement intégré à l'échelle du système de culture, prenant en

compte à la fois la rotation, la gestion des résidus de culture, la gestion de l'interculture, les apports en produits résiduels organiques et les modes de travail du sol, est prometteur pour une lutte contre l'érosion à la source. Ce raisonnement permet de définir des stratégies adaptées pour chaque agriculteur, qu'il soit en système de labour ou de TCSL, et il évite de négliger ou d'oublier des aspects entrant en jeu.

Les indicateurs I_{expo} (pour évaluer l'exposition de la surface aux forces érosives en fonction de la rotation et des résidus de culture en surface) et I_{erod} (pour évaluer l'érodibilité du sol en fonction de la texture du sol et de la teneur en matière organique dans l'horizon travaillé influencé par le système de culture) permettent de différencier les systèmes de culture présents sur le secteur Zorn-Kochersberg. L'érodibilité du sol montre une forte sensibilité aux pratiques agricoles, et notamment à la gestion des résidus de culture et aux apports des produits résiduels organiques. En lien avec ce dernier constat, des évolutions récentes sur le territoire étudié, à savoir l'utilisation croissante des résidus de culture pour l'alimentation de méthaniseurs, l'épandage des digestats issus de la méthanisation et le développement des élevages tout lisier au détriment des systèmes à base de fumier, méritent toute l'attention de la recherche en agronomie pour en vérifier les effets sur l'érodibilité des sols.

Dans les années à venir, il s'agira d'augmenter la cohérence de ces démarches à l'échelle des systèmes de culture et de les installer de façon généralisée et durable dans les zones à risque. C'est un chantier important et indispensable, notamment avec le risque accru de fortes pluies qui semble s'annoncer avec le changement climatique. Des éléments scientifiques et des outils de conception et d'évaluation a priori sont désormais disponibles et sont à développer davantage.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ADEME pour son soutien financier au projet ABC'Terre (Lauréat de l'appel à projets REACTIF : REcherche sur l'Atténuation du Changement ClimaTique par l'agriculture et la Forêt) initié par le RMT Sols & Territoires. Les relectrices Blandine Lemerrier, Véronique Souchère et Sarah Feuillet sont remerciées pour leurs contributions à l'amélioration de l'article. Rémi Koller ainsi que l'ensemble du comité de pilotage du projet sont remerciés pour leurs nombreuses contributions et suggestions tout au long du projet ABC'Terre. Claire Chenu (AgroParisTech) est remerciée pour l'aide au choix de l'indicateur d'érodibilité du sol et son apport d'expert. François Alves, Claire Cugnière, Blandine Fritsch, Pierre Geist, Hélène Lebas, Rémy Michael (conseillers de la Chambre d'agriculture d'Alsace), Camille Fonteny, Oliver Rapp, Anne Schaub (ARAA) et Aimé Blatz (INRA Colmar) sont remerciés pour leur participation à la co-conception et à l'évaluation multicritères des systèmes de culture.

Bibliographie

Agreste, Recensements agricoles de 1970, 1979, 1988, 2000 et 2010. Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF). Disar (Diffusion Interactive des Statis-

tiques Agricoles de Référence), en ligne <http://agreste.agriculture.gouv.fr/page-d-accueil/article/donnees-en-ligne>.

Ali, B., 2008. Typologie fonctionnelle des états de surface du sol (EDS) pour l'extrapolation des propriétés hydro-érosives. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg (France).

Andriulo, A., Mary, B. et Guerif, J., 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*, 19, 365-377.

Armand, R., Bockstaller, C., Auzet, A.-V., Van Dijk, P., 2009. Runoff Generation Related to Intra-Field Soil Surface Characteristics variability. Application to Conservation Tillage Context. *Soil and Tillage Research*, 102, 1, 27-37.

Asselman, N.E.M., 2000. Suspended sediment in the Rhine. The impact of climate change on erosion, transport and deposition. Thèse de doctorat, Netherlands Geographical Studies, 234.

Attoumani-Ronceux, A., Aubertot, J.-N., Guichard, L., Jouy, L., Mischler, P., Omon, B., Petit, M.-S., Pleyber, E., Reau, R., Seiler A., 2011. Guide pratique pour la conception de systèmes de culture plus économes en produits phytosanitaires. Application aux systèmes de polyculture. Ministères chargés de l'agriculture et de l'environnement, RMT Systèmes de culture innovants.

Auzet, A.-V., 1987. L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement. *Annales de Géographie*, 537, 529-555.

Auzet, A.-V., Heitz, C., Armand, R., Guyonnet, J., Moquet, J.-S., 2005. Les coulées de boue dans le Bas-Rhin : analyse à partir des dossiers de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle. Institut de Mécanique des Fluides et des Solides, Université de Strasbourg, 26 p.

Boiffin, J., Papy, F., Eimberck, M., 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I - Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, 8, 663-673.

CAA, 2013. Typologie des exploitations alsaciennes. Référentiel 2013. Chambre régionale d'agriculture Alsace (ed.). 52 p.

Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Souchère, V., King, C., Antoni, V., Surdyk, N., Dubus, I., Arrouays, D., Desprats, J.-F., 2006. Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols Rapport n°3 : Synthèse et recommandations générales. Rapport BRGM-RP-55104-FR, 85 p.

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., 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*, 18, 3, 161-174.

CIGAL, 2013. Occupation du sol en Alsace, évolution entre 2000 et 2011/12. BdOCS2011/2012, version 2 actualisée en 2013. Coopération pour l'Information Géographique en Alsace (CIGAL), Région Alsace. Document disponible sur www.cigalsace.org.

- DREAL Alsace, 2014. Risques naturels et hydrauliques : les coulées d'eau boueuse. En ligne <http://www.alsace.developpement-durable.gouv.fr/les-coulees-d-eau-boueuse-a2056.html>.
- Dumas, D., 2009. Optimisation des micro-ouvrages de lutte contre les coulées d'eaux boueuses par la modélisation. Mémoire Master 2, Géosciences, Environnement, Risques, Spécialité « Risques Technologiques et Naturels », Université de Strasbourg, 45 p.
- Duparque, A., Tomis, V., Mary, B., Boizard, H. et Damay, N., 2011. Le bilan Humique AMG, pour une démarche de conseil fondée sur des cas-types régionaux. In : 10e rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre. GEMAS-COMIFER, Reims, 16 p.
- Froehlicher, L., Schwartz, D., Ertlen, D., et Trautmann, M., 2016. Hedges, colluvium, and lynchets along a reference toposequence (Habsheim, alsace, France): the history of erosion in a loess area. Quaternaire, accepté.
- GIEC, 2013. Résumé à l'intention des décideurs, changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Stocker, T.F., Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique.
- Heitz, C., 2009. La perception du risque de coulées boueuses : analyse sociogéographique et apports à l'économie comportementale. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 296 p.
- Heitz, C., Spaeter, S., Auzet, A.-V., Glatron, S., 2009. Local Stakeholders' Perception of Muddy Flood Risk and Implications for Management Approaches: A Case Study in Alsace (France). *Land Use Policy*, 26, 2, 443-451.
- Klein Tank, A.M.G. et Können, G.P., 1993. The dependence of daily precipitation on temperature. *Proceedings of the eighteenth annual climate diagnostics workshop*, Boulder Colorado, 207-211.
- Le Bissonnais, Y. et Gascuel-Oudou, C., 1998. L'érosion hydrique des sols cultivés en milieu tempéré. In : *Sol : Interface fragile* (Stengel, P., Gelin, S., eds.), Mieux Comprendre, INRA Editions, Paris, FRA, 129-144.
- Le Bissonnais, Y., Montier, C., Daroussin, J., King, D., 1998. Cartographie de l'aléa érosion des sols en France. *IFEN. Collection Etudes et travaux*, 18, 63 p.
- Lemerrier, B., Walter, C., Schwartz, C., Saby, N., Arrouays, D., Follain, S., 2006. Suivi des teneurs en carbone organique et en phosphore extractible dans les sols agricoles de trois régions françaises. *Analyse à partir de la Base de Données des Analyses de Terre, Étude et Gestion des Sols*, 13, 3, 165-179.
- Levasseur, F., Martin, P. et Scheurer, O., 2015. RPG-explorer, version 1.8.24. Notice d'utilisation. AgroParisTech, Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, INRA, 114 p.
- Mata L., Scheurer O., Sagot S., 2014. Caractérisation des pratiques associées à la gestion du carbone organique des sols à partir de la BdD Azofert® (LDAR) ; différenciation entre éleveurs et non-éleveurs dans le Tardenois. *Rapport d'activité du projet ABCterre ; annexe 3*, 30 p.
- Pacevicus, A.-E., 2008. Lutte contre l'érosion des sols et contre les coulées d'eaux boueuses : utilisation de méthodes rustiques. Mémoire Master 2, Géosciences, Environnement, Risques, Spécialité «Risques Technologiques et Naturels», Université de Strasbourg, 42 p.
- Peignot, B., Minard-Libeau, C. et Déaud, V., 1999. Le remembrement rural. Étapes, conséquences, recours. *Editions France Agricole*, 256 p.
- Région Alsace, 2009. Les indicateurs de l'environnement en Alsace. *Région Alsace*, 24 p.
- RMT Systèmes de culture innovants, 2013. Agro-Peps, outil web collaboratif d'informations techniques et d'échanges. <http://agropeps.clermont.cemagref.fr/mw/index.php/Accueil>. Consulté le 12/05/2014.
- Römkens, M.J.M., Young, R.A., Poesen, J.W.A., McCool, D.K., El-Swaify, S.A., Bradford, J.M., 1996. Chapter 3. Soil erodibility factor (K). In : *Predicting soil erosion by water : A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, USDA-ARS, Agriculture Handbook Number 703 (Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., eds.).
- Rosenfelder, C., 2014. Evaluation et adaptation des systèmes de culture pour réduire la sensibilité potentielle des sols à l'érosion en Alsace. *Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA). Mémoire de stage M2, Agronomie et Territoire*, Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, 97 pp.
- Saby, N., Foucaud Lemerrier, B., Arrouays, D., Leménager, S., Louis, B., Millet, F., Paroissien, J.-B., Schellenberger, E., Squidant, H., Swiderski, C., Toutain, B., Walter, C., Bardy, M., 2014. Le programme Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) : bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses, *Étude et Gestion des Sols*, 21, 141-150.
- Schönhart, M., Schmid, E., Schneider, U. A., 2011. CropRota - A crop rotation model to support integrated land use assessments. *European Journal of Agronomy*, 34, 263-277.
- Swiderski, C., Saby, N.P.A., Party, J.P., Sauter, J., Koller, R., Van Dijk, P., Lemerrier, B. et Arrouays, D., 2012. Evolution des teneurs en carbone organique dans l'horizon de surface des sols cultivés en Alsace. *Analyse à partir de la Base de Données des Analyses de Terre. Etude et Gestion des Sols*, 19, 3 et 4, 179-192.
- Torri, D., Poesen, J., Borselli, L., 1997. Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset. *Catena* 31 (1/2), 1-22.
- Torri, D., Poesen, J., Borselli, L., 2002. Corrigendum to "Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset". *Catena*, 46, 309-310.
- Van Dijk, P., 2001. Soil erosion and associated sediment supply to rivers. *Seasonal dynamics, soil conservation measures*

and impacts of climate change. Thèse de doctorat, University of Amsterdam, 2001.

Van Dijk, P. M., Auzet, A.-V., Lemmel, M., 2005. Rapid Assessment of Field Erosion and Sediment Transport Pathways in Cultivated Catchments after Heavy Rainfall Events. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 2, 169-182.

Van Dijk, P., Koller, R., Lasserre, D., Gaudillat, D., 2007. L'impact du non labour sur la quantité et la qualité du ruissellement et de la production végétale. Résultats de la campagne 2007 sur le site de Geispitzen. Rapport annuel, Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA) et Arvalis-Institut du Végétal, 34 p.

Van Dijk, P., Sauter, J., Koller, R., Auzet, A.-V., 2009. Cartographie de la sensibilité à l'érosion des sols et du risque potentiel de coulées d'eaux boueuses en Alsace. In : Actes des 10èmes Journées d'Etude des Sols, 11 au 15 mai 2009, Strasbourg (Schwartz, D., ed.), 369-370.

Vopravil, J., Janeček, M., Tippl, M., 2007. Revised soil erodibility K-factor for soils in the Czech Republic. *Soil and Water Research*, 2, 1, 1-9.

Wischmeier, W. et Smith, D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning, Agricultural Handbook No. 537, U.S. Department of Agriculture, Washington DC, USA.