

Projet Air-osion

Projet pilote visant à observer l'érosion dans
les grandes cultures à l'aide d'images aériennes à haute résolution
prises par drone afin de prendre des mesures de prévention



Décembre 2017

Sur mandat de :
l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Mentions légales

Mandant :

Office fédéral de l'environnement (OFEV), Division Sols et biotechnologie, CH-3003 Berne
L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire :

CHANGINS Haute Ecole de Viticulture et Œnologie (CHANGINS)
Haute Ecole des Sciences Agronomiques, Forestières et Alimentaires d'Agronomie (HAFL)
Centre pour le Développement et l'Environnement (CDE) Université Bern
Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture Fribourg (HEIA-FR)

Coordination du projet :

Dorothea Noll (CHANGINS, Haute Ecole de Viticulture et Œnologie)

Auteurs :

CHANGINS Haute Ecole de Viticulture et Œnologie (CHANGINS) : Dorothea Noll, Alba Farnos, André-Laurent Perruchoud ; Haute Ecole des Sciences Agronomiques, Forestières et Alimentaires d'Agronomie (HAFL) : Nicole Berger, Stéphane Burgos, Matthias Stettler ; Centre pour le Développement et l'Environnement (CDE) Université Bern : Jürg Krauer, Elias Hodel, Matthias Fries, Laura Ebnetter, Hanspeter Liniger ; Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture Fribourg (HEIA-FR) : Gaëlle Vadi, Géraldine Bullinger, Bruno Spahni, Fabienne Favre Boivin.

Accompagnement OFEV :

Corsin Lang, Section Sols

Pour correspondance :

Changins | Route de Duillier 50 | Case postale 1148 | 1260 Nyon 1 | Suisse
+41 22 363 40 48 |
dorothea.noll@changins.ch

Remarque : La présente étude / le présent rapport a été réalisé(e) sur mandat de l'OFEV.
Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

Table des matières

Résumé.....	7
1. Contexte	8
1.1. Les questions principales.....	8
1.2. Les objectifs du projet Air-osion.....	8
1.3. Les partenaires et l'organisation du projet	8
1.4. Périmètre du projet et sites d'étude.....	9
1.4.1. Périmètre du projet.....	9
1.4.2. Sites d'étude.....	10
1.5. Organisation du rapport.....	13
2. Système d'alarme ERMS (ErosionsRisiko Monitoring System)	14
2.1. But du système d'alarme ERMS	14
2.2. Méthodologie	14
2.2.1. Géodonnées utilisées	14
2.2.2. Configuration du système d'alarme et automatisation de l'analyse	15
2.2.3. Déclenchement d'une alerte	17
2.3. Résultats et discussion du système d'alarme ERMS	17
2.3.1. Analyse des précipitations.....	17
2.3.2. Pertinence et comparaison du système d'alarme ERMS	19
3. Observations et mesures sur le terrain	25
3.1. Matériels et méthodes de mesures manuelles et observation de l'érosion.....	26
3.1.1. Mesure manuelle d'une rigole d'érosion	26
3.1.2. Observation de l'environnement parcellaire (questionnaire WOCAT)	26
3.1.3. Résultats de l'observation de l'environnement parcellaire (WOCAT)	27
3.2. Matériels et méthodes de mesure avec un drone d'une rigole d'érosion.....	34
3.2.1. Les drones.....	34
3.2.2. Les capteurs.....	35
3.2.3. Plan de vol	35
3.2.4. Logiciel de photogrammétrie	37
3.2.5. Résultats de l'acquisition des images de drone pour l'observation de l'érosion.....	38
3.2.6. Résultats d'analyses à l'échelle du sous bassin versant.....	45
4. Analyse des images à haute résolution	48
4.1. Extraction des rigoles en utilisant le modèle numérique de surface (MNS).....	48
4.1.1. Résultats de l'extraction de rigoles avec des tailles différentes de fenêtre mobile	50
4.1.2. Extraction des rigoles avec un MNS d'une résolution de 4 cm/pixel.....	53
4.2. Extraction du volume accumulé en bas d'un champ de pommes de terre	54
4.3. Extraction des rigoles en utilisant les images RGB (red, green, blue).....	56
4.3.1. Résultats d'extraction d'un système complexe de rigoles avec des couleurs RGB.....	57
5. Rigole artificielle servant de référentiel	59
5.1. Objectifs	59
5.2. Matériel et méthodes pour la rigole artificielle	59
5.2.1. Création de la rigole	59
5.2.2. Acquisition des données et méthodologie d'analyse.....	60
5.3. Résultats pour l'ensemble de la rigole	63

5.3.1. Comparaison détaillée des méthodes pour les dix premiers mètres de la rigole.....	64
6. Conclusion et perspectives.....	66
7. Remerciements	69
Références.....	70

Table des figures

Figure 1: Périmètre d'étude en orange	9
Figure 2: Localisation des 7 sites d'étude potentiels sur le canton de Fribourg.....	10
Figure 3 : Photos du site d'étude n° 1	11
Figure 4: Photos du site d'étude n° 2	11
Figure 5 : Photos du site d'étude n° 3	12
Figure 6: Photos du site d'étude n° 4.....	12
Figure 7 : Photos du site n° 5.....	13
Figure 8 : Données radar C-band et cellules avec de fortes pluies sur le réseau SwissMetNet	15
Figure 9: Procédure de collecte des données du système d'alarme ERMS	16
Figure 10 : Fonctionnement de l'alerte du système d'alarme ERMS.....	17
Figure 11 : Répartition et durée des 88 forts événements pluvieux durant la période du projet	18
Figure 12 : Quantité moyenne des précipitations dans le périmètre d'étude entre 1951 et 1980	19
Figure 13 : Procédure suivie pour tester le système d'alarme ERMS	19
Figure 14 : Nature des liens dans la procédure de validation du système d'alarme ERMS.....	24
Figure 15: Déroulement sur le terrain et après.....	25
Figure 16: Méthode de mesure d'une rigole d'érosion au champ.....	26
Figure 17 : Etude de cas 1.....	28
Figure 18 : Etude de cas 1.....	29
Figure 19 : Etude de cas 2	31
Figure 20 : Etude de cas 2.....	32
Figure 21 : Drones utilisés pour le projet Air-osion.....	35
Figure 22 : Logiciels de plan de vol utilisés dans le projet Air-osion	37
Figure 23 : Logiciels de photogrammétrie utilisés pour l'obtention d'une orthophoto et d'un MNS..	37
Figure 24 : Symbole GCO et correction de la distorsion	38
Figure 25 : Erosion dans une parcelle de tournesol.....	39
Figure 26 : Erosion dans une parcelle de maïs	39
Figure 27 : Erosion dans une parcelle de maïs fraîchement semée.....	40
Figure 28 : Dégâts importants d'érosion sur un sol nu	40
Figure 29 : Erosions visible dans des parcelles légèrement couvertes	41
Figure 30 : Erosion dans des parcelles de blé.....	41
Figure 31 : Erosion dans une parcelle de blé de plus de 25 cm de haut.....	41
Figure 32 : Erosion visible sur un MNS d'un champ de tournesol, résolution de 4 cm/px	42
Figure 33 : Dégâts d'érosion important dans un champ de pommes de terre	42
Figure 34 : Zoom de dégâts d'érosion d'une parcelle de pommes de terre	43
Figure 35 : Zoom sur une rigole d'érosion dans un champ de tournesol	44
Figure 36 : Dégâts d'érosion suivant la topographie du sous bassin versant	45
Figure 37 : Analyse d'une zone en 2015 à l'échelle d'un sous bassin versant	45
Figure 38 : Analyse d'une zone en 2016 à l'échelle d'un sous bassin versant	46
Figure 39 : Survol de plusieurs parcelles pour une compréhension de l'écoulement de la zone	47
Figure 40 : MNS de plusieurs parcelles facilitant la compréhension de l'écoulement de l'eau	47
Figure 41 : Représentation graphique des différents filtres utilisés pour créer le MAE.....	48
Figure 42 : Modèle différentiel obtenu suite au traitement du MNS obtenu par le drone.....	49
Figure 43 : Effet des filtres morphologiques	50
Figure 44 : Rigole avec les pixels étiquetés et représentés par une couleur	50
Figure 45 : Effet des différentes tailles de fenêtres mobiles sur un profil d'une rigole d'érosion.....	51

Figure 46 : Lissage d'une rigole avec une fenêtre mobile de 150x150	52
Figure 47 : Procédé pour l'extraction d'une rigole d'érosion	52
Figure 48 : Profil moyen de la rigole et photo de l'hétérogénéité de la rigole	53
Figure 49 : Extraction d'une rigole d'érosion basée sur un MNS avec une résolution de 4 cm.....	53
Figure 50 : Extraction des buttes de pommes de terre.....	54
Figure 51 : Extraction des buttes de pomme de terre a	54
Figure 52 : Reconstruction des profils de buttes de pomme de terre dans une zone érodée et dans une zone avec accumulation.....	55
Figure 53 : Exemple de calcul de l'accumulation de terre entre les rangs de pommes de terre.....	55
Figure 54 : Extraction d'une rigole en utilisant les images RGB.....	56
Figure 55 : Effet de différentes tailles de filtres médians sur les rigoles et sur le bruit.....	57
Figure 56 : Effet de deux filtres égalisateurs sur la bande spectrale V	57
Figure 57 : Extraction des rigoles depuis une image RGB	58
Figure 58 : Effet de l'utilisation de différents seuils pour l'extraction des rigoles sur la bande S	58
Figure 59 : Extraction générale basée sur des couleurs pâles	58
Figure 60 : Rigole artificielle sur le site de l'Agroscope Changins	59
Figure 61 : Simulation de l'érosion dans le fond de la rigole artificielle	60
Figure 62 : Tachéomètre et cibles levés dans le référentiel commun	60
Figure 63 : Déroulement et résultat d'un levé via laser scanner	61
Figure 64 : Exemple de coupes extraites automatiquement	62
Figure 65 : Illustrations du travail sur le nuage de points du laser	62
Figure 66 : Division de la rigole artificielle en 5 tronçon pour faciliter le calcul du volume	63
Figure 67: Calcul du volume avec une résolution de 1 cm/px	65
Figure 68: Calcul du volume avec une résolution de 2 cm/px	65

Table des tableaux

Tableau 1 : Résumé des spécificités de chaque site.	13
Tableau 2 : Risque érosif des sites étudiés, selon les cartes ERK2	21
Tableau 3 : Jours avec corrélation alerte ERMS et intensité pluie > 10 mm/h.....	22
Tableau 4 : Récapitulatif des principales caractéristiques de la zone d'étude	28
Tableau 5 : Récapitulatif des principales caractéristiques de la zone d'étude	29
Tableau 6 : Récapitulatif des principales caractéristiques de la zone d'étude	31
Tableau 7 : Récapitulatif des principales caractéristiques de la zone d'étude	32
Tableau 8 : Réglage des capteurs en fonction de plusieurs paramètres.....	37
Tableau 9 : Résultat du calcul du volume de la rigole d'érosion avec le laser scanner (référentiel)....	63
Tableau 10: Résultats du calcul de la rigole d'érosion en m ³ en fonction des différents mesures.....	64

Résumé

Les problèmes d'érosion sont toujours d'actualité bien qu'il soit connu qu'elle diminue à long terme la fertilité et la productivité des sols. Les mesures mises en place pour les limiter sont souvent insuffisantes et non spécifiques à la situation. Le projet Air-rosion a pour but principal d'analyser les possibilités d'identifier de l'érosion linéaire en grandes cultures et d'en calculer le volume sur la base d'images prises par drone.

Il s'agissait, dans un premier temps, de développer un système d'alarme ERMS permettant de localiser les zones où de fortes précipitations ont eu lieu (> 10 mm/h). Ce système d'alarme fonctionne avec les données météo CombiPrecip et est couplé à la carte des risques d'érosion pour la Suisse (ERK2). Ce système d'alarme envoie par mail une alerte avec les géodonnées aux partenaires du projet qui, en fonction de la période de l'année, se rendent sur le terrain pour faire des mesures sur les sols nus après les semis.

Une fois les rigoles d'érosion localisées et l'accord de l'agriculteur obtenu, des mesures manuelles et aériennes (images par drone) sont effectuées. Les mesures manuelles consistent à relever par section la largeur et la profondeur de la rigole ; les mesures par drone consistent en un survol de la zone et de la rigole. Pour certains sites des observations supplémentaires sont effectuées en se basant sur le questionnaire WOCAT (World Overview of Conservation Approaches and Technologies). Ces observations montrent l'importance de l'analyse des phénomènes érosifs au cas par cas. En effet, une généralisation des causes est difficile car de nombreux facteurs (couverture du sol, rotation des cultures, propriétés du sol, etc.) ont une implication, plus ou moins grande en fonction de la situation.

Après le traitement des images, il est possible d'obtenir une orthophoto et un modèle numérique de surface (MNS) de la zone survolée. Il s'avère que pour pouvoir calculer le volume de terre érodée, il faut une résolution du MNS ≤ 2 cm/px. Au-dessus de cette limite, à 4 cm/px, les données sont très utiles pour comprendre la dynamique hydrique du site. Selon le type de support (MNS ou orthophoto) et sa qualité (résolution, bruits), différentes méthodes sont utilisées au sein du projet Air-rosion pour réaliser l'extraction des rigoles et une méthode de calcul de leurs volumes est développée. Enfin, pour valider l'emploi de l'imagerie obtenue par drones, une rigole artificielle est creusée et les différentes méthodes de mesure énoncées ci-dessus sont appliquées. Pour servir de mesure de référence, la rigole artificielle est mesurée au laser scanner, outil géomatique le plus précis à l'heure actuelle pour effectuer une telle mesure avec une précision inférieure au cm.

Ce projet montre finalement qu'il est possible de détecter et quantifier l'érosion dans les grandes cultures sur la base d'images aériennes de manière semi-automatique. Il est également observé que pour mieux prédire les éléments érosifs à l'échelle du sous bassin versant et pour pouvoir proposer des mesures de préventions, l'acquisition rapide de données précises est essentielle. Le développement des outils d'imagerie aérienne, l'amélioration des cartes de précipitations, les nouvelles données GELAN (abréviation de l'allemand Gesamtlösung EDV Landwirtschaft und Natur), en plus de la possibilité d'acquérir des données de terrain par « crowdsourcing », sont autant d'éléments réjouissants pour les perspectives de ce projet.

1. Contexte

Malgré la prise de conscience du fait que le sol est une ressource d'importance mais non renouvelable, les problèmes d'érosion perdurent. Il est maintenant bien connu que l'érosion des sols diminue à long terme leur fertilité (Vanwalleghema et *al.*, 2017), qu'elle contribue à la charge des eaux de surface en boues et intrants en tous genres transportés par les écoulements et peut, dans certains cas conduire à des dégâts sur les routes ou dans les habitations (Guerra et *al.*, 2017). Il est souvent difficile de bien identifier les causes d'érosion et par conséquent de pouvoir proposer des mesures adéquates et ciblées pour les services étatiques. Cependant, la disponibilité des données géographiques, l'avènement des technologies de l'information, le développement de plus en plus précis de modèles numériques de terrain (MNT) et les nouveaux systèmes de télédétection tels que l'utilisation d'images aériennes prises par des drones (Unmanned Aerial Vehicle (UAV) – low cost) offrent de nouvelles possibilités pour pouvoir documenter ces phénomènes érosifs et proposer des mesures de prévention. L'utilisation de drone dans le cadre du suivi de l'érosion a déjà été appliquée de manière concluante (Klaus et *al.*, 2014 ; Pineux et *al.*, 2017). C'est dans le but de pouvoir tester ces nouveaux outils que l'Office fédéral de l'Environnement a mis au concours ce projet. Quatre institutions partenaires se sont associées dans cette perspective et ont développé la méthodologie décrite dans ce projet Air-osion.

1.1. Les questions principales

- Peut-on mettre en évidence les traces d'érosion linéaire en grandes cultures à l'aide d'images aériennes prises avec un drone ?
- Peut-on mesurer l'érosion linéaire à l'aide des images aériennes et du modèle numérique de surface pris avec un drone ?

1.2. Les objectifs du projet Air-osion

- Développer une méthode d'analyse des précipitations permettant d'identifier les zones de pluies fortement érosives (> 10 mm/h) ;
- Documenter les phénomènes érosifs par des mesures de terrain (occupation du sol, pratiques culturales et environnement parcellaire ayant conduit à l'érosion) et des images prises avec un drone ;
- Analyser les images pour calculer l'étendue de l'érosion et comparer les résultats avec les mesures de terrain ;
- Automatiser une méthode de reconnaissance et de calcul du volume des rigoles d'érosion ;
- Sur la base de ces données comprendre les phénomènes érosifs et proposer des mesures adéquates ;
- Développer un référentiel pour la validation de la méthode développée dans ce projet et pour la comparaison des méthodes : manuelle ↔ drone.

1.3. Les partenaires et l'organisation du projet

Ce projet s'articule autour de quatre instituts de recherche partenaires. Ces instituts sont :

Haute école de viticulture et œnologie (CHANGINS)

Haute Ecole des Sciences Agronomiques, Forestières et Alimentaires d'Agronomie (HAFL)

Centre pour le Développement et l'Environnement Université Bern (CDE)

Haute école d'Ingénierie et d'Architecture Fribourg (HEIA-FR)

Chaque partenaire a un rôle bien défini en fonction de ses domaines de recherches, de son matériel et de sa localisation géographique, notamment en ce qui concerne les campagnes de terrain. Les mesures sur le terrain sont effectuées après les périodes de semis à savoir lorsque le sol est nu ou peu couvert donc au printemps et en automne.

CHANGINS s'est principalement occupée des mesures de terrain manuelles et avec le drone et de l'étude de la rigole artificielle servant de référentiel pour la validation de la méthode. La HAFL a développé l'analyse des images et a aussi contribué aux mesures sur le terrain avec le drone. Le CDE, quant à lui, a développé le système d'alarme et a également participé sur le terrain aux mesures manuelles et avec le drone. Pour finir la HEIA-FR a œuvré pour les mesures manuelles sur le terrain et a comparé les alertes du système d'alarme avec d'autres stations météo et avec la réalité du terrain.

1.4. Périmètre du projet et sites d'étude

1.4.1. Périmètre du projet

Le périmètre d'étude s'étend du canton de Vaud jusqu'à Berne en passant par Fribourg (Figure 1). Il comprend les zones de grandes cultures. Ce périmètre a été choisi de manière à être représentatif d'une grande variabilité de sols, de pratiques culturales et de structures d'exploitation. A chaque partenaire est attribuée une zone d'étude plus ou moins fixe en fonction de la localisation de chacun. Ces zones d'étude s'étendent dans un rayon d'environ 50 km à vol d'oiseau par rapport à la localisation des partenaires. Chaque équipe est en charge, dans son rayon d'étude, de trouver des sites ayant subi des phénomènes érosifs.

De surcroît, il a été décidé de continuer à étudier trois sites dans ce périmètre, connus pour avoir des cas récurrents d'érosion, et pour lesquels il existe un monitoring depuis plusieurs années (points verts, Figure 1). Il s'agit de Melchnau, Frienisberg et Murist.

A cause de la crainte de certains agriculteurs, il a été décidé de ne pas afficher clairement le nom des autres communes concernées par l'érosion.

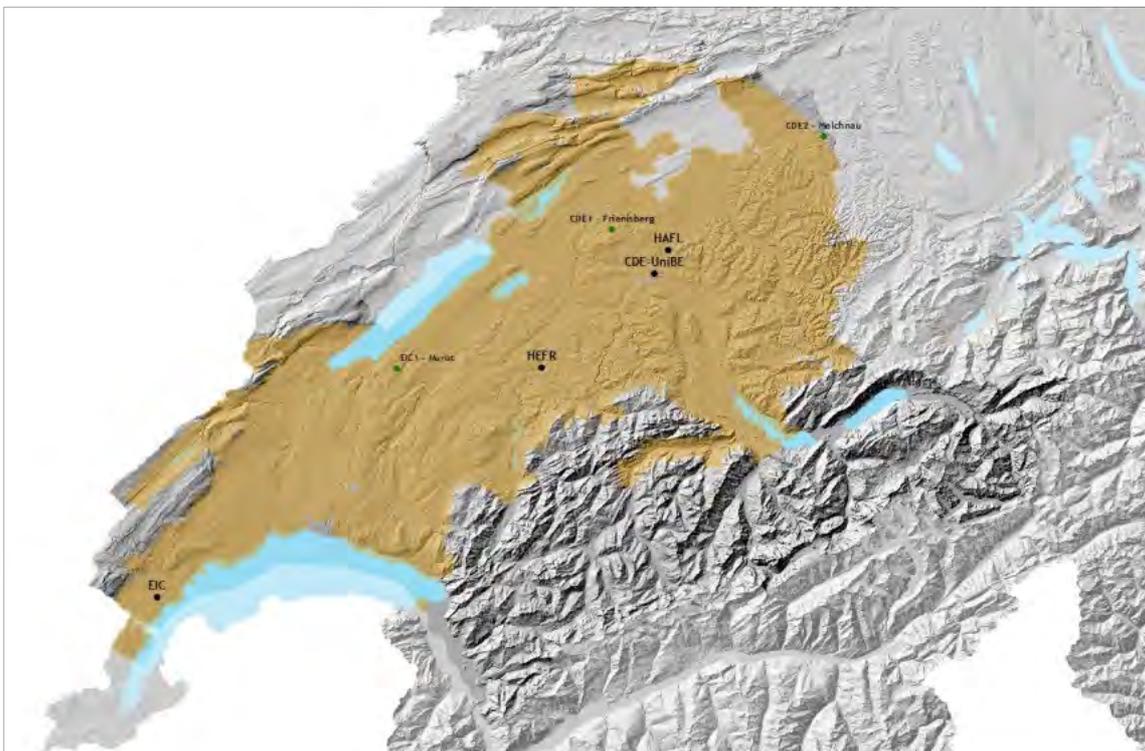


Figure 1: Périmètre d'étude en orange, les points verts indiquent les sites d'étude ayant un monitoring

1.4.2. Sites d'étude

Trois stratégies sont établies pour localiser les sites avec de l'érosion. Tous les partenaires, à l'exception de la HEIA-FR, ont suivi les deux premières.

Stratégie 1 : les sites d'érosion sont trouvés un peu par hasard après avoir arpenté la zone identifiée par le système d'alarme ERMS (voir chapitre 2).

Stratégie 2 : les sites d'érosion sont indiqués par des agriculteurs ou des observateurs connaissant le projet.

Stratégie 3 : les sites étudiés par les partenaires de la HEIA-FR, détaillés ci-dessous, sont identifiés en amont des mesures sur le terrain avec l'aide de l'Institut agronomique de Grangeneuve (Adrian von Niederhäusern et Nicolas Rossier) et le Service de l'agriculture du canton de Fribourg (Dominique Gärtner). Ces sites sont connus pour subir régulièrement des dégâts d'érosion.

Sites d'étude de la HEIA-FR

Cinq sites d'étude potentiels (site 1 à 5) sont donc identifiés (Figure 2). Le 18.06.2015, une visite a été réalisée avec la présence des propriétaires et/ou exploitants. Par la suite, deux zones supplémentaires sont ajoutées, situées dans une zone où le risque érosif (ERK2) est panaché (site 6) ou inexistant (site 7). Ces deux dernières sont ajoutées dans le cadre de la validation du système d'alarme ERMS.

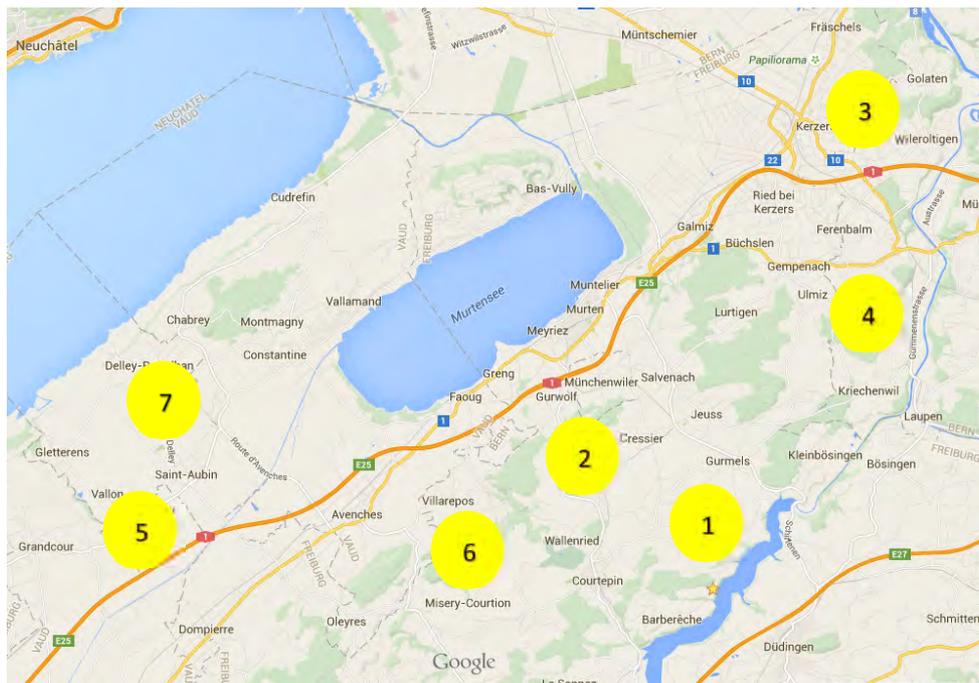


Figure 2: Localisation des 7 sites d'étude potentiels sur le canton de Fribourg (tiré de Google Map)

Quelques caractéristiques particulières des différents sites sont présentées ci-dessous.

Site HEIA-FR n° 1

- Tout le bassin versant appartient à la même personne (propriétaire et exploitant).
- La météo est très locale dans cette région. Des différences de 10-20 mm entre deux pluviomètres situés à moins d'un kilomètre d'écart se produisent. Le pluviomètre MétéoSuisse de Payerne correspond le mieux au terrain.

Le propriétaire constate des phénomènes d'érosion avec des pluies de 10 mm (Figure 3a).

Le thalweg est enherbé depuis quelques années pour freiner l'érosion (Figure 3b).

- Dans le bassin versant sont plantés de l'épeautre (non-labour), des pommes de terre et betteraves (labour).



a) Photo du haut de la parcelle



b) Photo du thalweg enherbé

Figure 3 : Photos du site d'étude n° 1 (source G. Bullinger)

Site HEIA-FR n° 2

- Succession Haut → Bas : Chemin - Bande d'herbe - Maïs - Pomme de terre - Blé - Jachère florale de 9 m.
- Le blé sera fauché début août 2015 puis une prairie temporaire sera plantée (grand risque d'érosion en septembre).
- Pas de labour à l'endroit du maïs mais 1/3 labouré par bande sur 15 cm de profond.
- La jachère florale a été mise en place pour freiner l'eau.
- Des regards ont été installés sur le chemin en haut, mais ils ne sont reliés à rien ; l'eau les remplit aussi de gravier, puis ils débordent après quelques minutes (la roche mère (molasse) est à environ 1.5 m de fond) ; le chemin est détérioré (Figure 4b).
Le maïs pousse mal en raison de la carence en soufre (lessivé) (Figure 4a et c).
- Le propriétaire constate des phénomènes d'érosion avec des pluies de 20-30 mm.
- Lors de forts événements, l'eau sort sur la route dans le virage.



a) Photo du maïs (mai 2015)



b) Photo du chemin en amont avec dépôt de terre



c) Photo du maïs (mai 2015)

Figure 4: Photos du site d'étude n° 2 (source G. Bullinger)

Site HEIA-FR n° 3

Rencontre avec le préposé à l'agriculture de la commune et 5 exploitants.

- Le terrain est morcelé entre 5 exploitants.
- La zone 1 est connue comme problématique en cas d'érosion en raison de la présence de villas en aval de la parcelle (Figure 5a).
- La zone 2 : érosion bien visible (Figure 5b), plantations de maraîchère (principalement asperges et salade). Importante superficie de terre nue.



a) Vue amont de la parcelle avec en aval la présence de villas

b) Erosion visible dans une plantation maraîchère

Figure 5 : Photos du site d'étude n° 3 (source B. Spahni)

Site HEIA-FR n° 4

- Plantation de betteraves et d'asperges. Les asperges (en haut) sont à un autre propriétaire. Les betteraves seront remplacées par des pommes de terre en 2016 (sol nu de novembre à avril) (Figure 6a)
- Sol très limono-sableux (peu de MO) et instable, présence d'une croûte de battance (Figure 6b).
- Une bande enherbée a été plantée pour protéger la route, mais suite à un problème de mauvaises herbes, l'exploitant les a éliminées et a effectué un nouveau semis.
- La situation est connue pour subir des dégâts d'érosion.
- Souhait : Connaître la morphologie du terrain afin de savoir où mettre un regard qui permettrait un bon écoulement.



a) Plantation de betteraves et d'asperges

b) Photo du bas de la parcelle croûte de battance

Figure 6: Photos du site d'étude n° 4 (source G. Bullinger)

Site HEIA-FR n° 5

- Le terrain appartient à plusieurs propriétaires.
- Erosion en direction du chemin (Figure 7a).
- Plantation de pommes de terre et de betteraves.
- Il y a peut-être des travaux envisagés (voir entre la commune et le bureau Herziger).
- Érosion de l'événement pluvieux de juin 2015 (Figure 7b).



a) Photo du chemin où a eu lieu l'érosion

b) Photo de l'érosion suite aux pluies de juin 2015

Figure 7 : Photos du site n° 5 (source G. Bullinger)

Sites HEIA-FR n° 6 et 7

Pour ces deux sites, le choix ne s'est pas porté sur un champ particulier mais sur une zone plus vaste qui est parcourue suite aux alertes du système d'alarme ERMS.

L'idée est de toucher des zones avec des risques d'érosion qualitative différents pour constater l'effet des précipitations annoncées sur les sols par le système d'alarme ERMS. Le site n° 6 présente des risques érosifs moyens, avec panachage sur la zone, tandis que le site n° 7 présente un risque érosif faible.

Le Tableau 1 : résume les spécificités des différents sites d'étude.

	Pente	Texture	Culture 2016	Observations	Infrastructures
Site n° 1	forte	limono-argileuse	céréales	au-dessus de la route	lisière champ/forêt
Site n° 1	forte	ND	maïs	en-dessous de la route	
Site n° 2	moyenne	ND	céréales/pommes de terre	regard noyé	chemins
Site n° 3	nulle	ND	céréales		chemins
Site n° 3	faible	sablo-limoneuse	asperges/betteraves		chemins
Site n° 4	moyenne	ND	pommes de terre / asperges		chemins
Site n° 5	faible	limono-sableuse	jachère		chemins
Site n° 5	faible	limono-sableuse	betteraves/pomme-de-terre/maïs		chemins, regards
Site n° 6	nulle à faible	ND	sols nus	automne seulement	chemins
Site n° 7	nulle	ND	sols nus	automne seulement	chemins

Tableau 1 : Résumé des spécificités de chaque site

1.5. Organisation du rapport

Ce projet se découpe en quatre parties qui feront chacune l'objet d'un chapitre à part entière.

1. Le système d'alarme ERMS
2. Les mesures sur le terrain pour documenter l'érosion
3. L'analyse des images pour l'extraction des rigoles et le calcul du volume de terre érodée
4. La rigole artificielle servant de référentiel

Chaque chapitre comporte une partie : objectifs, méthodologie, résultats et discussion.

2. Système d'alarme ERMS (ErosionsRisiko Monitoring System)

2.1. But du système d'alarme ERMS

Le développement du système d'alarme ERMS (ErosionsRisiko Monitoring System) a pour but de recenser et localiser des épisodes pluvieux conduisant à de l'érosion. Ce système combine les surfaces présentant un risque d'érosion potentiel et l'analyse en temps réelle des radars de précipitations. Grâce à l'analyse en direct d'un phénomène érosif potentiel et dans la mesure où les critères prédéfinis de pluie sont dépassés, à savoir > 10 mm/h, une alarme est donnée via SMS ou email. Lors d'un tel événement le système d'alarme ERMS fournit aux partenaires du projet des géodonnées permettant de le localiser et de l'analyser.

2.2. Méthodologie

2.2.1. Géodonnées utilisées

Les zones à risque d'érosion sont déterminées dans le périmètre d'étude principalement sur la base de la carte des risques d'érosion de la Suisse, ci-après ERK2 (Gisler et *al.*, 2010), avec une résolution spatiale de 2x2 mètres. Le masque orangé visible sur la Figure 1 est utilisé pour l'analyse automatique des données des précipitations de MétéoSuisse.

La carte ERK2 présente le potentiel risque d'érosion des surfaces agricoles utiles. Ce modèle comprend les zones de vallées et de collines ainsi que les zones de montagne I et II (Gisler et *al.*, 2010 ; Prasuhn et *al.*, 2013). Il est à l'instant en phase de révision scientifique au CDE (Bircher, in prep.). Il repose sur l'équation universelle de perte de sol révisée « Revised Universal Soil Loss Equation » RUSLE (Wischmeier & Smith, 1965, 1978 ; Renard et *al.*, 1997).

Les facteurs les plus importants pour la quantification de la perte de terre en [t/ha*a] prennent en compte des propriétés topographiques telles que la longueur de la pente et son inclinaison (LS = Length & Slope). Ces deux facteurs sont dérivés du modèle numérique de terrain d'une précision de 2 m. Les autres facteurs considérés sont : le sol avec le facteur K, l'érosivité des pluies avec le facteur R, la couverture du sol et le travail du sol avec le facteur C ainsi que les mesures de protection des sols (par exemple les cultures en terrasse) avec le facteur P.

Les données des précipitations de CombiPrecip¹ de MétéoSuisse sont déterminées chaque heure par une estimation géostatistique des précipitations sur la base d'un réseau de stations de mesures climatiques (> 100 stations de SwissMetNet) et des données radars (3 stations avec la bande C radar). Ces données sont considérées comme le produit le plus fiable pour l'estimation de la quantification des précipitations à une échelle locale. La résolution spatiale de ces géodonnées est de 1x1 km. Les données ont été transmises toutes les heures via SSH (Secure Shell) et rsync (remote synchronization ou synchronisation à distance) au serveur du système d'alarme ERMS du CDE pour le traitement et l'analyse en continu. Des données pluviométriques radar d'une résolution temporelle supérieure (5 min) n'ont pas été prises en considération en raison de sources connues d'erreurs et de l'intégration manquant des stations de mesures.

Les images ci-dessous (Figure 8) montrent dans la partie du bas de l'image que les données CombiPrecip et les données radars sont représentées de manière identique en ce qui concerne les zones avec de forts événements pluvieux, alors que sur les images du haut, le résultat dans le centre du fort événement pluvieux est légèrement lissé à cause de l'interpolation des données des stations météo (Sideris, 2014).

¹<http://www.meteosuisse.admin.ch/home/service-et-publications/produits.subpage.html/fr/data/products/2014/donnees-spatiales-combiprecip.html>

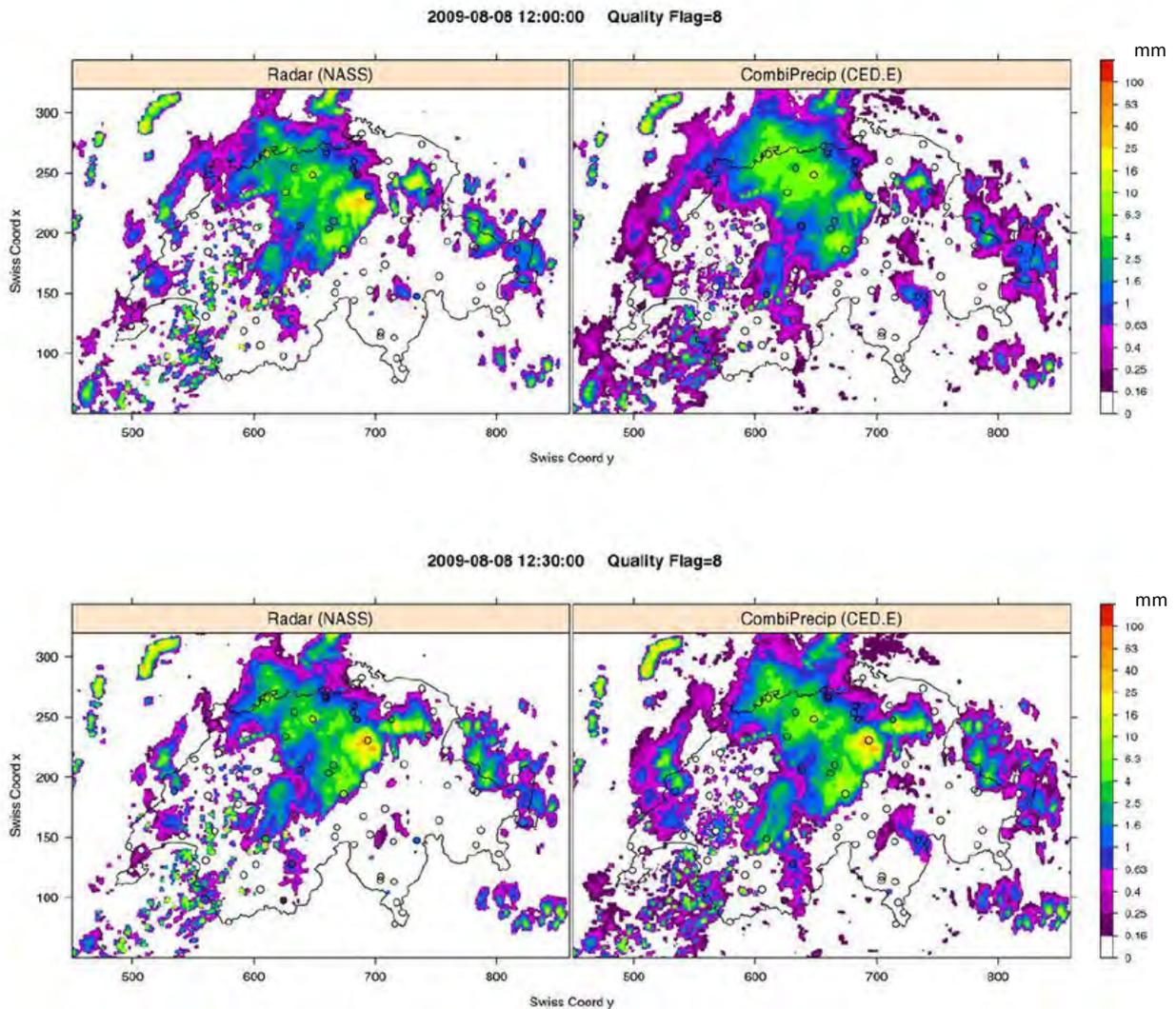


Figure 8 : Données radar C-band et cellules avec de fortes pluies sur le réseau SwissMetNet (> 100 Stations) t1 (haut) et t2 (bas) (+30 min.)

Mises à part quelques interruptions dans la livraison des données CombiPrecip, la disponibilité de ces dernières durant la durée du projet (avril 2015 à décembre 2016) était très bonne et fiable. Contrairement aux données radar, les données CombiPrecip interpolées sont fortement lissées de manière à ce que la valeur la plus haute des cellules de tempête présente des valeurs plus basses qu'en réalité. En outre, les données CombiPrecip calculées chaque heure sont des valeurs moyennes d'intervalle d'une heure, moyennant quoi la résolution spatiale comparée avec l'intervalle apparaît fortement diminuée. Cela n'a toutefois pas d'impact direct sur l'effet érosif d'une précipitation. L'effet dépend plutôt de la durée et non de la valeur maximale de l'intensité de la pluie.

2.2.2. Configuration du système d'alarme et automatisation de l'analyse

Le système d'alarme ERMS se base sur un serveur Ubuntu LTS (Long Term Support) avec un environnement de traitement qui se compose du logiciel Open-Source GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), de R-statistic et de Python. Les données des événements pluvieux, protégées par un mot de passe, sont mises à disposition des partenaires du projet grâce à un serveur web Apache.

2.2.3. Déclenchement d'une alerte

Dès que dans le périmètre d'étude le seuil défini de 10 mm/h est atteint, commence un « fort événement pluvieux ». Tous les partenaires du projet sont alors informés via email ou SMS avec le lien vers le fichier de l'événement considéré sur le serveur ERMS. Les géodonnées en temps réel permettent de visualiser l'événement sur un système d'information géographique (SIG) tel que QGIS, ArcGIS ou encore Google Earth. Ces données permettent l'analyse de la quantité et de l'intensité des précipitations. Le cas échéant en fonction de la saison des périodes de semis et des résultats analysés, il est décidé si une observation de terrain est nécessaire ou non (Figure 10).

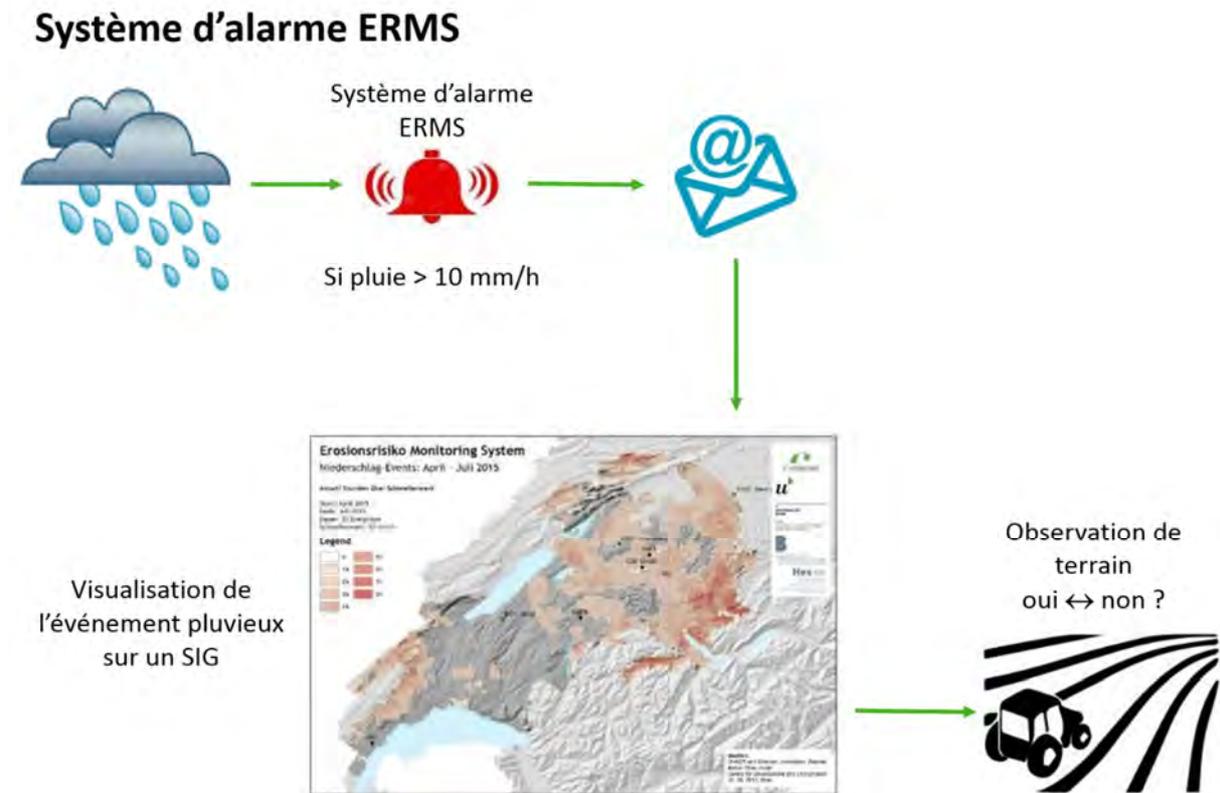


Figure 10 : Fonctionnement de l'alerte du système d'alarme ERMS

Toutes les données étaient disponibles durant la durée du projet sur le serveur ERMS. Les données des événements pluvieux sont déposées sous différents formats (TIF et KML) ainsi que les éléments de base pour leur réutilisation. Les géodonnées mises à disposition ne s'appuient que sur l'analyse et le traitement des données CombiPrecip mais ne considèrent pas de données en lien avec la saturation du sol en eau.

2.3. Résultats et discussion du système d'alarme ERMS

2.3.1. Analyse des précipitations

Durant le printemps 2015, il n'y a eu que peu d'événements érosifs sur des sols sans couvert végétal. Les événements du 26 et 27 avril et du 4 mai sont à souligner. Du 5 au 16 juin, il y a eu une période de pluie plus longue. Ces fortes précipitations ont provoqué des dégâts d'érosion des sols. L'automne 2015, exceptionnellement sec, a tout de même conduit à de forts événements pluvieux qui ont occasionné des dégâts mesurables. Malheureusement ces dégâts d'érosion n'ont pas pu être documentés systématiquement par le CDE pour cause de manque de ressources.

La deuxième année du projet (2016) était une année idéale par rapport aux précipitations avec beaucoup de fortes pluies ainsi que de longues périodes humides donnant lieu à de gros dégâts dans les cultures.

Dans l'ensemble, 88 forts événements pluvieux ont été analysés durant la période du projet 2015-2016 (Annexe 1).

La répartition spatiale des cellules de fortes pluies durant les périodes de mesure du projet (Figure 11) ne correspond que grossièrement à la moyenne sur plusieurs années de la quantité des précipitations dans le périmètre d'étude. Cette répartition correspond plus généralement à la topographie et à l'exposition (crêtes du Jura et bord des Préalpes). Les zones avec les fortes pluies en 2015/2016 ont une meilleure corrélation avec les zones de l'étude sur les précipitations extrêmes par région de durée variable pour la période de retour entre 1981 et 1993 (Grebner et *al.*, 1999 : Tafel 2.5 Hydrologischer Atlas der Schweiz) (Figure 12). Les parts importantes de fortes pluies pour la région de Thun et dans les Alpes fribourgeoises représentent un événement inhabituel à noter.

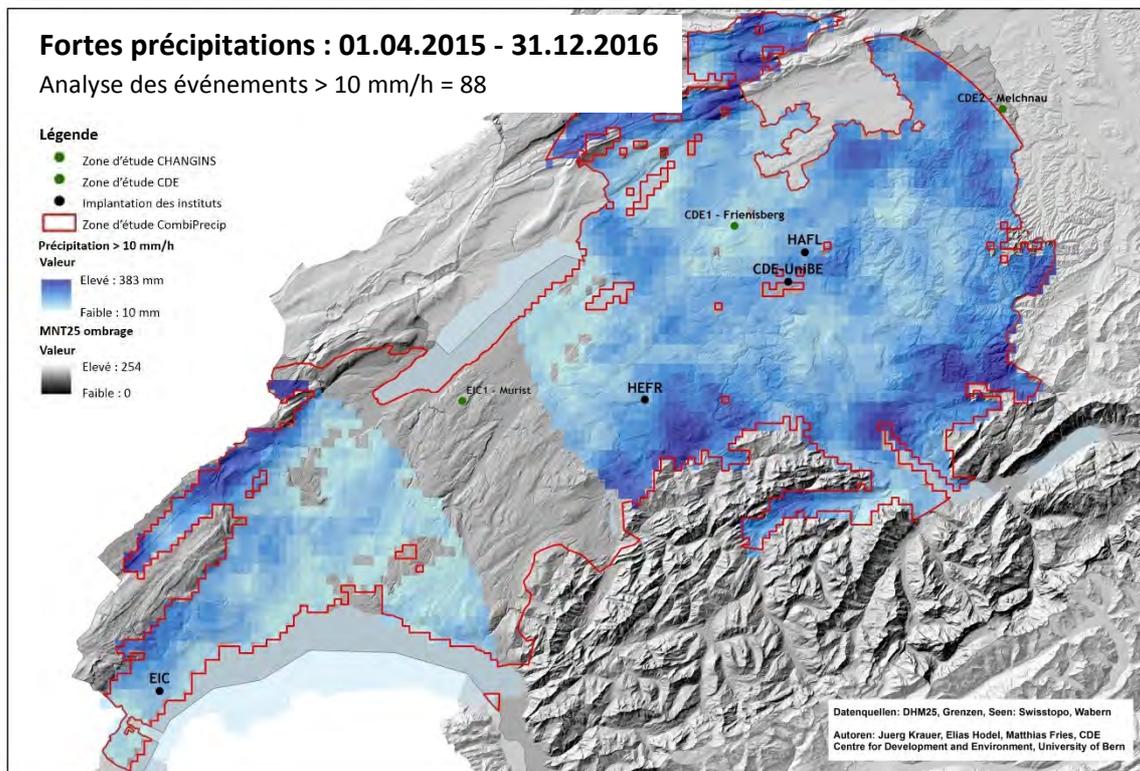


Figure 11 : Répartition et durée des 88 forts événements pluvieux durant la période du projet 2015-2016.

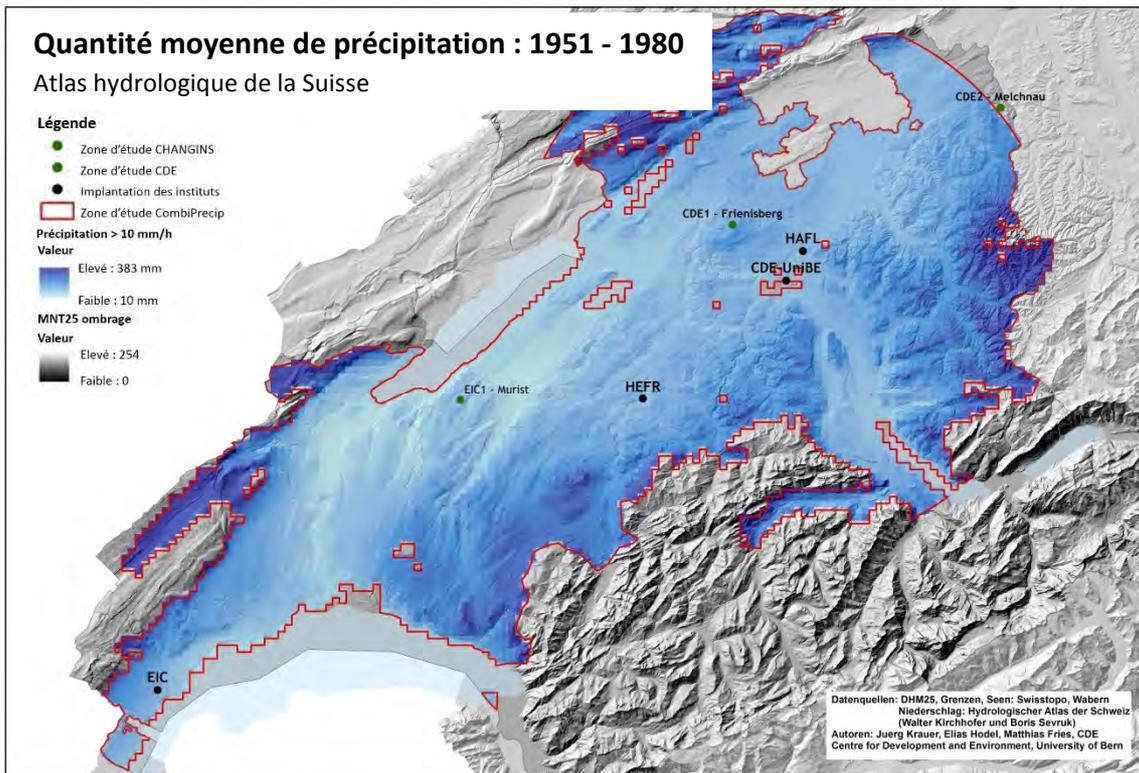


Figure 12 : Quantité moyenne des précipitations dans le périmètre d'étude entre 1951 et 1980 (source Atlas hydrologique de la Suisse).

2.3.2. Pertinence et comparaison du système d'alarme ERMS

Dans cette partie du projet Air-osion, les partenaires de la HEIA-FR testent la pertinence du système d'alarme ERMS.

Lorsque le système d'alarme ERMS émet une alerte dans la zone d'étude de la HEIA-FR, les partenaires se rendent sur leurs sites (§ 1.4.2) pour observer si l'érosion est effective ou non.

La procédure qui est suivie est présentée à la Figure 13.

1. Comparaison entre les alertes du système d'alarme ERMS et les dates de visite de terrain ;
2. Comparaison entre les alertes du système d'alarme ERMS et les données des stations météorologiques Agrometeo proches de la zone d'étude ;
3. Comparaison entre les données des stations météorologiques Agrometeo proches de la zone d'étude et les dates de visite de terrain.

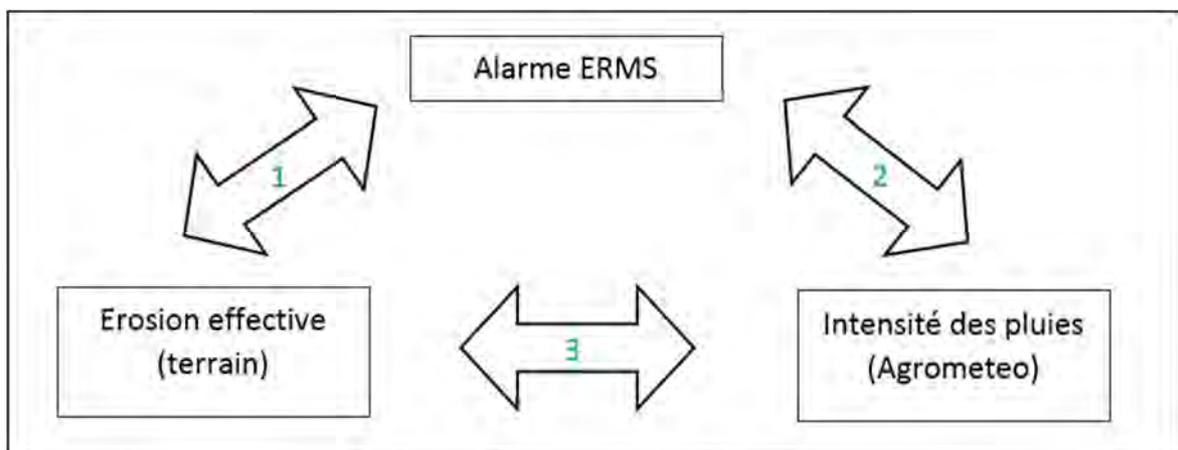


Figure 13 : Procédure suivie pour tester le système d'alarme ERMS

1. Comparaison entre les alertes du système d'alarme ERMS et les dates de visite de terrain

Dans un premier temps, une comparaison entre les alertes du système d'alarme ERMS et les dates de visite de terrain est réalisée (Annexe 2).

Aucune corrélation systématique entre une alerte ciblée sur un site et un phénomène érosif n'est constatée.

- Alerte du 11.05.2016 sur le site HEIA-FR n° 1 = pas d'érosion ;
- Terrain le 06.06.2016 sur le site HEIA-FR n° 4 = avec érosion alors que les alertes des 28.05.2016, 03.06.2016 et 04.06.2016 ne signalaient pas de pluies de forte intensité sur ce site ;
- Sur le site HEIA-FR n° 5 les 26.05.2016, 06.06.2016, 20.06.2016, 31.10.2016 et 08.11.2016 = traces d'érosion sans que le système d'alarme n'émette d'alertes pour cette zone.

Le fait qu'aucune relation concrète ne soit observée entre le système d'alarme ERMS et les visites de terrain peut s'expliquer. En effet, le nombre de visites de terrain était faible et pas suffisamment systématique. De plus, dans la première phase de surveillance des sites, le but était principalement la recherche de phénomènes érosifs afin d'appeler le drone pour compléter l'échantillonnage.

La décision prise d'analyser ce nouvel aspect du projet date d'octobre 2016 (adéquations alarmes ERMS et événements érosifs). Le temps dédié pour cela était trop faible pour obtenir des résultats exploitables statistiquement.

Dans le cas où cet aspect était développé ultérieurement dans un autre projet, la méthodologie suivante devrait être appliquée :

- Définir des points clairement localisés, présentant des risques érosifs variés ;
- Suivre régulièrement ces points (en fonction des alarmes ERMS ou sans alarmes ERMS) afin de ne pas manquer un phénomène érosif et dans le but de pouvoir l'attribuer à la bonne date. Le suivi devrait se faire par exemple après chaque pluie importante.

2. Comparaison entre les alertes du système d'alarme ERMS et les données des stations météorologiques d'Agrometeo proches de la zone d'étude

Devant ce résultat peu satisfaisant, une autre voie est testée par rapport à l'opportunité d'utiliser le système alarme ERMS. Il s'agit, dans ce deuxième temps, de comparer les données du système d'alarme avec les données quotidiennes Agrometeo (www.agrometeo.ch) pour des stations de mesure situées dans la zone des sites de la HEIA-FR. En effet, Agrometeo fournit des données concernant l'intensité maximale quotidienne des précipitations par station de mesure en mm/h. Cette valeur est calculée d'après la mesure la plus élevée de la journée (144 mesures par jour, soit toutes les 10 minutes), rapportée à l'heure et exprimée en mm/h (source : www.agrometeo.ch).

Les stations météo qui concernent la zone d'étude de la HEIA-FR se situent à Delley, Praz et Düdingen. Les risques érosifs en fonction de la carte ERK2 varient pour chacun des sites (Tableau 2).

Sites HEIA-FR	Site HEIA-Fr n° 1	Risque élevé
	Site HEIA-FR n° 2	Risque avéré
	Site HEIA-FR n° 3a	Pas de risque
	Site HEIA-FR n° 3b	Risque avéré
	Site HEIA-FR n° 4	Risque élevé
	Site HEIA-FR n° 5	Pas de risque
	Site HEIA-FR n° 6	Panaché
Stations Agrometeo	Düdingen	Pas de risque
	Praz	Risque élevé
	Delley	Risque avéré

Tableau 2 : Risque érosif des sites étudiés, selon les cartes ERK2

Pour commencer, toutes les alertes ERMS d'avril à décembre 2016 ainsi que tous les jours où les intensités de pluie, fournies par Agrometeo, étaient supérieures à 10 mm/h pour au-moins l'une des stations de mesure sont identifiés (Annexe 3).

Il est observé qu'une alerte ERMS ne correspond pas toujours à une intensité forte de pluie sur les sites de la HEIA-FR. En effet, le masque utilisé pour la procédure d'alerte couvre les cantons de Vaud, Fribourg et Berne. Pour la suite de la discussion, seules sont analysées les alertes qui concernent la région fribourgeoise.

Il y a eu au total 30 jours avec des pluies d'intensités supérieures au seuil de 10 mm/h sur au moins l'un des sites de la HEIA-FR, le système d'alarme ERMS a émis 24 alertes soit un taux de détection de 80 %.

Ce taux passe à 93 % de détection concernant l'ensemble des événements pluvieux d'intensité > 20 mm/h : sur 15 occurrences, seul l'événement du 10.06.2016 à Delley n'est pas corrélé avec une alarme.

Une analyse de la localisation de l'ensemble des forts événements pluvieux fournie par le système d'alarme ERMS est réalisée. Les rasters obtenus permettent de localiser des pluies intenses détectées par le système d'alarme.

Pour chacune des 24 occurrences où une concordance est observée entre une alerte ERMS et des intensités de pluie supérieures à 10 mm/h mesurées par l'une des stations Agrometeo, il a été vérifié que la localisation des événements pluvieux correspond bien avec l'emplacement des stations de mesure Agrometeo (Tableau 3).

Date	Intensité précipitations en mm/h			Observations carte fournie par ERMS		
	Delley	Dudinggen	Praz	Delley	Dudinggen	Praz
16.04.2016	12.0	10.8	7.2	0	0	0
22.04.2016	6.0	49.2	27.6	0	0	0
27.05.2016	2.4	13.2	3.6	0	0	0
28.05.2016	6.0	30.0	4.8	0	1	0
04.06.2016	2.4	6.0	20.4	0	0	0
08.06.2016	20.4	15.6	24.0	0	0	0
11.06.2016	8.4	10.8	10.8	0	0	0
18.06.2016	2.4	12.0	2.4	0	0	0
19.06.2016	4.8	44.4	9.6	0	0	0
24.06.2016	1.2	31.2	10.8	1	1	0
25.06.2016	27.6	48.0	9.6	0	1	0
29.06.2016	46.8	30.0	30.0	0	0	0
11.07.2016	15.6	21.6	52.8	1	1	0
12.07.2016	6.0	18.0	18.0	0	0	0
14.07.2016	12.0	20.4	6.0	0	0	1
22.07.2016	50.4	2.4	27.6	0	0	0
23.07.2016	4.8	18.0	27.6	0	0	0
31.07.2016	15.6	21.6	49.2	0	0	0
04.08.2016	8.4	21.6	26.4	0	0	0
16.08.2016	0.0	46.8	8.4	0	1	0
18.08.2016	7.2	72.0	6.0	0	1	0
16.09.2016	4.8	14.4	27.6	0	0	0
25.10.2016	32.4	?	31.2	0	0	0
05.11.2016	13.2	?	14.4	0	0	0

Tableau 3 : Jours avec corrélation alerte ERMS et intensité pluie > 10 mm/h (en bleu) sur au-moins une station relevée par Agrometeo. Observations : 1 = localisation de l'événement pluvieux au-dessus de la station de mesure ; 0 = pas localisation de l'événement pluvieux au-dessus de la station de mesure

Pour la station de Delley, 10 jours avec des pluies d'une intensité supérieure à 10 mm/h sont observés. Or, seules 2 cartes fournies par le système ERMS localisent la station, dont une (24.06.2016, 17h) pour un jour où les données Agrometeo fournissent une intensité maximale de 1.2 mm/h. Pour cette station la détection des pluies intenses est de seulement 10 %.

Pour la station de Düdingen, 6 événements pluvieux du système d'alarme sont localisés au-dessus de la station alors que 20 jours de pluies d'intensité supérieure au seuil sont identifiés dans les données de la station météo, soit une détection effective de 30 %.

Pour Praz enfin, une seule localisation d'un événement pluvieux est observée pour cette station (14.07.2016). Or, ce jour-là, les valeurs mesurées par la station donnent une intensité de pluie de 6.0 mm/h seulement. Pour des journées avec des intensités particulièrement élevées (proches ou supérieures à 50 mm/h comme le 11.07.2016 et le 31.07.2016 à 13h, Tableau 3), les fichiers fournis par le système ERMS ne localisent pas directement le site de Praz. Il conviendrait dès lors peut-être de définir une zone proche, autour du raster fourni, pouvant être considérée comme potentiellement sujette elle-aussi à des pluies intenses.

Si le seuil de 20 mm/h est considéré pour les trois stations de mesure météo, le système d'alarme ERMS ne localise l'une des stations que dans 3 cas sur 22, soit un taux de cooccurrence de seulement 16 %.

Sachant que les cartes fournies par le système ERMS sont corrélées à la carte du risque d'érosion ERK2, il convient de se pencher sur le Tableau 2 pour constater que la station de Dündingen se situe en zone sans risque érosif, celle de Delley en zone de risque avéré tandis que celle de Praz se situe en zone de risque érosif élevé.

Or c'est avec la station de Praz que la corrélation « intensité de pluie mesurée et localisation de l'événement pluvieux par le système d'alarme » est la plus mauvaise. Aucun des jours où la pluie est mesurée au-dessus de 10 mm/h par la station Agrometeo, le raster ne montre de cellules au-dessus de la station. La seule fois où le système positionne un nuage sur la zone (14.07.16) est un jour où l'intensité maximale mesurée était seulement de 6.0 mm/h.

Le constat suivant peut être fait : à large échelle (région), les alertes ERMS permettent de détecter 80 % des jours avec des pluies d'intensités supérieures à 10 mm/h. Par contre, à une échelle fine (station), les données fournies par le système ERMS ne correspondent pas aux valeurs mesurées sur le terrain par les stations du réseau Agrometeo, même en zone de risque érosif élevé. Cela s'explique certainement par la résolution d'1x1 km² des données CombiPrecip.

3. Comparaison entre les données des stations météorologiques d'Agrometeo proches de la zone d'étude et les dates de visite de terrain

Il s'agit ici pour ce dernier point d'établir un lien entre les données d'intensité de pluie fournies par les stations Agrometeo et les observations réalisées sur le terrain lors des visites.

L'analyse des données des stations météo des 10 jours qui ont précédé les observations de terrain permet d'identifier les intensités des pluies pour chacune d'elle durant ces jours (Annexe 4).

Sur 6 périodes de 10 jours précédant autant de visites de terrain, les observations de phénomènes érosifs avec formation de rigoles (27.04.2016, 06.06.2016, 20.06.2016, 31.10.2016, 08.11.2016) sont précédées de 3 à 4 jours où des pluies d'intensité supérieure à 10 mm/h ont été enregistrées sur au-moins l'une des stations de mesures météorologiques. Le seuil de 20 mm/h, limite initialement prévue pour le lancement des alertes ERMS, est dépassé pour au-moins l'une des stations dans 4 cas sur les 5 mentionnés ci-avant, soit dans 80 % des cas.

La visite du 8.11.2016 fait exception puisqu'elle ne compte qu'une journée de pluies d'intensité supérieure à 10 mm/h dans les 10 jours qui l'ont précédée et aucune à plus de 20 mm/h. Les raisons des phénomènes érosifs remarqués ici sont à chercher parmi les facteurs édaphiques (engorgement des sols) et climatiques (températures, il neigeait en effet le 8.11.2016).

La visite du 26.05.2016, quant à elle, n'est précédée d'aucun jour de pluie intense. Or c'est celle qui a révélé le moins de traces d'érosion.

Malgré un échantillonnage faible, il existe un lien entre des pluies de très forte intensité (> 20 mm/h) dans la région et le développement de phénomènes érosifs dans 80 % des cas documentés.

Synthèse de l'analyse comparative

Comme le montre la Figure 14, les alertes ERMS détectent 80 % des journées où l'intensité des pluies a dépassé 10 mm/h dans au-moins l'une des stations de mesure Agrometeo. Ce taux passe même à 93 % concernant les journées où l'intensité maximale quotidienne des précipitations a dépassé 20 mm/h.

Selon les observations de terrain, 80 % des phénomènes érosifs, toutes formes confondues, sont précédés d'au-moins 3 jours de pluies d'intensité maximale supérieure à 10 mm/h dans au-moins une des stations de la zone. Sur ces trois jours, au-moins l'une d'entre elles a vu tomber des pluies d'intensité supérieure à 20 mm/h.

Le lien établi entre d'une part les observations de terrain et les données fournies par les stations Agrometeo et d'autre part entre lesdites données et les alertes ERMS permet de déduire que, dans 80 % des cas où l'alerte ERMS concerne la région d'étude, des phénomènes érosifs ont de grandes chances d'être observés sur l'un ou l'autre des sites d'étude de la HEIA-FR.

Par contre, la localisation des événements pluvieux ne montre pas clairement de corrélation avec les mesures effectuées sur le terrain dans des stations fixes, même dans le cas où celles-ci se situent en zone de risque érosif élevé (cas de Praz). Il conviendrait de se pencher sur la question pour comprendre la source de ce problème au niveau local.

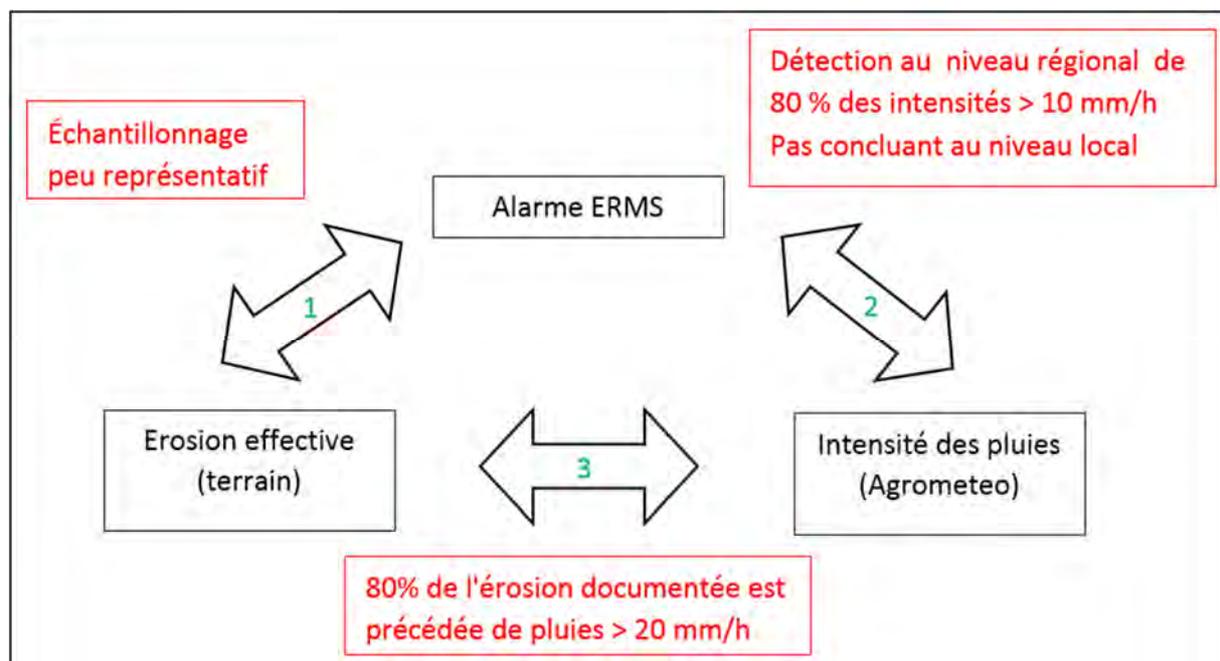


Figure 14 : Nature des liens dans la procédure de validation du système d'alarme ERMS

Dans ce même ordre d'idée de problème au niveau local, un complément d'analyse est effectué. Tous les rasters de localisation d'événement pluvieux fournis par le système d'alarme entre le 16.04.2016 et le 05.11.2016 sont superposés. Aucune pluie d'une intensité supérieure à 10 mm/h n'est observée sur la région d'Avenches et celle du Vully pendant toute cette période (blindzones). Ceci est tout de même étonnant, bien que la région d'Avenches soit située majoritairement en zone d'absence de risque érosif, celle du Vully ne l'est pas selon la carte ERK2. Les mesures de la station de Praz prouvent que des pluies d'intensité supérieures au seuil de 10 mm/h se sont bel et bien déversées.

Il conviendrait de documenter ces absences d'information et de remonter aux fichiers sources afin de définir si une éventuelle anomalie ne s'est pas glissée dans le processus de traitement des données.

3. Observations et mesures sur le terrain

Les observations de terrain sur les sites présentant des dommages visibles liés à l'érosion commencent seulement après avoir reçu l'accord de l'exploitant ou du propriétaire d'aller dans son champ.

Pour chaque site, les mesures suivantes sont réalisées :

- Mesures manuelles et observation de l'érosion ;
- Mesures depuis les airs grâce aux drones.

Pour certains sites, des observations complémentaires liées à l'environnement parcellaire sont effectuées. Il s'agit ici du travail de Master de Laura Ebnetter qui est développé aux points 3.1.2 et 3.1.3.

La Figure 15 montre les différentes étapes du projet Air-losion sur le terrain et après.

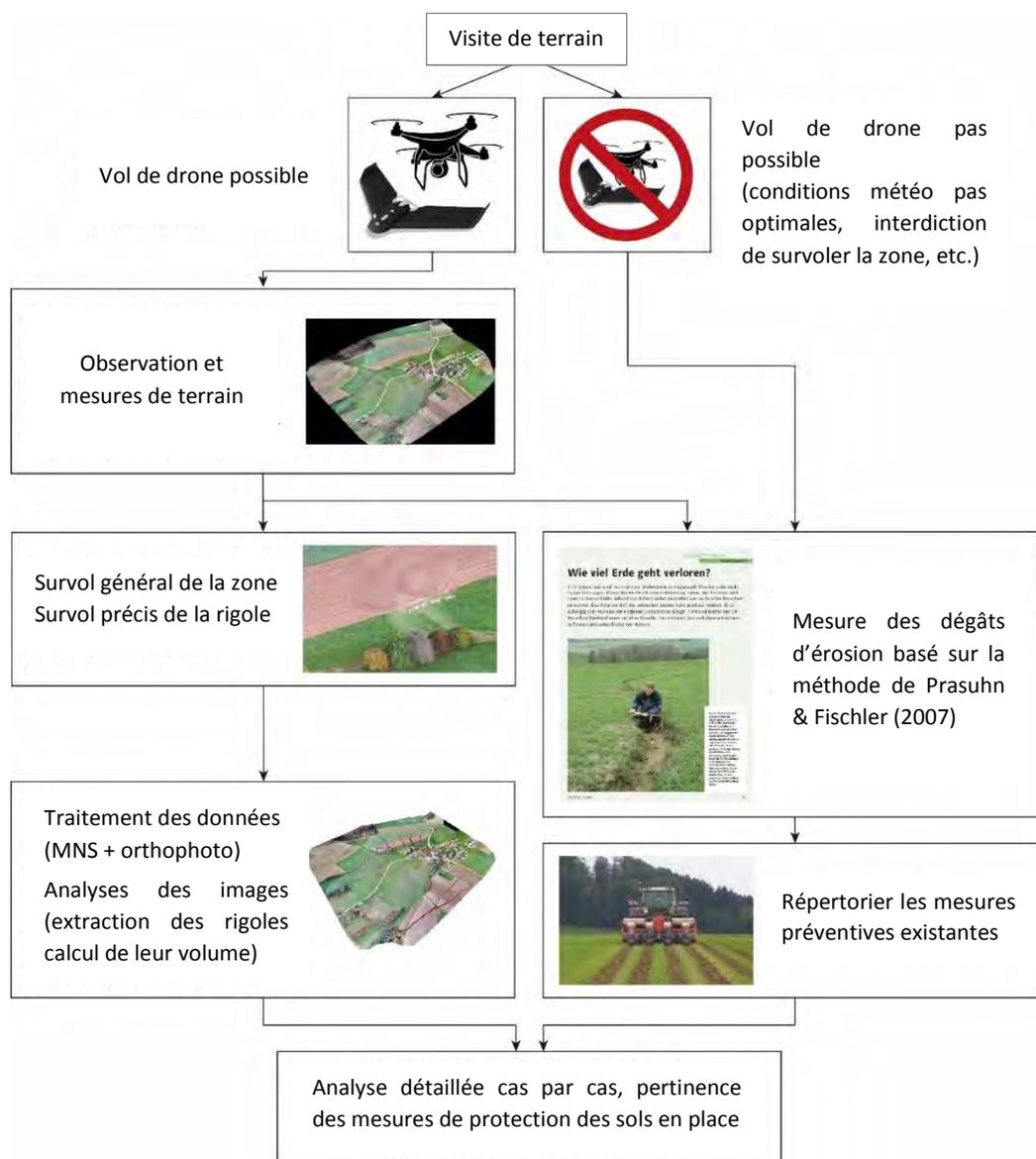


Figure 15: Déroulement sur le terrain et après

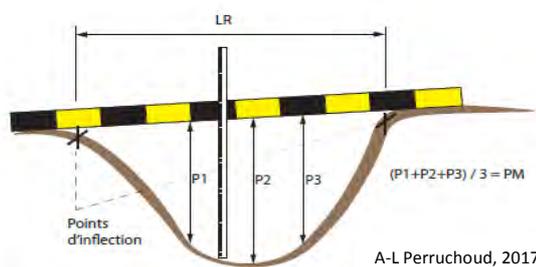
3.1. Matériels et méthodes de mesures manuelles et observation de l'érosion

3.1.1. Mesure manuelle d'une rigole d'érosion

Les mesures de l'érosion se font en mesurant sur la longueur de la rigole des sections transversales à intervalle régulier (de 1 m à 4 m en fonction de la longueur de la rigole). Sur ces sections transversales, la largeur de la rigole (LR) au point d'inflexion et sa profondeur en trois points (P1, P2, P3) sont mesurés (Figure 16a).

Le matériel nécessaire est :

- Chevillière pour mesurer la longueur de la rigole à intervalle régulier ;
- Double mètre pour mesurer la profondeur ;
- Règle graduée rigide pour mesurer la largeur de la rigole (Figure 16b).



a) Détail pour la mesure de la rigole d'érosion

b) Mesure d'une large rigole d'érosion

Figure 16: Méthode de mesure d'une rigole d'érosion au champ

Ensuite, pour calculer le volume d'une section, la méthode de Prasuhn et Fischler (2007) quelque peu modifiée est utilisée. En effet, calculer de manière précise la largeur du fond d'une rigole d'érosion s'avère un exercice souvent difficile à réaliser sur le terrain. C'est pourquoi nous avons mesuré uniquement la largeur du sommet de la rigole. En fonction de la forme (rectangulaire ↔ triangulaire), les formules suivantes sont utilisées pour en calculer le volume :

Rigole avec un profil rectangulaire :

Volume = largeur rigole * profondeur moyenne rigole * longueur section

Rigole avec un profil triangulaire :

Volume = (largeur rigole * profondeur moyenne rigole/2) * longueur section

Enfin pour calculer le volume total de la rigole il faut additionner l'ensemble des volumes des sections.

3.1.2. Observation de l'environnement parcellaire (questionnaire WOCAT)

Sur la base du questionnaire WOCAT (World Overview of Conservation Approaches and Technologies), un protocole d'observation des dégâts d'érosion est élaboré dans le cadre du travail de Master de Laura Ebnetter (CDE) (Ebnetter, 2017). Ce protocole est défini en collaboration avec Stéphane Burgos (HAFL) et Hanspeter Liniger (CDE) (Annexe 5). Ce dernier est construit en cascade en fonction des blocs de parcelles. Grâce à cette méthode, il est garanti qu'un phénomène érosif est décrit dans son ensemble. De plus, il permet d'identifier les mesures préventives et de juger de leur efficacité. Chaque élément de la cascade est décrit par une multitude de paramètres et cartographié. Ce protocole de terrain est utilisé au plus proche de l'événement pluvieux ayant occasionné un dommage érosif. Il est rempli avec des experts sur le terrain et complété par les exploitants lors des interviews. Ces interviews permettent de mieux comprendre la situation générale, la provenance de l'eau, la rotation des cultures etc.

A titre informatif, WOCAT est un réseau global d'expert de l'utilisation des terres (www.wocat.net). L'un des buts de ce réseau est la documentation du savoir concernant l'utilisation durable des terres. Dans cette optique, WOCAT a développé trois questionnaires différents : SLM (Sustainable Land Management) Technologies, SLM Approaches et SLM Mapping. Dans le cadre du projet Air-osion, le questionnaire WOCAT SLM Technologies est utilisé et discuté avec les exploitants concernant l'utilisation des terres.

Comme indiqué précédemment, pour certaines zones d'études dans le cadre du projet Air-osion, la procédure de mesure sur le terrain est élargie afin de permettre un comparatif des relevés de terrain dans les alentours proches de la zone érodée (précipitations comparables, utilisation du sol et conditions biophysiques proches). Le but de cette partie du projet est de comprendre les liens entre les différents facteurs érosifs et établir des schémas explicatifs au sein d'une zone d'étude avec de fortes précipitations. Un comparatif est effectué dans des cas où il y a eu de l'érosion et dans des cas où elle est faible ou inexistante. Pour finir, il s'agit de proposer des mesures qui permettent de limiter des dommages supplémentaires. Il est important de souligner que dans les deux cas (avec ↔ sans érosion), les zones comparées sont considérées comme à risque élevé sur la carte ERK2.

3.1.3. Résultats de l'observation de l'environnement parcellaire (WOCAT)

Cette partie du rapport contient deux des quatre études de cas documentées dans le travail de Master de Laura Ebnetter (Ebnetter, 2017). Elles illustrent la démarche et les recommandations. Ces deux études de cas sont élaborées de manière à comparer d'une part un cas d'érosion et d'autre part un cas sans érosion dans des conditions d'événement pluvieux identiques. Ces études permettent une comparaison directe et la recherche des causes possibles de l'érosion grâce aux différents outils/méthodes utilisées dans le cadre du projet Air-osion (protocole d'observation, méthode de mesure du volume d'érosion, croquis, images prises par le drone, géodonnées de base (ERK2, CombiPrecip)).

Sur les cartes des risques présentées ci-dessous (Figure 17 à 21), les valeurs modélisées sont plus élevées d'un facteur 10 car le travail et la gestion du sol (facteur C) ne sont pas intégrés au modèle de calcul.

Pour la suite de la lecture du rapport, il faut noter que pour chacun des deux cas d'étude (Figure 17 et Figure 18 pour le cas d'étude n° 1; Figure 19 et Figure 20 pour le cas d'étude n° 2), la première illustration représente l'image aérienne, la deuxième la carte ERK2, la troisième les cultures en place, les formes d'érosion et les surfaces qui contribuent à l'écoulement de surface et la quatrième les flux d'eau qui ont été calculés sur la base du modèle de surface et où sont représentées, par des éléments linéaires, les directions d'écoulement déviées. Les Tableaux 4 à 7 complètent la représentation des facteurs biophysiques et documentent l'utilisation des sols. La partie supérieure des tableaux correspond à la zone avec de l'érosion et la partie inférieure à la zone sans érosion.

Cas d'étude n° 1

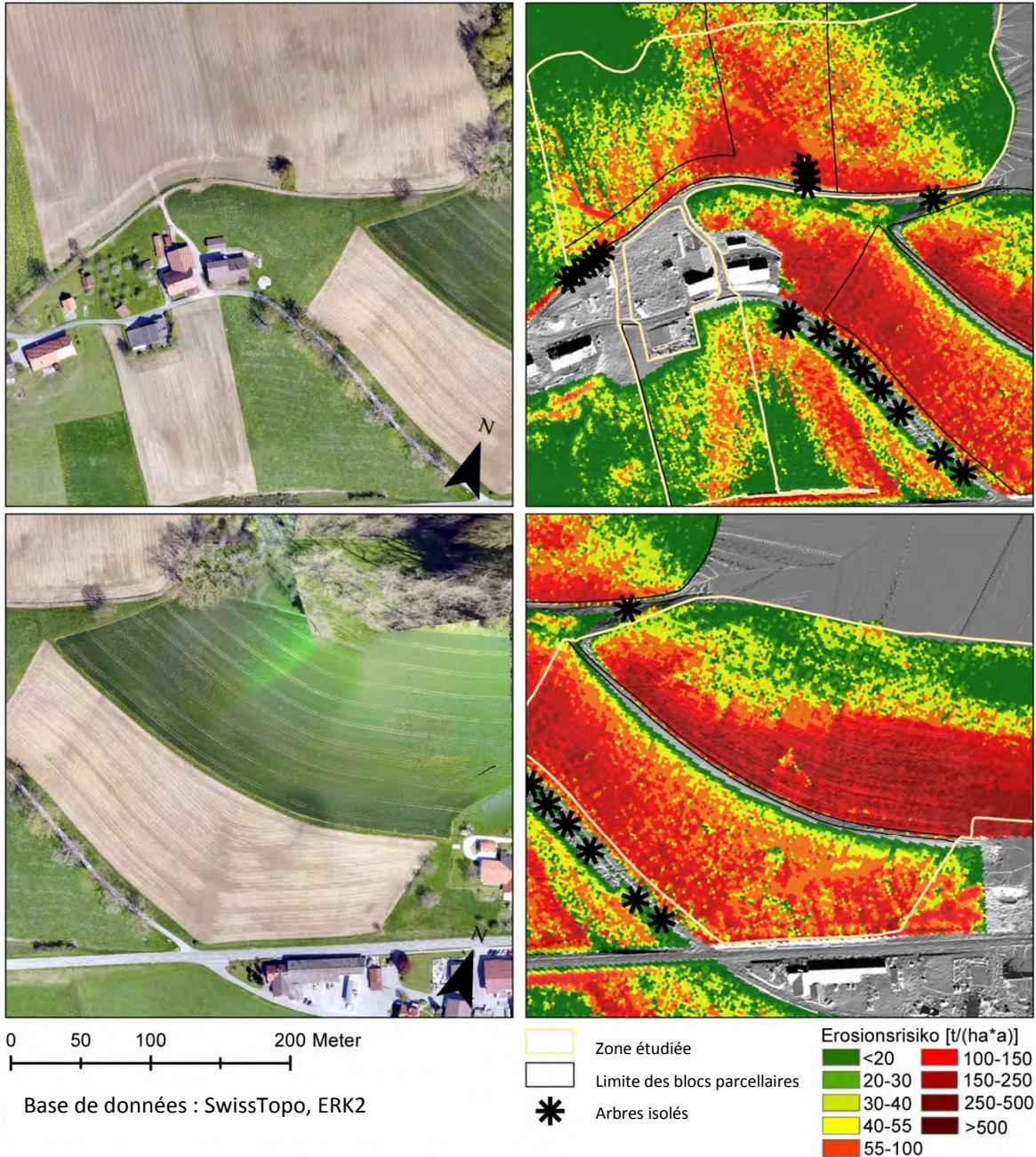


Figure 17 : Etude de cas 1 (Cas avec érosion en haut / cas sans érosion en bas : images du drone à gauche / carte ERK2 à droite)

	Culture	HN [%]	HF perpendiculaire	HF parallèle	SL [m]	BB [%]	BF [ha]	Mesure de l'érosion [t/ha]
ES	Pois protéagineux / Eiweisserbse	6	convexe	convexe	155	23	2.1	2-4
	Pomme de terre / Kartoffel	5	convexe	régulier	90	9	1.8	4-10
	Avoine / Hafer	9	convexe	concave	147	15	5.2	2-4
	Avoine / Hafer	5	convexe	régulier	160	19	6.5	4-10
VS	Blé d'hiver / Winterweizen	14	convexe	régulier	60	60		0
	Avoine / Hafer	14	régulier	concave	84	15	0.3/0.05	<2

Tableau 4 : Récapitulatif des principales caractéristiques de la zone d'étude ES = Site avec érosion, VS = site sans érosion, HN= déclivité, HF = forme de la pente, SL = longueur de la pente, BB = occupation du sol, BF = surface contribuant à l'écoulement de surface

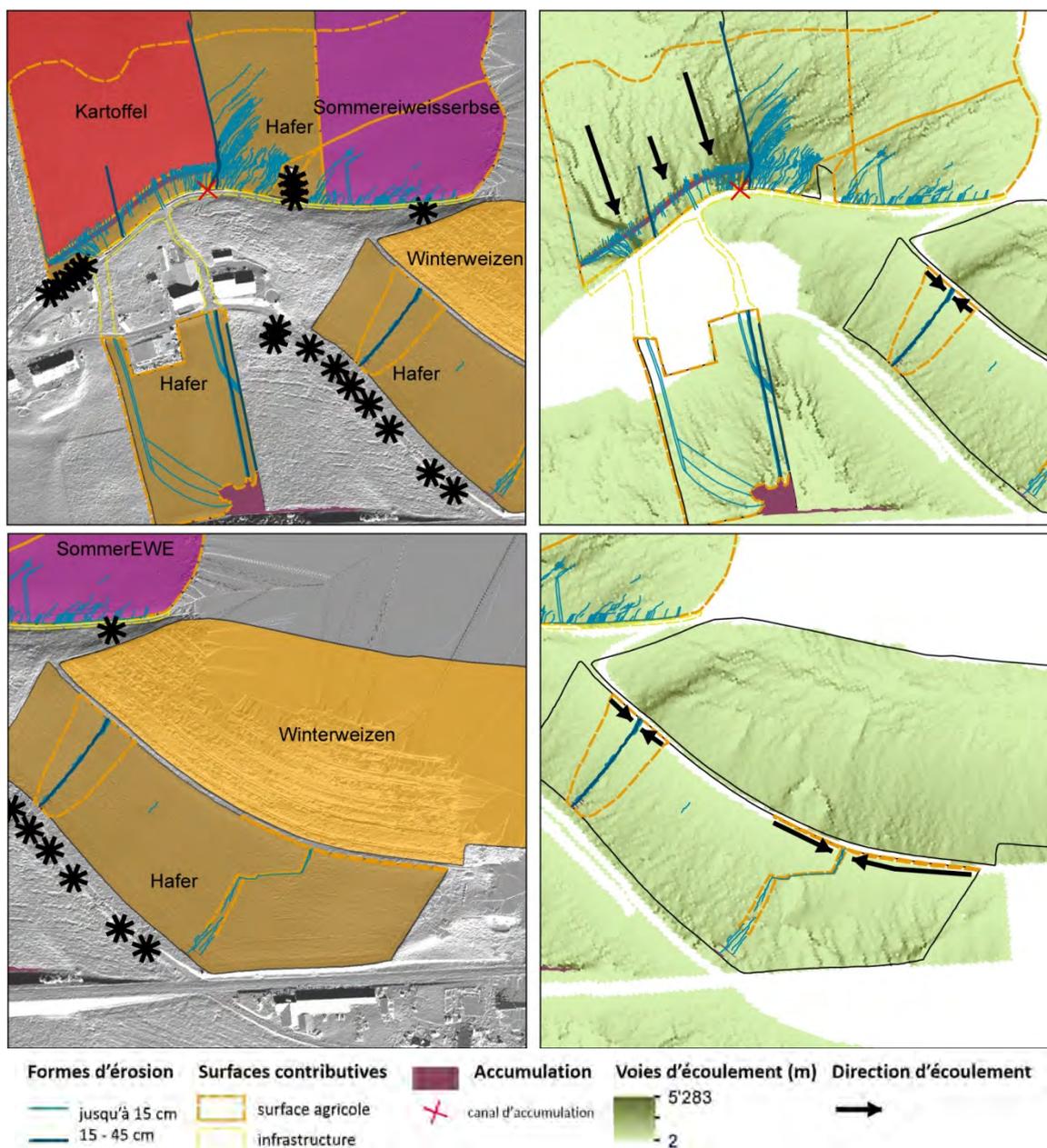


Figure 18 : Etude de cas 1 (Cas avec érosion en haut / cas sans érosion en bas : culture à gauche / carte des flux d'écoulement à droite)

	Culture	BF	Élément conducteur d'écoulement	FFF	Machine travaillant le sol	Remarques
ES	Pois protéagineux / Eiweisserbse	Contribution	Voie de passage, raie de charrue	1	Charrue, cover crop, chisel, rouleau	Chisel uniquement pour les pommes de terre
	Pomme de terre / Kartoffel	Contribution	Sillons	0.9		
	Avoine / Hafer	Contribution et dépôts	Talweg, voie de passage, sens du semi, raie de charrue	0.7		
	Avoine / Hafer	Contribution et dépôts	Raie de charrue	0.5		
VS	Blé d'hiver / Winterweizen	Infiltration		0.7	Charrue, décompacteur avec rouleau	Printemps 2016 pas de rouleau
	Avoine / Hafer	Contribution et dépôts	Raie de charrue, talweg	0.9		

Tableau 5 : Récapitulatif des principales caractéristiques de la zone d'étude. BF = surface contribuant à l'écoulement de surface, FFF = facteur de la rotation des cultures.

Brève description du cas d'étude n° 1 (Figure 17 et 18, Tableaux 4 et 5)

L'écoulement de surface provenant des pois et de l'avoine se canalise d'une part sur le chemin et se cumule avec l'écoulement en bas de pente de la parcelle d'avoine et de pommes de terre (Figure 18). Concrètement, l'écoulement de surface a suivi les sillons des pommes de terre en direction de la cour de la ferme et y a inondé la salle des machines.

La zone de comparaison sans érosion est située sur le même versant que la zone avec érosion. Le sous bassin versant de cette zone présente une déclivité de 14 %, supérieure à celle de la zone avec érosion qui est de 5 à 9 %, et donc semblerait plus menacée par l'érosion. La longueur du bloc parcellaire est plus courte (60 et 84 m) pour la zone sans érosion que pour la zone avec érosion (90 - 160 m) (Tableau 4).

Durant les quatre dernières années, les rotations de culture ne se différencient que très légèrement pour les deux zones. Le facteur de rotation de culture se situe entre 0.7 et 0.9 pour la zone sans érosion et entre 0.5 et 1 pour la zone avec érosion (Tableau 5). Les deux sites comparatifs se différencient principalement par l'utilisation des machines de travail du sol. Alors que les parcelles des zones sans érosion ont été travaillées à la charrue (ou à défaut avec un décompacteur) suivi d'un rouleau, les parcelles avec érosion ont été travaillées également à la charrue mais aussi au chisel et au cover crop. Il est à souligner que les parcelles sans érosion ont toujours été roulées, sauf lors de la préparation du semi au printemps 2016. L'exploitant veille toujours à ce qu'une parcelle du sous bassin versant soit couverte avec une culture pour éviter la formation de long tronçon d'écoulement. Cependant dans les deux cas, il y a eu de l'érosion, mais dans des proportions différentes.

En comparant les surfaces contribuant à l'érosion, nous constatons que sur la zone avec érosion ces dernières sont très élevées, car sur les 4 parcelles des cultures d'été ont été pratiquées (Tableau 5). Ces parcelles avec une couverture de sol manquante n'ont pas pu freiner les précipitations sur cette longue distance. La couverture du sol, dans la partie supérieure de la zone sans érosion, a, quant à elle, favorisé l'infiltration des précipitations et limité l'écoulement de surface. Ainsi, la parcelle avec le blé d'hiver n'a presque pas conduit à de l'écoulement de surface. Si la couverture du sol est évaluée conjointement à la part des surfaces contribuant à l'érosion (BB et BF dans le Tableau 5), il devient évident que les deux cas d'études présentent une couverture de sol manquante sur les surfaces contribuant à l'érosion. Les deux études montrent la présence d'éléments canalisant l'écoulement de l'eau (Tableau 5) comme des raies de charrue, des sillons de pommes de terre et des voies de passage. Grâce à la stratégie de cultiver de l'avoine sous la parcelle de pommes de terre pour la zone avec érosion, une partie de l'écoulement de surface est ralentie. Ainsi de la terre s'est déposée sur la partie supérieure de la parcelle d'avoine.

Le fait que la déclivité joue un rôle est bien visible dans la parcelle de pois protéagineux. Dès que la pente augmente vers le chemin, la proportion d'érosion augmente également et l'érosion de surface se transforme en rigole d'érosion. La comparaison avec la zone sans érosion montre cependant que la déclivité n'est pas un critère décisif par rapport à l'ampleur des dégâts.

Cas d'étude n° 2

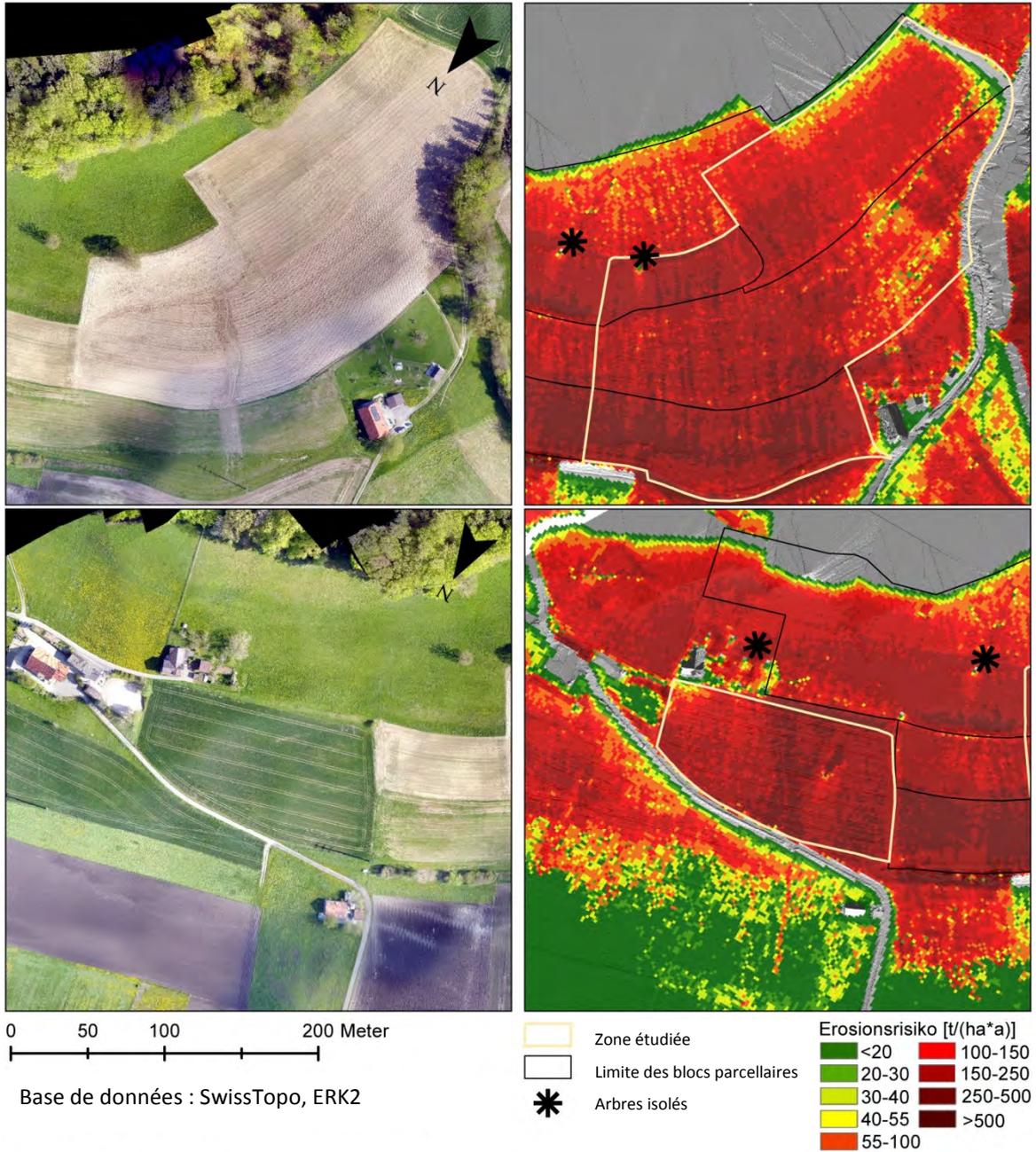


Figure 19 : Etude de cas 2 (Cas avec érosion en haut / cas sans érosion en bas : images du drone à gauche / carte ERK2 à droite)

	Culture	HN [%]	HF perpendiculaire	HF parallèle	SL [m]	BB [%]	BF [ha]	Mesure de l'érosion [t/ha]
ES	Avoine / Hafer	14	Convexe- concave	convexe	80	23	0.7/0.7	2-4
	Jachère / Schwarzbrache	18	régulier	convexe	25	18	0	0
	Pommes de terre / Kartoffel	18	régulier	concave	70	13	1.2/1.1	> 10
	Jachère florale / Buntbrache	18	régulier	régulier	65	78		0
VS	Blé d'hiver / Winterweizen	21	concave	concave	110	54		0

Tableau 6 : Récapitulatif des principales caractéristiques de la zone d'étude ES = Site avec érosion, VS = site sans érosion, HN= déclivité, HF = forme de la pente, SL = longueur de la pente, BB = occupation du sol, BF = surface contribuant à l'écoulement de surface

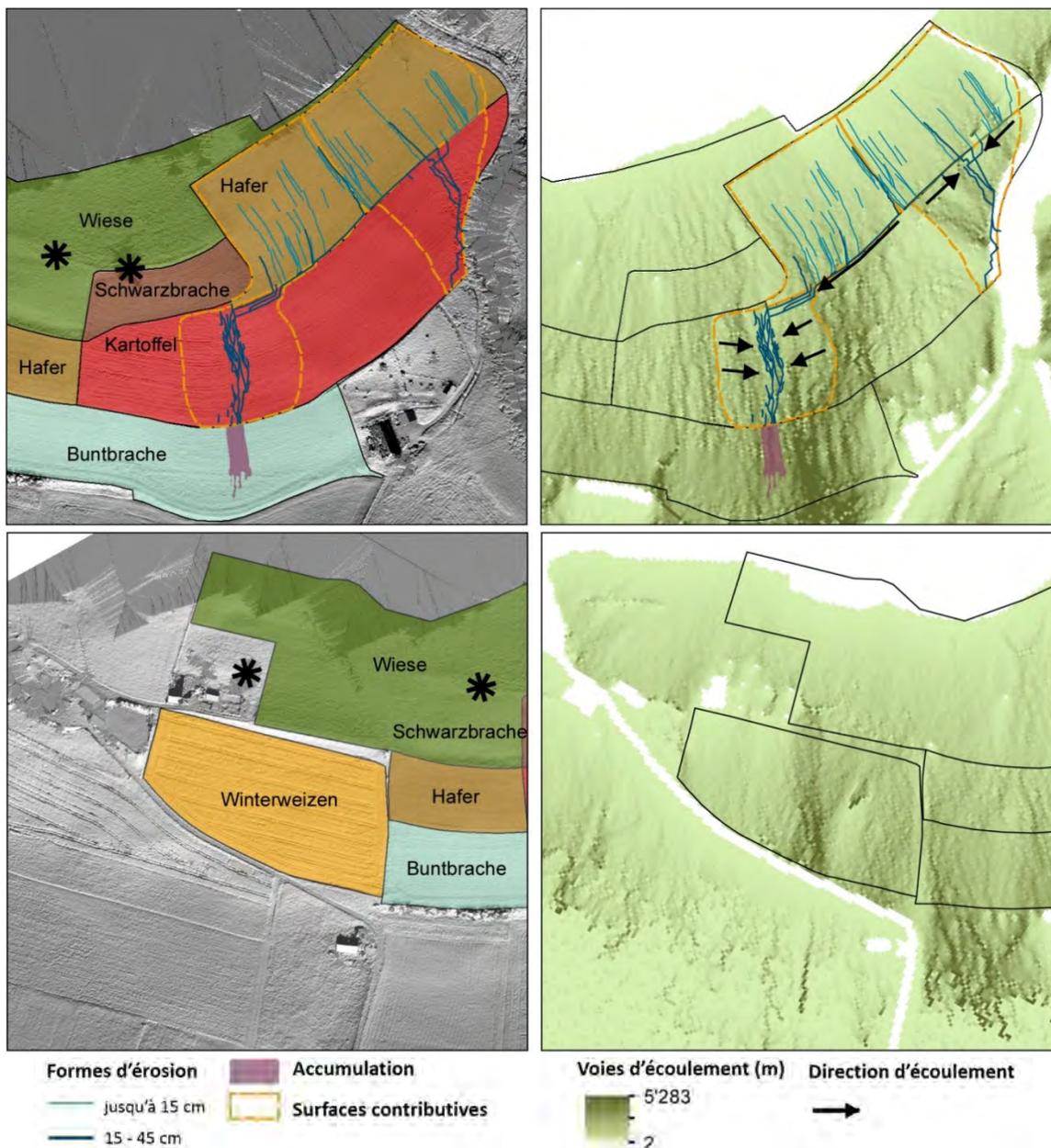


Figure 20 : Etude de cas 2

(Cas avec érosion en haut /cas sans érosion en bas : culture à gauche / carte des flux d'écoulement à droite)

	Culture	BF	Élément conducteur d'écoulement	FFF	Machine travaillant le sol	Remarques
ES	Avoine /Hafer	Contribution	Voie de passage	0.9		
	Jachère / Schwarzbrache	Infiltration		1	Charrue, cover crop, chisel, rouleau	Rouleau seulement après le semi de pois protéagineux et cultures intermédiaires
	Pommes de terre /Kartoffel	Contribution	Voie de passage, talweg	1.1		
	Jachère florale / Buntbrache	Dépôts		0.4		
VS	Blé d'hiver / Winterweizen	Infiltration		0.5	Charrue, cover crop décompacteur	Seulement blé ou orge pas de pommes de terre

Tableau 7 : Récapitulatif des principales caractéristiques de la zone d'étude. BF = surface contribuant à l'écoulement de surface, FFF = facteur de la rotation des cultures

Brève description du cas d'étude n° 2 (Figure 19 et 20, Tableaux 6 et 7)

L'événement érosion se développe sur deux parcelles (avoine et pommes de terre) et se dépose dans la jachère fleurie dans la partie inférieure du sous bassin versant. Dans la parcelle d'avoine, il y avait déjà de l'érosion en nappe et de la formation de rigoles. Ces rigoles étaient issues en partie des voies de passage qui s'écoulaient parallèlement à la pente et récoltaient l'écoulement de surface. En fonction de la topographie, l'écoulement de surface a été dirigé dans diverses directions (Figure 20). L'écoulement de surface de la parcelle d'avoine est retenu par le sillon le plus en amont de la parcelle de pommes de terre et est concentré dans les deux talwegs. A cela s'est ajouté l'écoulement de la parcelle de pommes de terre dirigé de part et d'autre dans les talwegs par les sillons parallèles à la pente. Cet écoulement concentré a conduit à la rupture des sillons dans le talweg et a engendré des rigoles d'érosion de plus de 40 cm de profondeur. La terre exportée de la rigole d'érosion à gauche s'est déposée dans la jachère fleurie, alors que la terre exportée dans la rigole de droite s'est déposée partiellement dans la prairie et, pour l'autre partie, a été emportée par la rivière. Aucun signe d'érosion n'est cependant à constater dans la jachère au-dessus de la parcelle de pommes de terre.

La zone témoin sans érosion se trouve sur le même versant que la zone avec érosion et est délimitée sur la Figure 20 (à gauche) par la parcelle d'avoine et la jachère présente dans la zone d'érosion. La zone témoin possède les caractéristiques suivantes (Tableau 6) : une longueur de pente supérieure (110 m), une déclivité plus importante (21 %) et également un talweg globalement plus sensible que la zone avec de l'érosion. Néanmoins, il n'y a pas eu d'érosion dans cette zone lors de forts événements pluvieux. Les passages de tracteur peu recouverts dans la parcelle de blé d'hiver ne sont pas non plus soumis à de l'érosion. Le coefficient de rotation de culture de la zone témoin indique une très bonne valeur. En effet la parcelle était cultivée, lors des quatre dernières années, avec une prairie et du blé d'hiver (Tableau 7). Il est à noter également que le blé d'hiver de 2015 n'a pas été récolté en été mais au printemps et qu'il a été incorporé au sol avec la herse, ceci en raison de la pression des maladies qui était trop élevée pour permettre la production de semences. La zone avec érosion présente des valeurs du facteur de la rotation des cultures plus mauvaises (Tableau 7). Elles se situent entre 0.4 (jachère florale) et 1.1 (pommes de terre). Les parcelles des deux zones sont labourées. Pour les autres travaux du sol, différentes machines sont utilisées, comme le chisel et le cover crop pour la zone avec érosion et le cover crop et le décompacteur pour la zone témoin.

Les sols de la zone avec érosion ont par conséquent été travaillés plus intensivement. En fonction du choix de la rotation des cultures, les deux zones se différencient également en ce qui concerne la couverture du sol. La zone témoin présente un recouvrement du sol moyen de 54 % des surfaces contribuant à l'érosion, alors qu'il est de 13-23 % dans la zone avec érosion. Grâce à cela, l'effet de la battance lié aux précipitations est fortement diminué. Dans la zone témoin, il n'y a pas de surface contribuant à l'érosion, ni d'éléments favorisant l'écoulement de surface qui auraient facilité l'érosion (Tableau 7). La surface contribuant à l'érosion pour la zone avec érosion est petite (~ 1.2 ha) en comparaison à celle du site avec érosion du cas d'étude n° 1 (5.2 ha). Néanmoins, cela suffit à la formation de rigoles dans le talweg parce que les sillons des pommes de terre conduisent l'érosion et ont fortement contribué à son ampleur. A cause de ces sillons, l'ensemble de l'écoulement de surface est collecté, canalisé et conduit dans le talweg. Sur la base de la carte des écoulements, un tracé perpendiculaire de l'écoulement de surface est attendu. Par l'effet de la canalisation dû aux sillons de pommes de terre, l'écoulement de l'ensemble du sous bassin versant est collecté dans les deux talwegs. Cela a suffi à la rupture des sillons.

Conclusion de l'étude comparative de l'observation de l'environnement parcellaire

La comparaison de zones avec et sans érosion pour les deux cas d'étude montre que les facteurs principaux des phénomènes érosifs sont :

- Le travail du sol ;
- Le manque de couverture du sol ;
- Les grandes surfaces contribuant à l'écoulement ;
- Les parcelles avec de longues pentes ;
- La canalisation de l'écoulement de surface (raie de charrue, sillon de pommes de terre) ;
- Les passages de roues favorisant l'écoulement ;
- La rotation de culture intensive ;
- L'accumulation de l'écoulement dans le talweg ;
- L'accumulation de l'écoulement de surface dans des canaux de trop faible capacité.

Ce travail de Master offre une bonne compréhension des phénomènes érosifs à l'échelle du sous bassin versant et montre l'importance d'une étude au cas par cas. Il en ressort que les facteurs qui agissent sur les phénomènes érosifs sont des facteurs difficilement généralisables et spécifiques à chaque situation.

3.2. Matériels et méthodes de mesure avec un drone d'une rigole d'érosion

La réalisation des images aériennes à haute résolution nécessite l'utilisation d'un appareil photo de haute qualité, d'un drone et d'un logiciel de planification de vol. Ensuite, à l'aide d'un logiciel de photogrammétrie, une orthomosaïque/orthophoto ainsi qu'un modèle numérique de surface (MNS) sont obtenus sur la base des images aériennes.

3.2.1. Les drones

Pour le projet Air-osion, 4 drones de 3 conceptions différentes sont disponibles :

Les ailes volantes de type Ebee, série EB-02 (Figure 21a) :

Ce drone est construit par Sensefly (Cheseaux, Suisse). Il est composé d'une coque en mousse de polypropylène expansé et d'une structure en fibre de carbone ; il pèse 700 g. Il possède un GPS embarqué. Le moteur électrique est "brushless" (sans balais), les batteries utilisées sont au lithium-polymère rechargeables. Il possède une autonomie d'une quarantaine de minutes et peut facilement voler à une hauteur d'environ 60 m pour avoir une résolution d'image de 2 cm/px. Il peut voler jusqu'à une vitesse de vent de 12 m/s. Cette aile volante nécessite une zone de décollage et d'atterrissage libre de tout obstacle d'une quarantaine de mètres de long. Ce drone est utilisé par CHANGINS et le CDE.

Le multicoptère Tüftelberger (Figure 21b) :

Il s'agit d'un hexacoptère de l'entreprise " Die Tüftelberger" (Schwanden (GL), Suisse) avec un flight control de Mikrokopter de la firme HiSystems GmbH (Moormerland, Allemagne). La nacelle biaxiale PRO AV-200 est de l'entreprise Photohigher (Küsten, Allemagne). Les batteries utilisées sont au lithium-polymère rechargeables (Tattu 16'000 mAh). Avec les différents éléments cités ci-dessus, le drone pèse 4.5 kg et peut voler durant plus de 20 minutes. Sans la nacelle et l'appareil photo le drone pèse environ 3 kg et peut réaliser un vol de 50 minutes. Cela montre que le multicoptère peut, avec un petit capteur et une fixation conforme, atteindre des temps de vol supérieurs à la moyenne d'autres systèmes de vols de ce type. Il peut ainsi effectuer des vols sur de grandes surfaces comme les ailes volantes (par exemple eBee de Sensefly), en fonction de la résolution désirée. Il peut atteindre 36 km/h mais aussi voler doucement, faire du vol

stationnaire, décoller et atterrir verticalement et embarquer des capteurs jusqu'à 2 kg. Ce drone est uniquement utilisé par la HAFL.

Le multicoptère Phantom (Figure 21c) :

Ce quadricoptère très répandu de l'entreprise DJI (Schenzhen, Chine) est en alliage de titane et de magnésium. L'autonomie de vol est estimée à 30 minutes. Il transporte une caméra intégrée avec un capteur 1 pouce de 20 mégapixels. Ce drone est uniquement utilisé par le CDE.



Ces différents types de drones permettent de répondre à diverses problématiques. En effet, les drones de type aile volante sont adaptés lorsqu'il s'agit de survoler une grande zone (30 à 40 ha), ils permettent l'analyse à l'échelle d'un sous bassin versant et la compréhension des flux d'eau. A l'inverse les multicoptères sont moins limités en termes de hauteur de vol et permettent un vol plus bas et donc un survol d'une rigole d'érosion à haute résolution (1 à 2 cm/px) pour pouvoir en calculer le volume de manière précise. Dans les deux cas, chaque type de drone peut être utilisé pour l'une ou l'autre des problématiques mais il y aura certaines limitations.

3.2.2. Les capteurs

Différents capteurs ont été utilisés en fonction de l'équipement des partenaires du projet Air-osion :

Appareil photo numérique Canon PowerShot S110 (Canon, Tokyo, Japon) avec une résolution de 12.1 mégapixels et un capteur de 7.44 X 5.58 mm. La résolution au sol à 100 m est de 3.5 cm/px. Cet appareil est utilisé pour les drones eBee (CHANGINS, CDE). Ce capteur est contrôlé par le pilote automatique du drone et les captures d'images sont automatiques. Le GPS incorporé au drone permet de directement géolocaliser les images ;

Appareil photo reflexe Canon EOS 100D (Canon, Tokyo, Japon) 18 mégapixels, avec un objectif Voigtländer SL II – N 20 mm / F3.5 Color Skopar 129 (Voigtländer, Braunschweig, Allemagne). La caméra est petite, légère (Annexe 6) et ordonne le déclenchement des images grâce à une entrée (mini jack) directement sur le drone. En plus, un GPS externe de type Canon GP-E2 (Canon, Tokyo, Japon) peut être branché, allouant ainsi des coordonnées aux images. Ce type de capteur est utilisé pour le drone de la HAFL.

3.2.3. Plan de vol

Pour couvrir totalement et de manière régulière la zone d'étude, il est important d'avoir une hauteur relative de vol constante par rapport au sol ainsi que des lignes de vol droites pour un recouvrement suffisant des images entre elles. Pour obtenir ces résultats un plan de vol est réalisé avec l'un des deux logiciels suivants :

- Emotion : logiciel conçu par Sensefly (Cheseaux, Suisse), dédié au drone eBee (

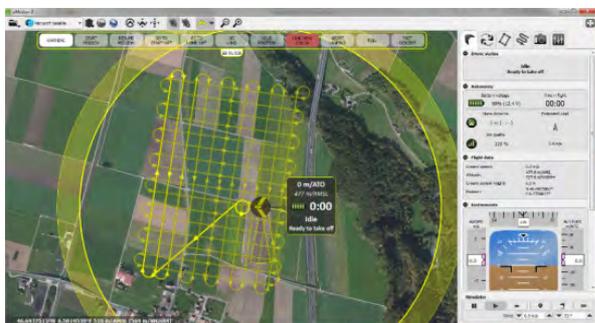
Capteur	Objectif	Recouvrement		Altitude de vol	Distance entre les images	Ecartement entre les lignes de vol	Vitesse de vol	Résolution
		Latéral	Longitudinal					

		%	%					
Canon S110		70	75	115 m	30 m	48 m	~10 m/s	4 cm/px
		70	75	60 m	15 m	24 m	~10 m/s	2 cm/px
Canon EOS 100D	20 mm	60	80	50 m	5 m	16 m	5 m/s	< 1.0 cm
		60	80	75 m	8 m	23 m	8 m/s	1.5 cm
		60	80	100 m	11 m	32 m	10 m/s	2.0 cm
		60	80	125 m	14 m	39 m	10 m/s	2.5 cm
		60	80	150 m	16 m	45 m	10 m/s	3.0 cm
		60	80	200 m	22 m	64 m	10 m/s	4.0 cm
		60	80	300 m	33 m	96 m	10 m/s	6.0 cm

- Figure 22a) ;
- Mikrokoertool 2.10c 122 : logiciel conçu par l'entreprise HiSystems GmbH (Moormerland, Allemagne), il peut être installé sur une tablette Android ou un ordinateur. Ce logiciel est utilisé pour le drone de la HAFL (
- Figure 22b).

Capteur	Objectif	Recouvrement		Altitude de vol	Distance entre les images	Ecartement entre les lignes de vol	Vitesse de vol	Résolution
		Latéral %	Longitudinal %					
Canon S110		70	75	115 m	30 m	48 m	~10 m/s	4 cm/px
		70	75	60 m	15 m	24 m	~10 m/s	2 cm/px
Canon EOS 100D	20 mm	60	80	50 m	5 m	16 m	5 m/s	< 1.0 cm
		60	80	75 m	8 m	23 m	8 m/s	1.5 cm
		60	80	100 m	11 m	32 m	10 m/s	2.0 cm
		60	80	125 m	14 m	39 m	10 m/s	2.5 cm
		60	80	150 m	16 m	45 m	10 m/s	3.0 cm
		60	80	200 m	22 m	64 m	10 m/s	4.0 cm
		60	80	300 m	33 m	96 m	10 m/s	6.0 cm

Ces logiciels permettent de définir certains paramètres de vol comme l'écartement entre les lignes, la hauteur de vol, la vitesse de vol, le taux de recouvrement latéral et longitudinal des images, l'angle de prise de vue, etc. (Tableau 8 : Réglage des capteurs en fonction de plusieurs paramètres (en jaune les principaux réglages utilisés pour le projet))



a) Logiciel de plan de vol Emotion



b) Logiciel de plan de vol Multikoertool

Capteur	Objectif	Recouvrement	Altitude	Distance	Ecartement	Vitesse	Résolution
---------	----------	--------------	----------	----------	------------	---------	------------

		Latéral %	Longitudinal %	de vol	entre les images	entre les lignes de vol	de vol	
Canon S110		70	75	115 m	30 m	48 m	~10 m/s	4 cm/px
		70	75	60 m	15 m	24 m	~10 m/s	2 cm/px
Canon EOS 100D	20 mm	60	80	50 m	5 m	16 m	5 m/s	< 1.0 cm
		60	80	75 m	8 m	23 m	8 m/s	1.5 cm
		60	80	100 m	11 m	32 m	10 m/s	2.0 cm
		60	80	125 m	14 m	39 m	10 m/s	2.5 cm
		60	80	150 m	16 m	45 m	10 m/s	3.0 cm
		60	80	200 m	22 m	64 m	10 m/s	4.0 cm
		60	80	300 m	33 m	96 m	10 m/s	6.0 cm

Figure 22 : Logiciels de plan de vol utilisés dans le projet Air-osion

Tableau 8 : Réglage des capteurs en fonction de plusieurs paramètres (en jaune les principaux réglages utilisés pour le projet)

3.2.4. Logiciel de photogrammétrie

Pour l'assemblage des images prises avec un drone il est nécessaire de passer par un logiciel de photogrammétrie. Les logiciels Pix4D (Pix4D, Lausanne, Suisse) et Agisoft Photoscan Professional 1.2.6 (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russie) sont utilisés dans le cadre du projet Air-osion.

Ainsi grâce aux images du drone et après traitement photogramétrique, une orthophoto en bande visible RGB ainsi qu'un modèle numérique de surface (MNS) de la zone sont obtenus. Le MNS est créé grâce au recouvrement suffisant des images et à l'effet stéréoscopique. Les informations d'altitude qui proviennent des images sont lissées et le MNS en est déduit (Figure 23).

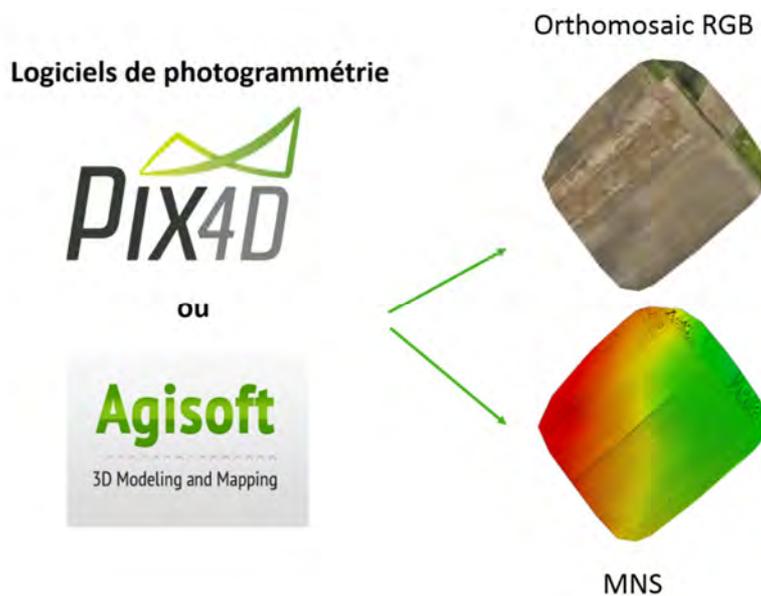


Figure 23 : Logiciels de photogrammétrie utilisés pour l'obtention d'une orthophoto et d'un MNS

Il est conseillé d'utiliser des points de contrôle au sol (ground control points GCP), 5 au minimum, pour avoir d'une part un meilleur géoréférencement des images finales et d'autre part pour superposer les orthophotos et les MNS prises sur un même site à des moments différents et les comparer. Cela est notamment intéressant pour des sites d'étude monitorés ou alors sur un autre site ayant subi plusieurs phénomènes érosifs à des périodes différentes.

En fonction du logiciel de photogrammétrie et du matériel à disposition, plusieurs méthodes existent :

Pix4D : ici les GCP sont basés sur des coordonnées issues de www.geoadmin.ch. La précision de ces GCP sur le site geoadmin.ch est de 10 cm. Il s'agit de localiser manuellement dans l'interface du logiciel un des points (GCP) facilement visible avec ses coordonnées sur plusieurs images du drone. Ainsi ce GCP avec des coordonnées connues servira pour un meilleur géoréférencement final ;

Agisoft Photoscan : ce logiciel propose pour les GCP d'utiliser des symboles codés (Figure 24a) dessinés sur une planche en bois de 50x50 cm et de les disposer dans la zone d'étude survolée. A chaque symbole sont attribuées ses coordonnées, à une précision également de 10 cm. Le logiciel reconnaît ensuite le symbole et lui attribue les coordonnées prédéfinies.

Ces GCP permettent de corriger de manière précise les problèmes de distorsion comme l'illustre la Figure 24 (b et c).



En fonction de la surface à survoler, il faut disposer plus ou moins de GCP. Cependant il y a encore des travaux de recherche à effectuer pour déterminer combien de GCP sont nécessaires pour influencer l'exactitude du géoréférencement. Ces GCP ne doivent pas être situés sur une ligne mais sur l'ensemble de la zone.

3.2.5. Résultats de l'acquisition des images de drone pour l'observation de l'érosion

A la vue du nombre important d'images acquises, seuls certains cas particuliers sont détaillés ici.

Les phénomènes érosifs visibles sur les orthophotos et les MNS sont très variés.

Les images RGB ci-dessous montrent clairement qu'il est possible de mettre en évidence les traces d'érosion linéaire en grandes cultures à l'aide d'images aériennes prises avec un drone. Cette érosion est facilement détectable visuellement sur les orthophotos, que le sol soit nu (Figure 25 à Figure 28), légèrement couvert (Figure 29 et Figure 30), voire même avec une végétation de plus de 25 cm de haut (Figure 31).



Figure 25 : Erosion dans une parcelle de tournesol (source CHANGINS)



Figure 26 : Erosion dans une parcelle de maïs (source CHANGINS)



Figure 27 : Erosion dans une parcelle de maïs fraîchement semée. Le dépôt des sédiments est bien visible à gauche de la maison (Source CDE)



Figure 28 : Dégâts importants d'érosion sur un sol nu (Source CDE)



a) Erosion commençant dans une parcelle de pois (droite) qui finit dans du maïs vers la route



b) Erosion commençant dans une parcelle de maïs (sol nu) et qui finit une prairie (vert)

Figure 29 : Erosions visible dans des parcelles légèrement couvertes (Source CHANGINS)



Figure 30 : Erosion dans des parcelles de blé (Source CHANGINS)



Figure 31 : Erosion dans une parcelle de blé de plus de 25 cm de haut (Source CHANGINS)

Les rigoles d'érosion sont également visibles sur les MNS obtenus suite aux traitements photogrammétriques des images de drone. Les résolutions varient de 4 cm/px (Figure 32) à 1 cm/px (Figure 33).



Figure 32 : Erosion visible sur un MNS d'un champ de tournesol, résolution de 4 cm/px (Source CHANGINS)

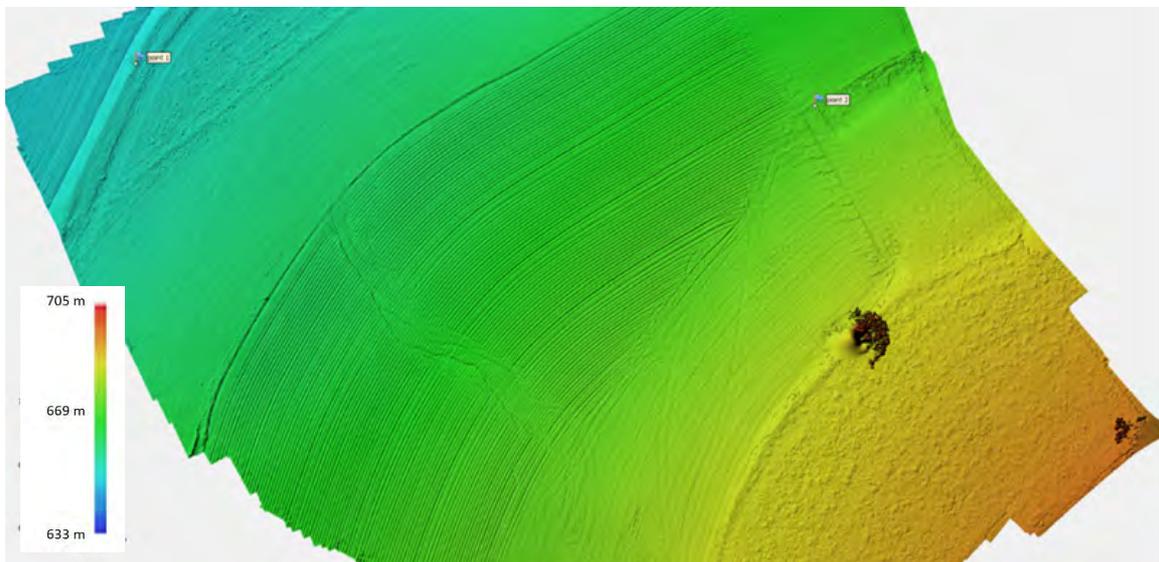


Figure 33 : Dégâts d'érosion important dans un champ de pommes de terre (Source HAFL)

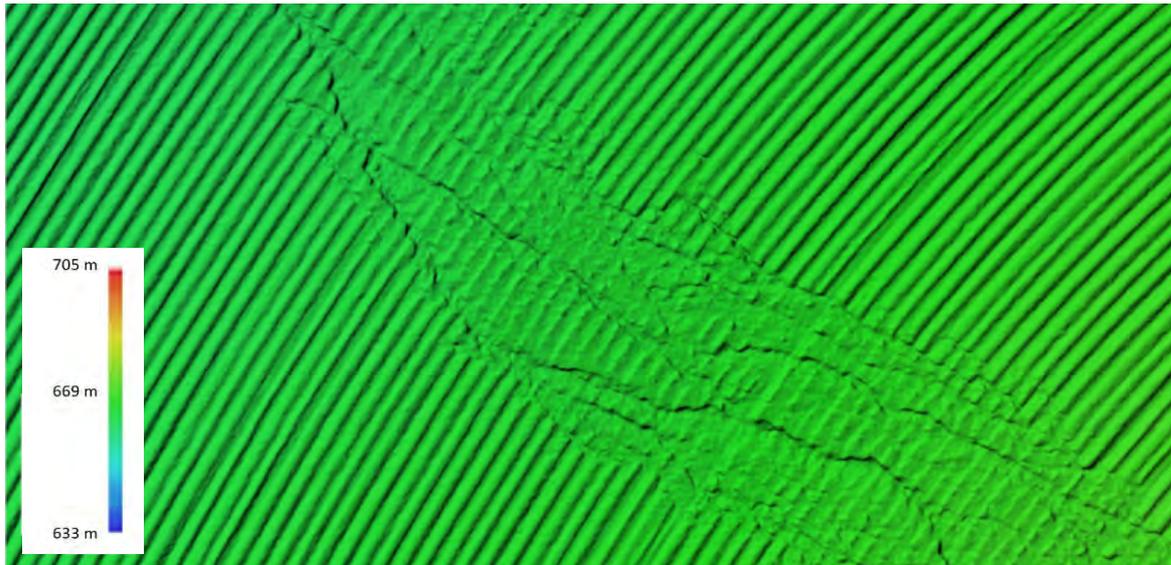


Figure 34 : Zoom de dégâts d'érosion d'une parcelle de pommes de terre, les buttes sont clairement visibles, résolution de 1 cm/px (Source HAFL)

La haute résolution des images du drone permet ensuite d'obtenir un MNS très précis pour calculer le volume de terre érodée. Le zoom (Figure 34) de la parcelle de pomme de terre de la Figure 33, montre que les buttes sont clairement visibles (résolution 1 cm/px).

Les images ci-dessous (Figure 35) montrent le détail visible tant sur une orthophoto RGB que sur un MNS avec une résolution de 1 cm/px. Les formes de la rigole sont bien visibles, certains détails comme les cailloux « lavés » ou le regard, ressortent très bien sur l'image RGB.

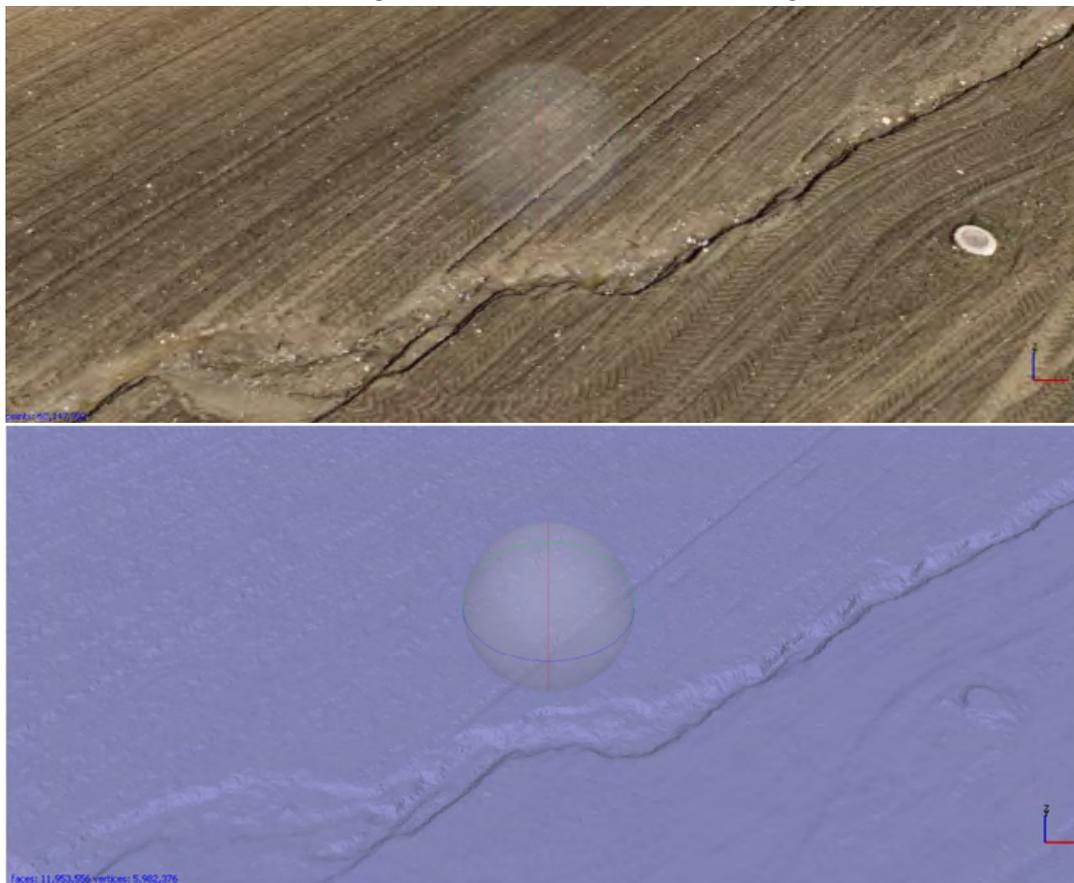


Figure 35 : Zoom sur une rigole d'érosion dans un champ de tournesol (Source HAFL)

Les images suivantes (Figure 36) montrent d'importants dégâts aux cultures dus à de forts événements pluvieux. Il est intéressant d'observer que ces dégâts ne touchent pas qu'une seule parcelle. En effet les flux d'eau suivent la topographie du sous bassin versant.



Figure 36 : Dégâts d'érosion suivant la topographie du sous bassin versant (Source CDE)

3.2.6. Résultats d'analyses à l'échelle du sous bassin versant

Les images de drone à une résolution plus grande (4 cm/px) permettent également de comprendre la dynamique de l'écoulement de l'eau conduisant à l'érosion des sols de l'ensemble du sous bassin versant concerné.

Cette analyse permet une vision assez complète des formes d'érosion. Différentes causes d'érosion peuvent être facilement visualisées. Parmi ces causes, il est possible d'observer des zones avec de l'accumulation d'eau, des zones d'érosion, des objets favorisant l'écoulement de l'eau d'une parcelle à une autre.

Dans le cas décrit à la Figure 37, deux regards bouchés contribuent à augmenter les dommages.

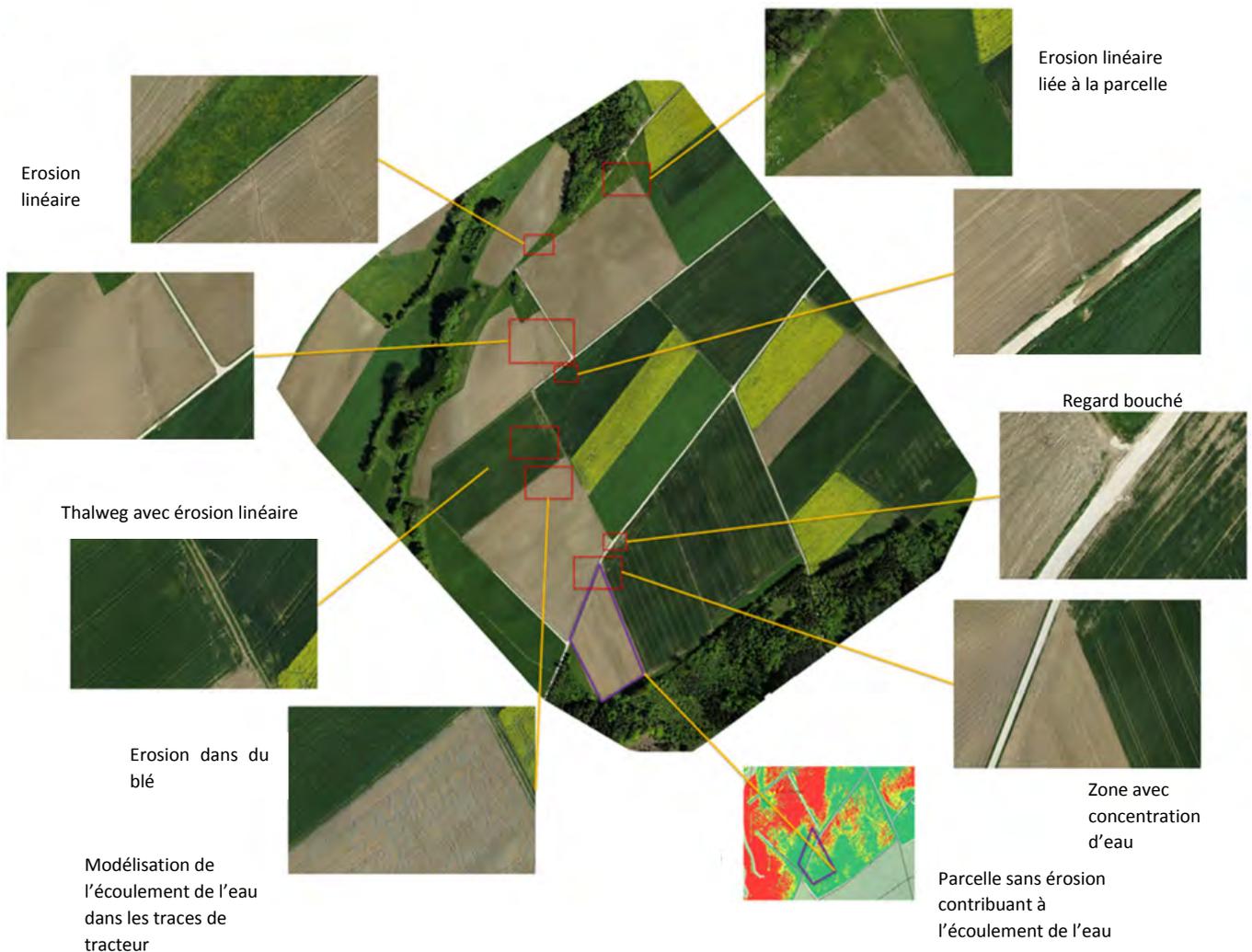


Figure 37 : Analyse d'une zone en 2015 à l'échelle d'un sous bassin versant (Source CHANGINS)

Un monitoring de ces zones sur plusieurs années (2015-2016) permet également de mieux comprendre le système d'écoulement de l'eau en fonction des différentes rotations et d'observer les phénomènes érosifs. En comparant 2015 (Figure 37) et 2016 (Figure 38), la parcelle de maïs de 2016 subit, comme en 2015, de l'érosion, ce qui est fortement dommageable pour la fertilité des sols. Pour les deux années, les sols de la zone 2 (Figure 38) étaient nus au printemps. La parcelle de betterave, érodée en 2016, n'avait pas d'érosion en 2015 car il y avait du colza : le sol était donc couvert au printemps 2015.

Il est à remarquer que la zone 1, qui avait subi de forts dégâts érosifs en 2015, n'en subit aucun en 2016, car les sols sont couverts. De plus, la zone 3, qui contribuait fortement à l'écoulement de l'eau au-travers de la route en 2015, a un sol couvert en 2016, ce qui empêche les effets néfastes liés aux écoulements d'eau de 2015 à cet endroit. Globalement, cette zone a subi moins de dégâts liés à l'érosion en 2016 qu'en 2015. Il y a beaucoup moins de terres ouvertes au printemps 2016. Une réflexion au niveau de rotation de culture pourrait être bénéfique ici.

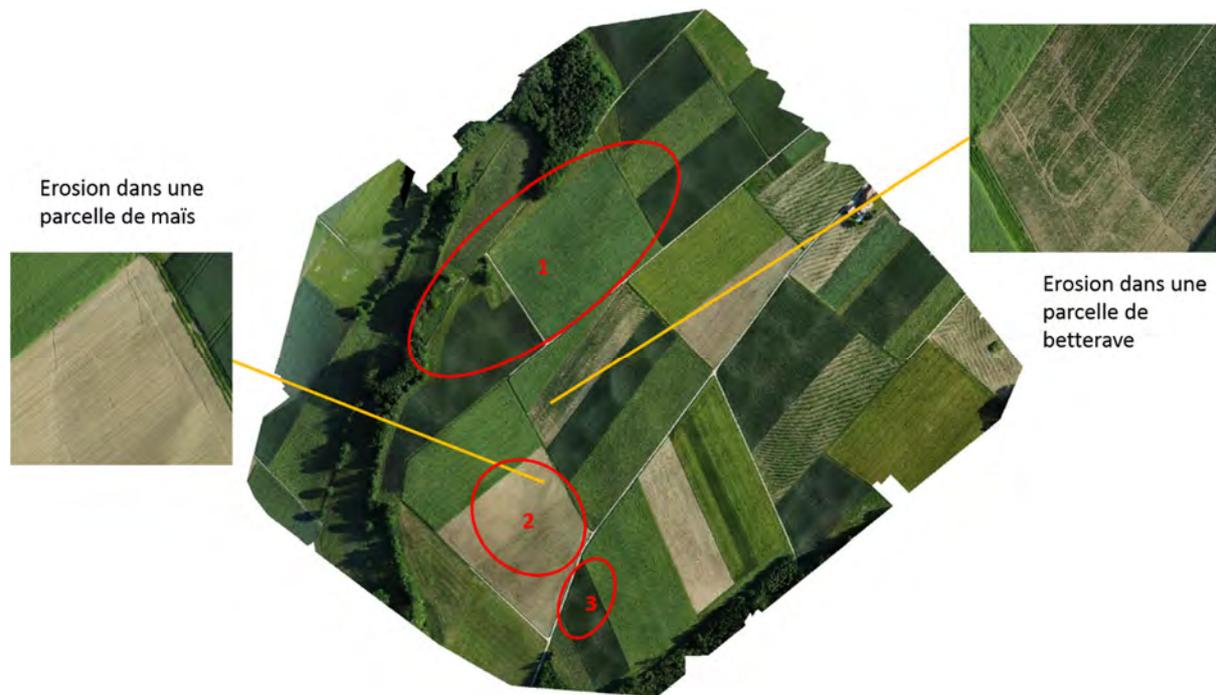


Figure 38 : Analyse d'une zone en 2016 à l'échelle d'un sous bassin versant (Source CHANGINS)

Un autre exemple d'analyse d'une zone à l'échelle de plusieurs parcelles (Figure 39 ; Figure 40) montre que grâce au MNS il est possible d'étudier la topographie de la zone, dans le cas présenté, il s'agit d'une butte dans le centre de l'image. L'érosion commence à ce niveau. Ce type de MNS facilite la lecture du paysage, les routes et les arbres étant aussi facilement identifiables.



Figure 39 : Survol de plusieurs parcelles pour une meilleure compréhension de l'écoulement de la zone (Source HAFL)

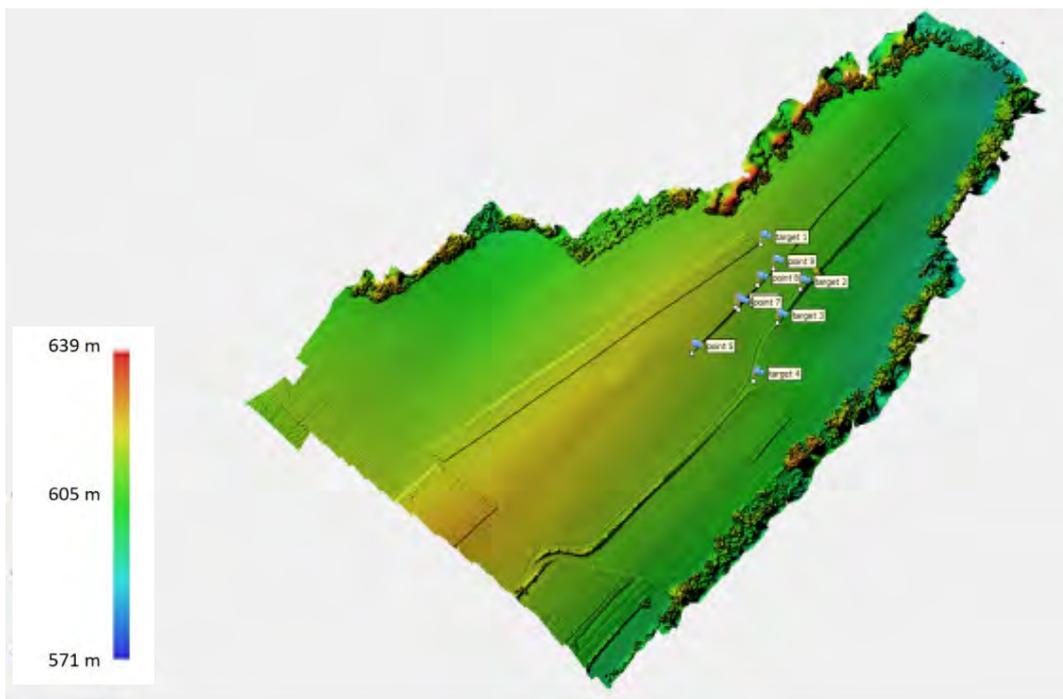


Figure 40 : MNS de plusieurs parcelles facilitant la compréhension de l'écoulement de l'eau. Les points bleus représentent les GCP. La zone jaune orange indique une altitude plus élevée liée à une butte (Source HAFL)

4. Analyse des images à haute résolution

Dans cette partie, sont résumées les étapes et les possibilités pour analyser les différentes formes d'érosion sur la base d'image à haute résolution. Cette partie est principalement développée par Stéphane Burgos (HAFL) et dans le travail de Master d'Alba Farnos (Farnos, 2015) (CHANGINS).

A la vue de la grande quantité d'images acquises, seuls les résultats principaux sont montrés ici. De plus, les extractions étant différentes pour les images et les modèles numériques de surface, les résultats sont présentés en deux parties. La résolution du MNS est en général inférieure à celle de l'image RGB.

4.1. Extraction des rigoles en utilisant le modèle numérique de surface (MNS)

La possibilité d'extraire les rigoles d'érosion sur la base du MNS dépend de la résolution et du bruit présent sur l'image. Des images avec des rigoles d'érosion inférieure à 4 cm ne permettent pas une extraction correcte car l'erreur sur le MNS est du même ordre de grandeur. Pour chaque image les mêmes traitements d'analyses avec les étapes décrites ci-dessous sont effectués.

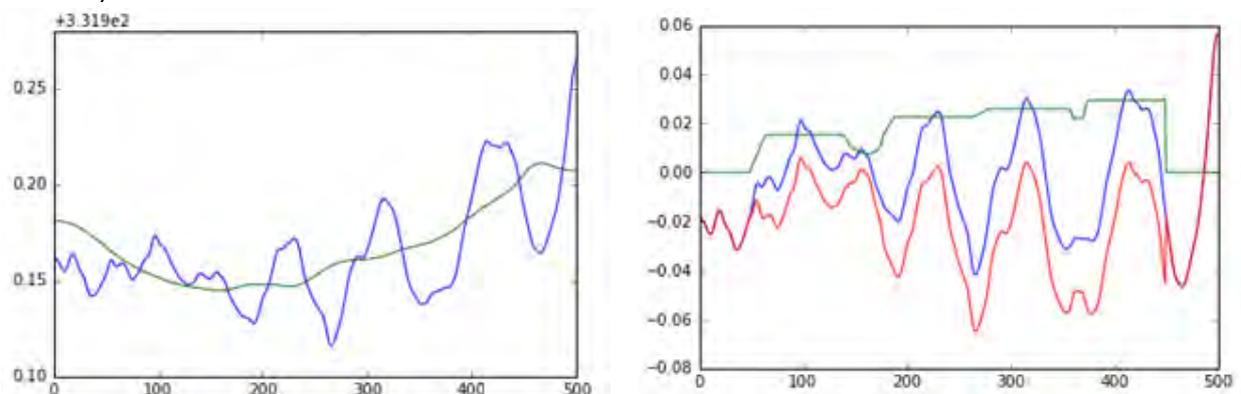
a. Réduction du bruit en utilisant un filtre Gaussien

Une fenêtre mobile d'une taille de 3x3 ou de 5x5 en fonction de la taille des pixels est appliquée lors du prétraitement de l'image. Pour une fenêtre 3x3, la valeur du pixel central équivaut à la moyenne pondérée des 8 pixels jointifs à ce pixel avec une pondération plus importante pour le pixel du milieu. L'utilisation d'une fenêtre mobile plus grande diminue les possibilités d'extraction précise de l'image. Il est à noter qu'une fenêtre mobile de 3x3 correspond à 12x12 cm avec des pixels de 4 cm.

D'autres filtres de lissage peuvent aussi être utilisés comme le filtre médian ou percentile. Les filtres standards d'*OpenCV* (Open Source Computer Vision Library, bibliothèque graphique libre pour le traitement d'images) et *scikit-image* (bibliothèque graphique libre pour le traitement d'images sur Python) fournissent aussi de bons résultats.

b. Création d'un modèle numérique de surface potentiel avant érosion (MAE)

Deux types de filtres sont utilisés afin de calculer le modèle numérique de surface avant érosion. Les premiers types sont des filtres médians. La taille du filtre dépend de la résolution de l'image et de la taille des rigoles d'érosion, mais généralement ce filtre avec une fenêtre mobile de 100x100 permet un bon lissage de la surface. Si le nombre de rigoles est trop élevé, un filtre avec une valeur du percentile à 95 doit être utilisé dans le but d'éliminer les valeurs extrêmes et les artefacts (Figure 41a et b).

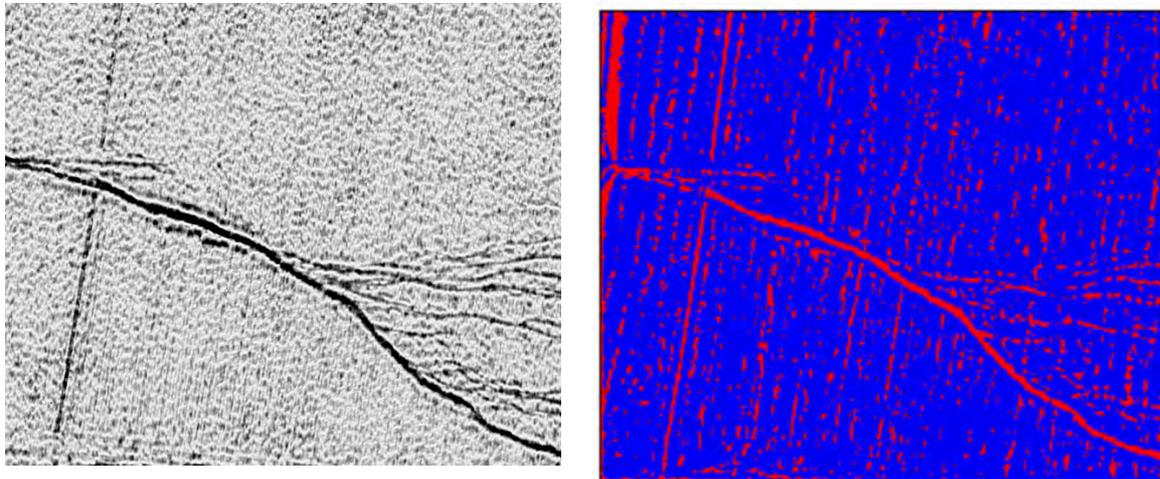


a) bleu = modèle original, vert modèle moyen avec une taille de 100x100 (axe x = m ; axe y = pixel de l'image)

b) vert = modèle de surface obtenu avec 95 % de percentile, bleu = modèle différentiel, rouge = distance de la surface au modèle différentiel (élimination des valeurs positives) (axe x = m ; axe y = pixel de l'image)

Figure 41 : Représentation graphique des différents filtres utilisés pour créer le modèle de surface avant érosion

La soustraction des deux modèles à savoir le modèle numérique de surface (MNS) obtenu avec le drone et le modèle de surface reconstitué avant l'érosion (MAE) permet d'obtenir un modèle différentiel indépendant par rapport à la pente (Figure 42a). Le calcul du modèle avec un percentile à 95 et la soustraction du modèle différentiel donne un modèle avec un relief négatif et est plus efficace pour définir le seuil des rigoles d'érosion (Figure 42b).



a) Modèle différentiel obtenu après le traitement du MNS

b) Extraction des pixels avec une profondeur supérieure à 2 cm

Figure 42 : Modèle différentiel obtenu suite au traitement du MNS obtenu par le drone

c. Choix du seuil en fonction du MNS

Une résolution proche de la taille du pixel de l'image a été choisie comme seuil, en raison du fait que la précision du MNS dépend de celle de la taille du pixel. Des essais antérieurs ont montré que des rigoles moins profondes que la taille des pixels ne sont pas visibles. Il est important de souligner que si la pente est trop irrégulièrement concave, le modèle surestime la position de la surface. Cette procédure extrait tous les pixels d'une profondeur supérieure à la valeur seuil (Figure 42). Le modèle booléen qui en résulte (1 si la profondeur est inférieure au seuil, 0 autrement) peut être traité par des fonctions morphologiques pour se débarrasser des plus petits objets correspondant au bruit.

d. Diminution du bruit des différents objets

Des filtres morphologiques de type ouverture (*érosion*² suivi d'une dilatation³) ou fermeture (dilatation suivie d'une *érosion*) sont utilisés dans le but de diminuer le bruit, éliminer les objets les plus petits et combler les trous de certains autres objets. La Figure 43 montre l'effet des filtres morphologiques. Ces processus d'*érosion* (enlève des pixels) et de dilatation (ajoute des pixels) permettent l'élimination de petits artefacts/bruits.

² Erosion d'une image = le remplacement de la valeur de chaque pixel par la plus petite présente dans l'élément structurant. Il s'agit d'un lissage produisant le rehaussement des valeurs faibles (tons sombres). Dans le rapport, quand le terme *érosion* traite du filtre morphologique, il est écrit en italique.

³ Dilatation d'une image = le remplacement de la valeur du pixel central de la fenêtre centrale par la valeur maximale parmi celles présentes dans l'élément structurant de la fenêtre du filtre. Il s'agit d'un lissage produisant le rehaussement des valeurs élevées (tons clairs)

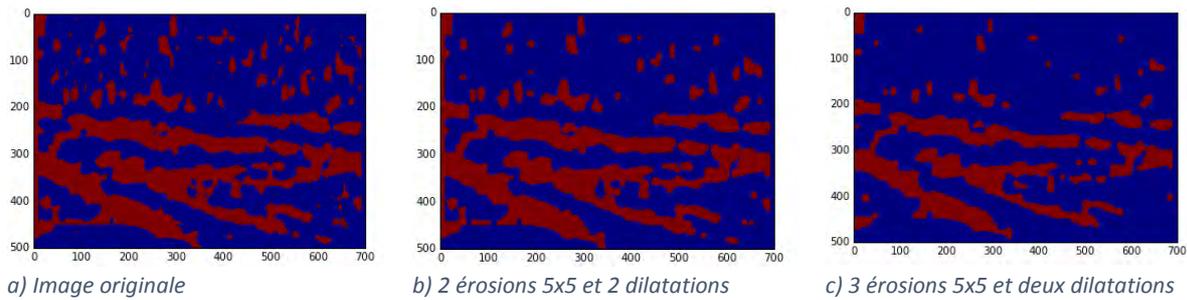


Figure 43 : Effet des filtres morphologiques (pour a, b, c : axe x = pixel de l'image ; axe y = pixel de l'image)

e. Etiquetage des rigoles et exportation dans un système d'information géographique (SIG)

L'image finale est étiquetée avec une fonction adéquate où un même chiffre est attribué à tous les pixels qui se touchent. Les pixels avec le même chiffre peuvent ensuite être représentés dans une même couleur (Figure 44). Cet attribut peut être utilisé pour la vectorisation dans un SIG. L'exportation dans un SIG comme QGIS permet la superposition avec d'autres cartes. Deux fichiers sont exportés :

- Le modèle différentiel contenant la profondeur de chaque pixel ;
- Le fichier étiqueté contenant les objets avec une profondeur supérieure au seuil.

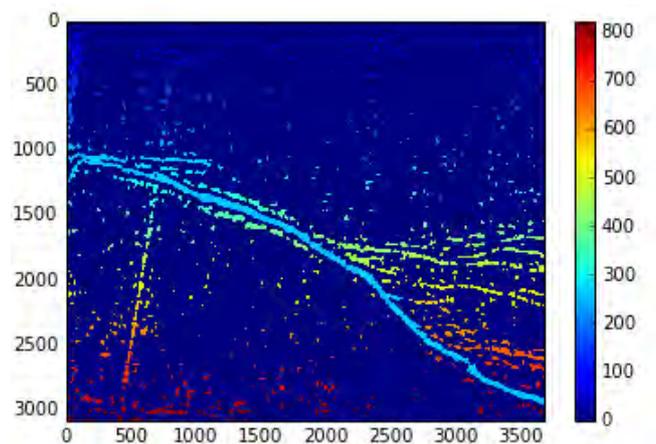


Figure 44 : Rigole avec les pixels étiquetés et représentés par une couleur (axe x = pixel de l'image ; axe y gauche = pixel de l'image ; axe y droite = no de l'objet, les pixels contigus ont le même numéro)

f. Vectorisation, calcul de la surface et du volume des rigoles d'érosion

Les objets étiquetés sont vectorisés (raster to vector) grâce au chiffre indiqué par l'attribut. La fonction « statistique de zone » peut ensuite être utilisée pour calculer la somme des profondeurs. La profondeur totale multipliée par la surface des pixels donne le volume total des rigoles. Elle est calculée pour chaque polygone du fichier vecteur.

Cependant le principal problème reste le bruit sur l'image. Si le phénomène érosif a lieu juste après le semis, les passages de roues des tracteurs présentent les mêmes formes morphométriques que l'érosion et sont donc difficiles à différencier. Il est possible d'utiliser les filtres gradients, qui tiennent compte de la direction des objets, pour contourner ce problème.

4.1.1. Résultats de l'extraction de rigoles avec des tailles différentes de fenêtre mobile

Pour des rigoles uniques, bien marquées, une fonction de lissage moyen permet la reconstruction du modèle numérique de surface avant érosion (MAE). Le bruit dû aux surfaces irrégulières est efficacement réduit si une fenêtre mobile supérieure à 50 pixels est utilisée. Les exemples suivants

montrent l'effet de la taille de la fenêtre mobile. La taille de la fenêtre doit être nettement plus grande que la largeur des rigoles (Figure 45).

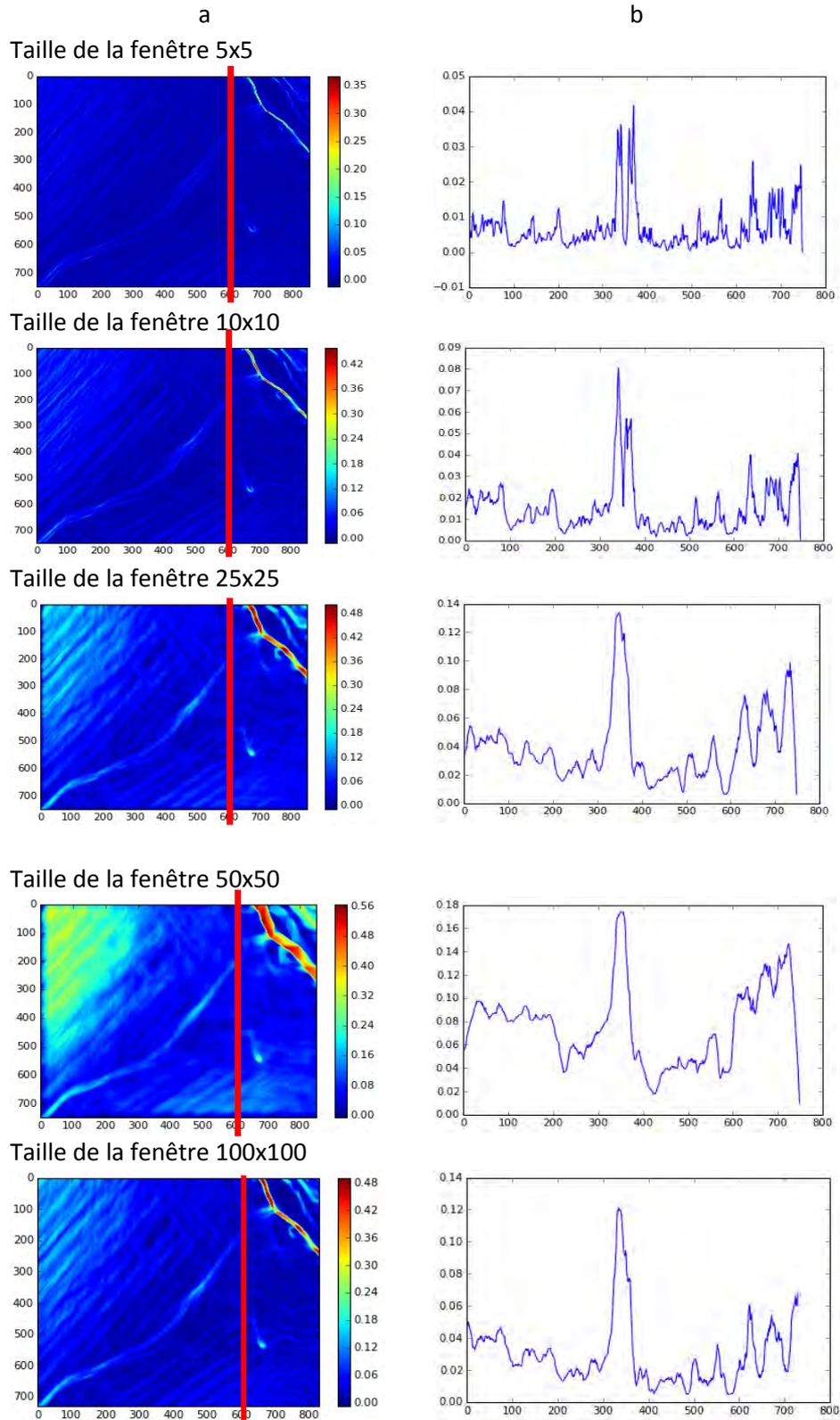


Figure 45 : Effet des différentes tailles de fenêtres mobiles sur un profil d'une rigole d'érosion, en rouge emplacement de la coupe du profil. La taille du pixel est de 4.5 cm. (a : axe x = pixel de l'image ; axe y gauche = pixel de l'image ; axe y droite = m b : axe x = m ; axe y = m)

Dans le cas ci-dessous (Figure 46), une fenêtre mobile de 150x150 est utilisée pour la fonction de lissage moyen.

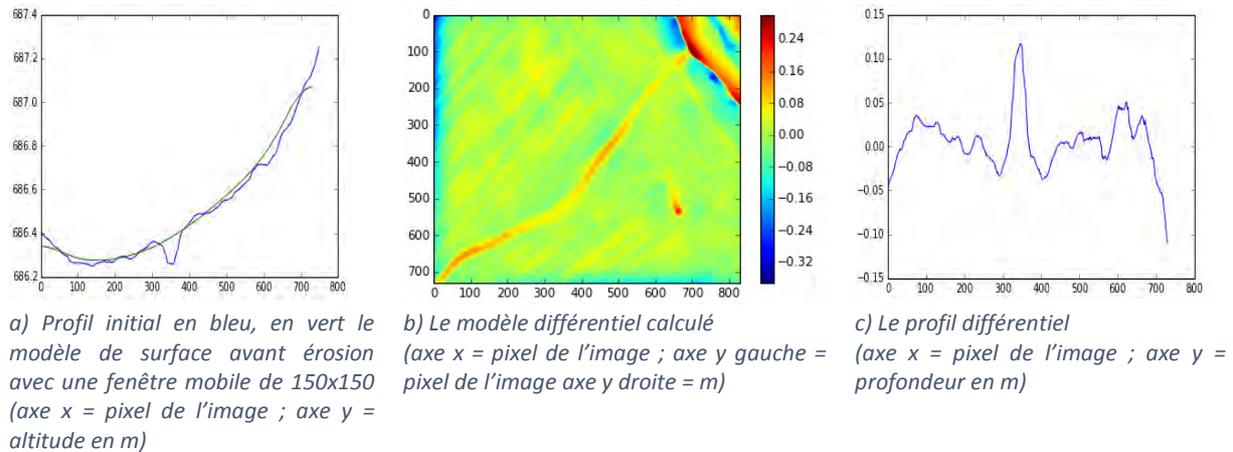


Figure 46 : Lissage d'une rigole avec une fenêtre mobile de 150x150

Un seuil à 3.5 cm est utilisé ici pour extraire l'érosion. Comme déjà expliqué, aux différents objets connectés est attribué un chiffre pour ainsi les étiqueter (Figure 47). Après importation dans un logiciel SIG, les objets sont vectorisés et le volume des rigoles calculé en utilisant la fonction « statistique de zone » pour additionner la somme des profondeurs et ensuite la multiplier avec l'aire des pixels. Le résultat obtenu est de 2.76 m³ ce qui concorde bien avec le résultat obtenu avec les mesures manuelles.

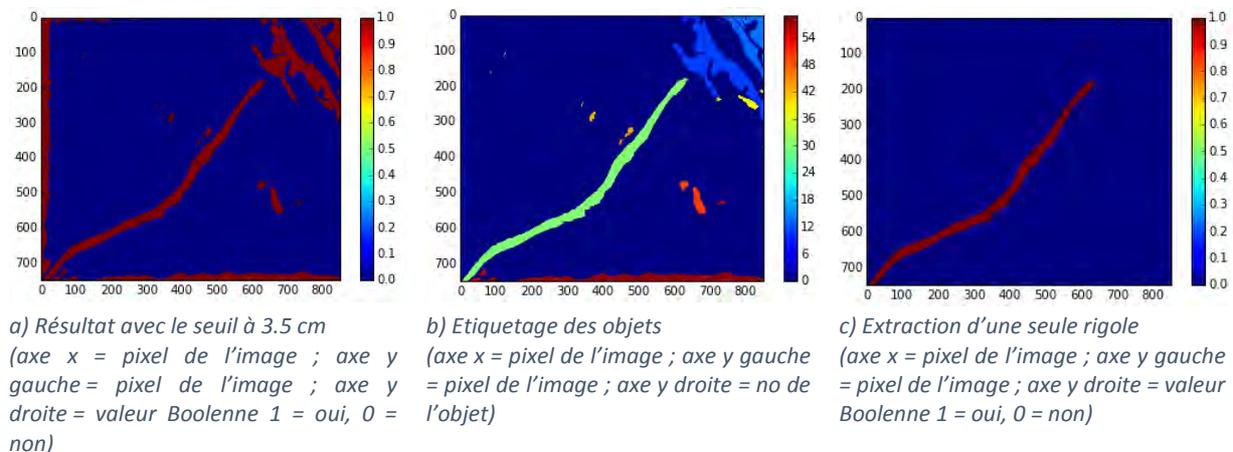
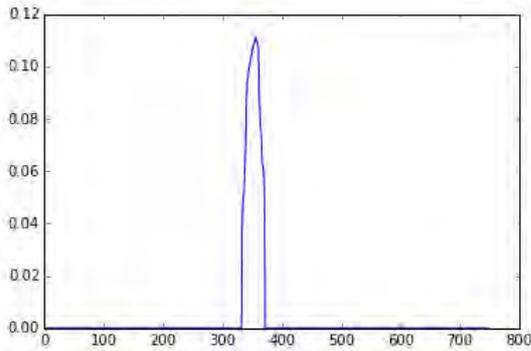
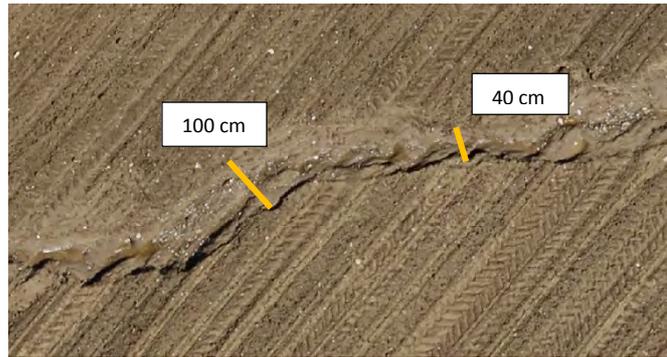


Figure 47 : Procédé pour l'extraction d'une rigole d'érosion

La référence sur le terrain est délicate car le profil de la rigole est assez compliqué, en effet au début la rigole est large et devient plus profonde dans la partie médiane (Figure 48). La largeur moyenne était de 75 cm. Pour calculer le volume de cette rigole manuellement, un profil triangulaire a été choisi ce qui donne un volume estimé à 3.6 m³ (80 m x 0.75 m x 0.12/2).



a) Profil moyen du modèle différentiel
(axe x = pixel de l'image ; axe y = profondeur en m)

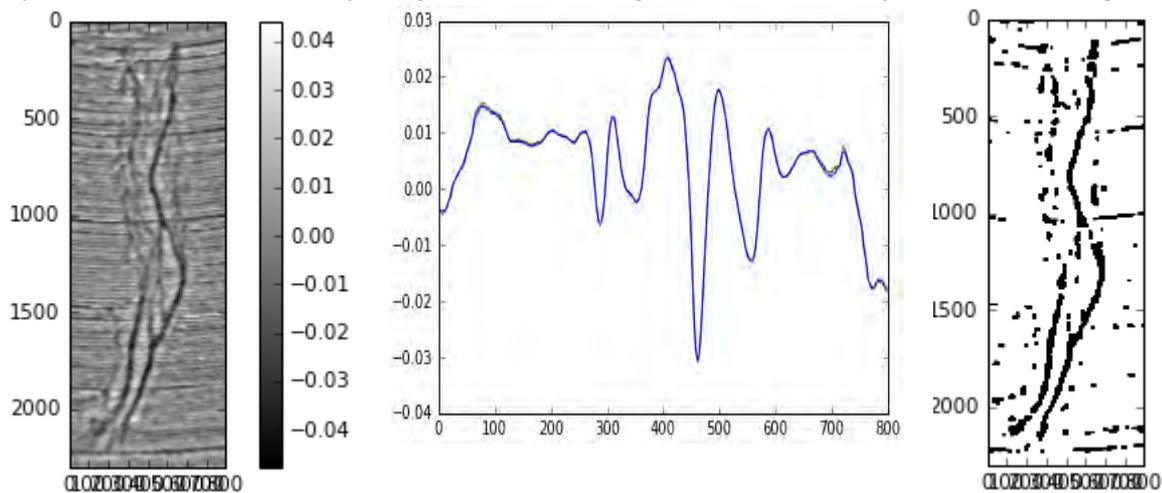


b) Hétérogénéité de la rigole

Figure 48 : Profil moyen de la rigole et photo de l'hétérogénéité de la rigole

4.1.2. Extraction des rigoles avec un MNS d'une résolution de 4 cm/pixel

Le même procédé que précédemment est utilisé. Cependant la profondeur absolue n'est pas assez précise pour calculer le volume de terre. La rigole a seulement pu être extraite (Figure 49) mais son volume n'est pas fiable. Il est important de noter que, comme le phénomène érosif a eu lieu peu après le semis, les traces de passages du tracteur engendrent un bruit important dans l'image.



a) MNS avec les traces de tracteur visibles horizontalement
(axe x = pixel de l'image ; axe y gauche = pixel de l'image ; axe y droite = m)

b) le modèle différentiel
(axe x = pixel de l'image ; axe y = profondeur en m)

c) le seuil de -0.01 cm suivi par un traitement de 7x7 d'ouverture et de fermeture
(axe x = pixel de l'image ; axe y = pixel de l'image)

Figure 49 : Extraction d'une rigole d'érosion basée sur un MNS avec une résolution de 4 cm

4.2. Extraction du volume accumulé en bas d'un champ de pommes de terre

Le haut des rigoles est extrait après un lissage et un seuil élevé. Le haut est affiné en utilisant la procédure de squelettisation⁴ (Figure 50).

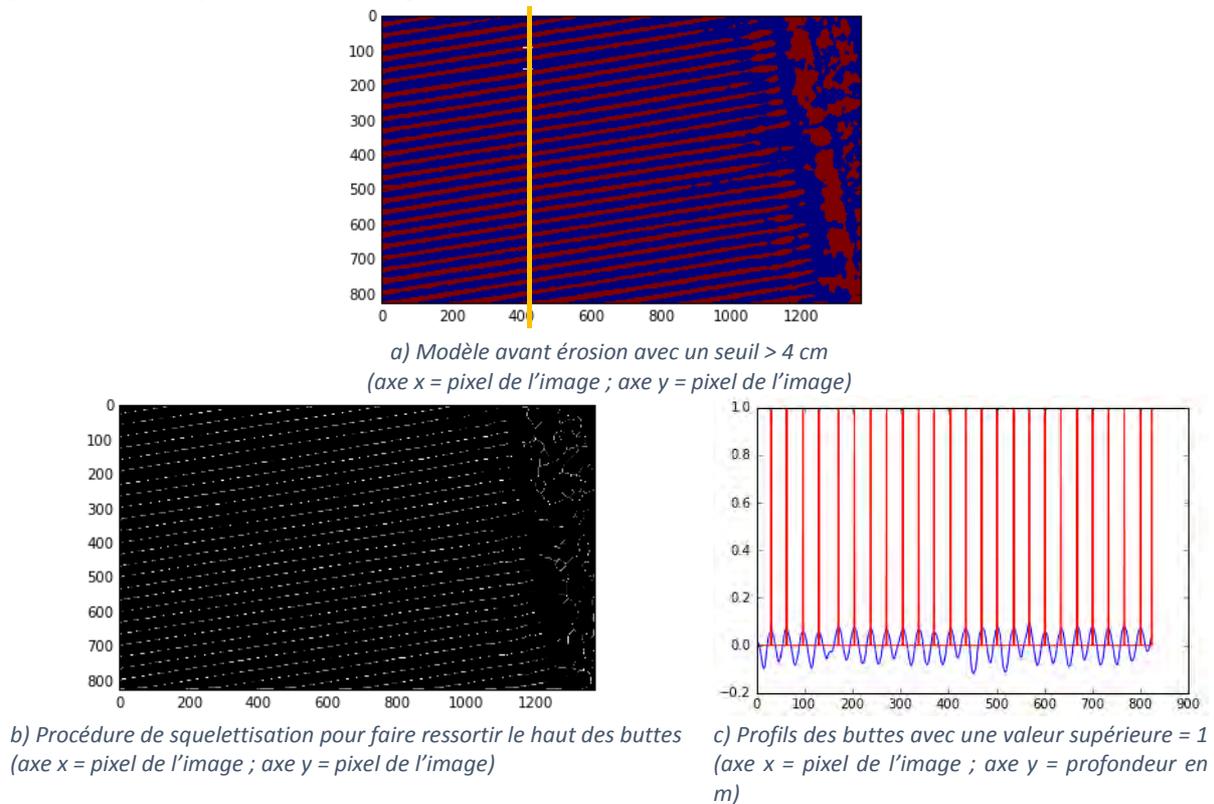


Figure 50 : Extraction des buttes de pommes de terre

Une fois que le haut des buttes est défini, il est possible d'estimer un profil moyen entre les buttes et de reconstruire la profondeur moyenne initiale. La différence entre la moyenne et le modèle numérique de surface réelle fournit des informations sur la terre perdue depuis le haut de la pente et sur l'accumulation de la terre en bas de pente. Ici, 38 profils sont calculés automatiquement (Figure 51).

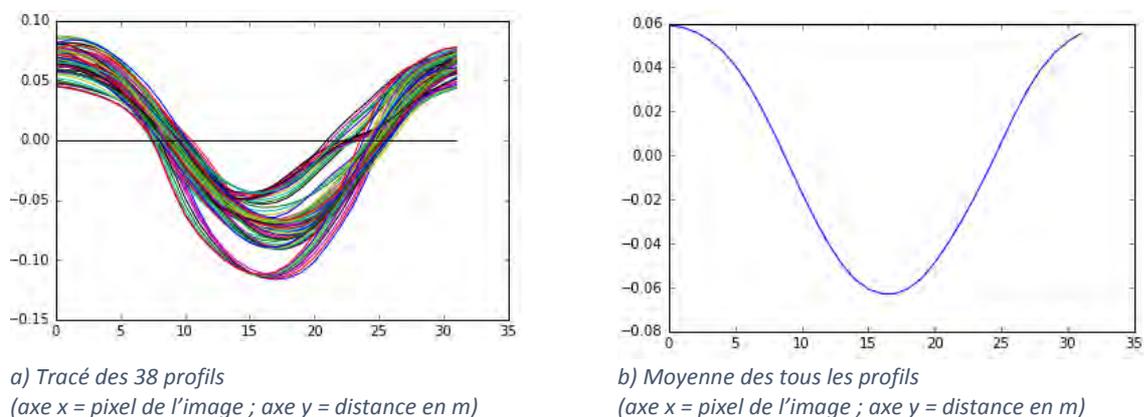
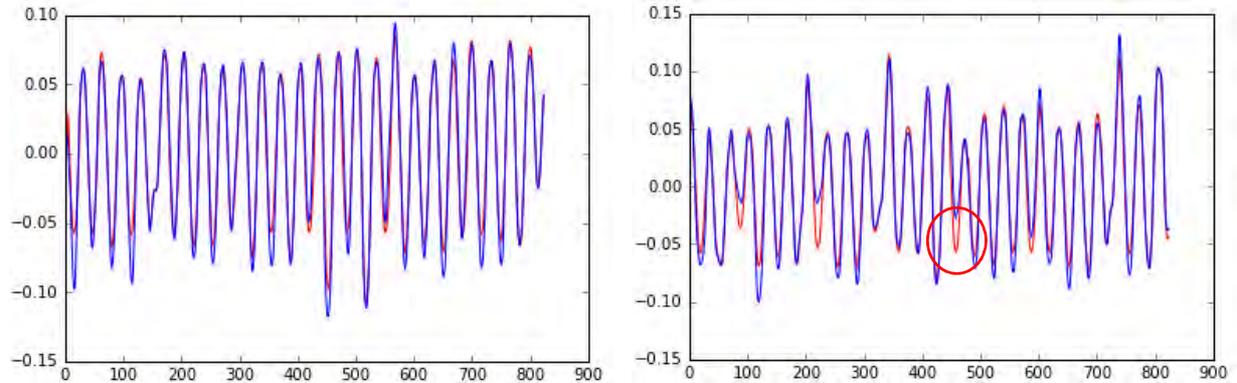


Figure 51 : Extraction des buttes de pomme de terre

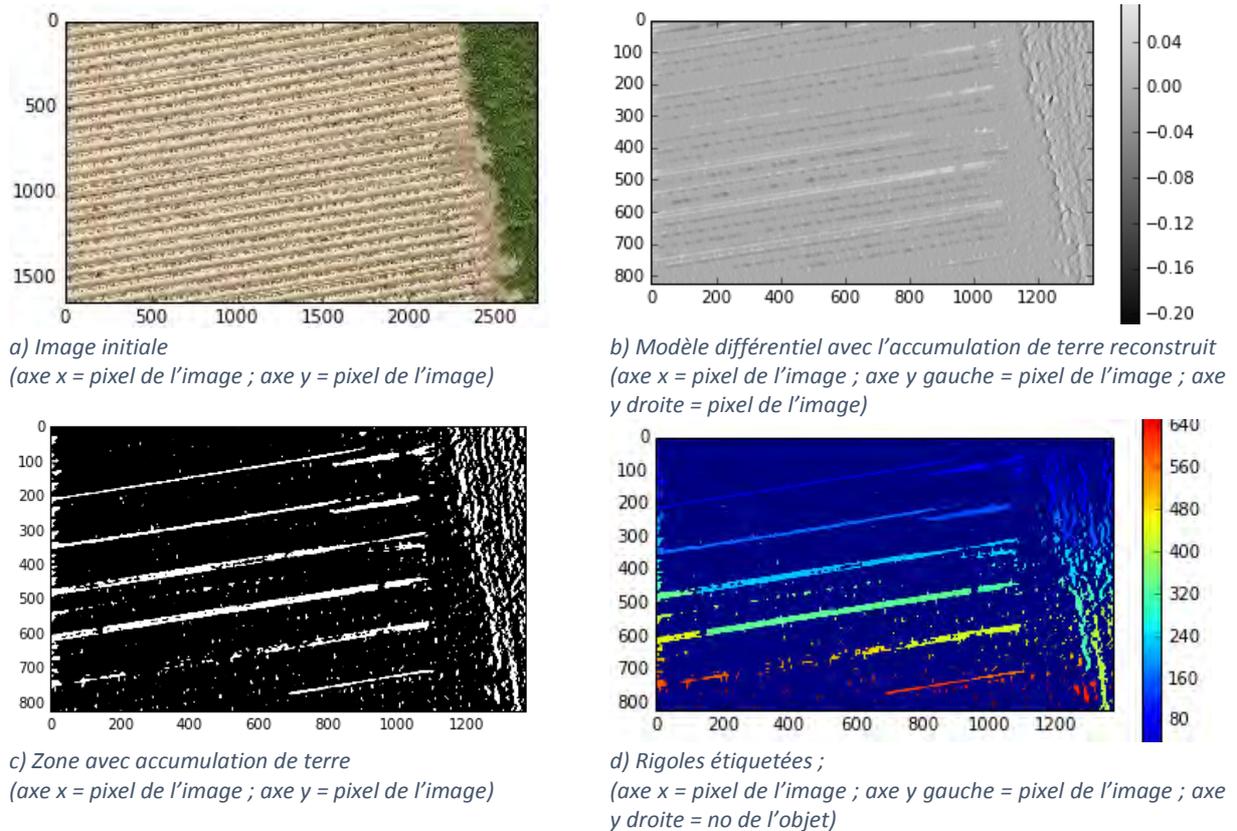
⁴ Procédure de squelettisation = amincissement successif (érosion conditionnelle)

L'algorithme trouve le haut des rigoles qui sont déterminées par la procédure de squelettisation et centre l'extraction du profil à une profondeur de 0 cm et en dessous. La procédure adaptative était nécessaire car la largeur des rangs n'était pas similaire à chaque point. La Figure 52 montre les profils reconstruits d'une zone non érodée et d'une zone avec accumulation.



a) Profil des buttes dans une zone non érodée (axe x = pixel de l'image ; axe y = m)
 b) Profil des buttes dans une zone d'accumulation (axe x = pixel de l'image ; axe y = m)
 Figure 52 : Reconstruction des profils de buttes de pomme de terre dans une zone érodée et dans une zone avec accumulation. En rouge = le profil reconstruit, en bleu = le profil initial du modèle numérique de surface. Le cercle rouge indique un rang avec une accumulation de terre

La différence entre les deux modèles peut être utilisée pour extraire la zone avec de l'accumulation et en calculer le volume (Figure 53).

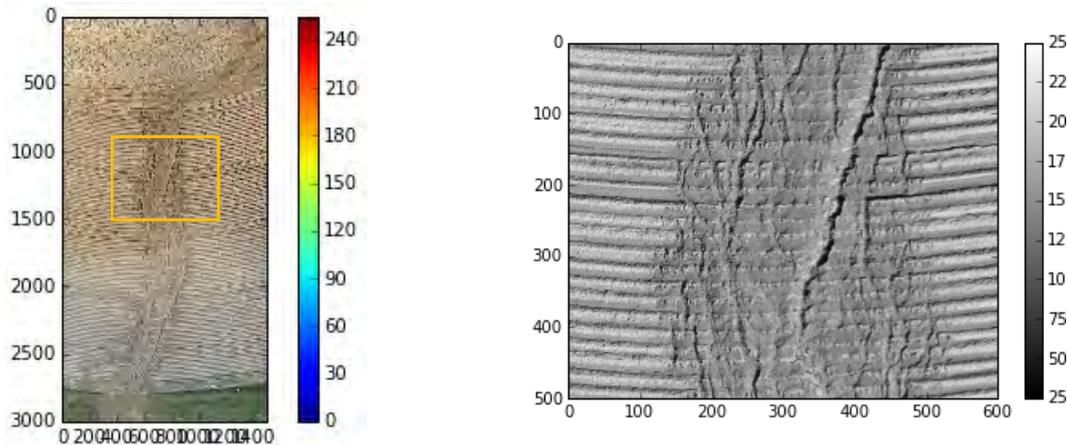


a) Image initiale (axe x = pixel de l'image ; axe y = pixel de l'image)
 b) Modèle différentiel avec l'accumulation de terre reconstruit (axe x = pixel de l'image ; axe y gauche = pixel de l'image ; axe y droite = pixel de l'image)
 c) Zone avec accumulation de terre (axe x = pixel de l'image ; axe y = pixel de l'image)
 d) Rigoles étiquetées ; (axe x = pixel de l'image ; axe y gauche = pixel de l'image ; axe y droite = no de l'objet)

Figure 53 : Exemple de calcul de l'accumulation de terre entre les rangs de butte de pommes de terre

4.3. Extraction des rigoles en utilisant les images RGB (red, green, blue)

Si le MNS n'a pas une qualité suffisante, il est possible d'utiliser les images RGB pour extraire les rigoles d'érosion (Figure 54). Les images sont transformées dans un système de couleur TSV (Teinte Saturation Valeur), HSV (Hue Saturation Value) afin de pouvoir extraire une couleur ou une luminosité donnée. Le contraste entre les rigoles et la couleur de fond est important. Les rigoles dont la végétation est arrachée engendrent un bon contraste entre le sol nu et la végétation encore en place : brun \leftrightarrow vert. Ce type de rigole est facile à extraire. L'extraction du volume n'est pas possible à cause des différences de relief inférieures à 1 cm, ce qui est incohérent avec la réalité du terrain. Les mêmes étapes que pour l'extraction basée sur le MNS sont utilisées, les seuils sont définis par les différences de bandes spectrales.

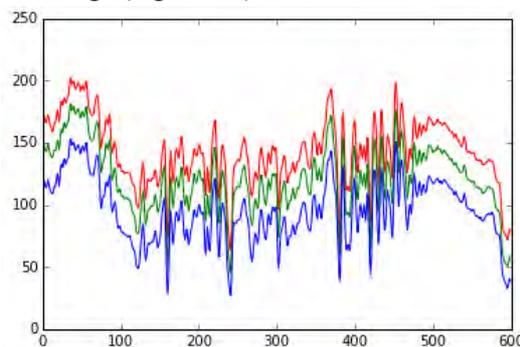


a) Image RGB d'une rigole complexe (axe x = pixel de l'image ; axe y gauche = pixel de l'image ; axe y droite = niveau de gris de la bande H (0-255))

b) Extraction d'une partie de la rigole en utilisant la bande H du système de couleur TSV (axe x = pixel de l'image ; axe y gauche = pixel de l'image ; axe y droite = niveau de gris de la bande H (0-255))

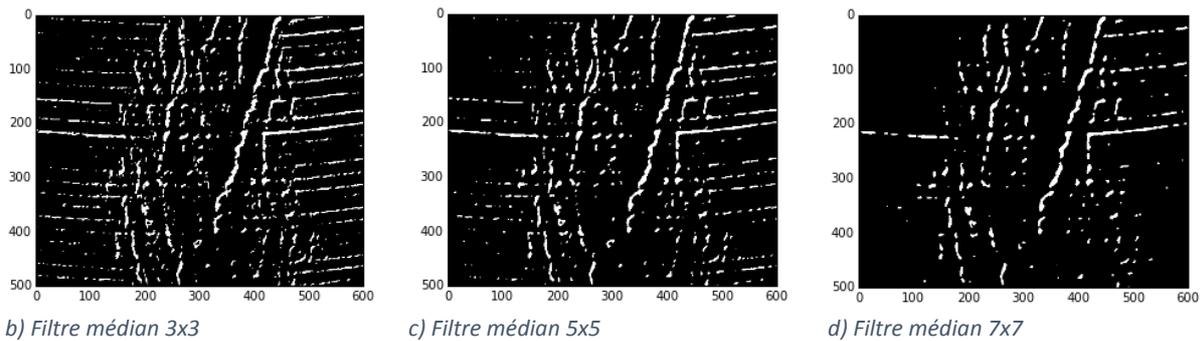
Figure 54 : Extraction d'une rigole en utilisant les images RGB

Un seuil de 70 est utilisé pour la bande S (saturation) du système de couleur TSV, suivi par plusieurs filtres médians. Le choix d'un filtre large conduit à une perte partielle de l'information mais permet de réduire le bruit présent sur l'image (Figure 55).



a) Profil colorimétrique

(axe x = pixel de l'image ; axe y = niveau de gris des bande H (rouge), S(vert), V(bleu) (0-255))



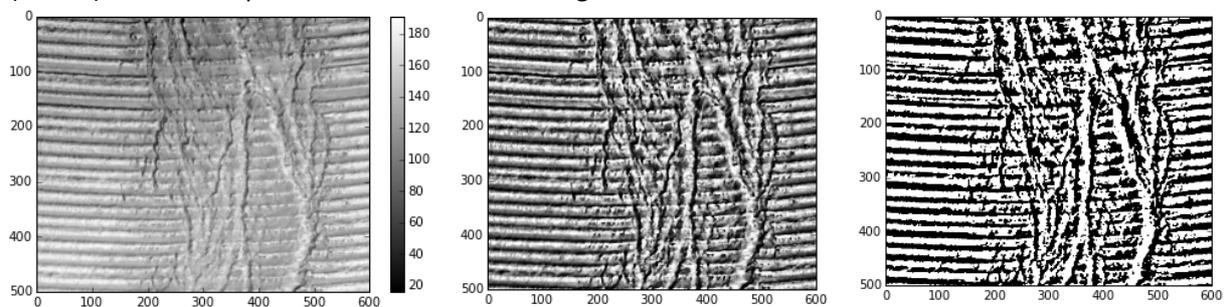
b) Filtre médian 3x3

c) Filtre médian 5x5

d) Filtre médian 7x7

Figure 55 : Effet de différentes tailles de filtres médians sur les rigoles et sur le bruit (pour b, c, d : axe x = pixel de l'image ; axe y = pixel de l'image)

L'image de la Figure 56a montre une échelle de gris différente liée à la différence de lumière. En utilisant ce type de seuil, il est nécessaire de corriger la luminosité de l'image pour ne pas avoir de zone entière extraite à cause d'une sur- ou sous-exposition. Il existe plusieurs fonctions de filtre local pour cela. La Figure 56 (b et c), montre le résultat de deux filtres égalisateurs sur la bande spectrale (valeur) donnant le plus d'information sur l'image TSV.



a) Image initiale

(axe x = pixel de l'image ; axe y gauche = pixel de l'image ; axe y droite = niveau de gris de la bande V (0-255))

b) Fonction rank.equalize avec 20 pixels de cercle locale (package scikit-image).

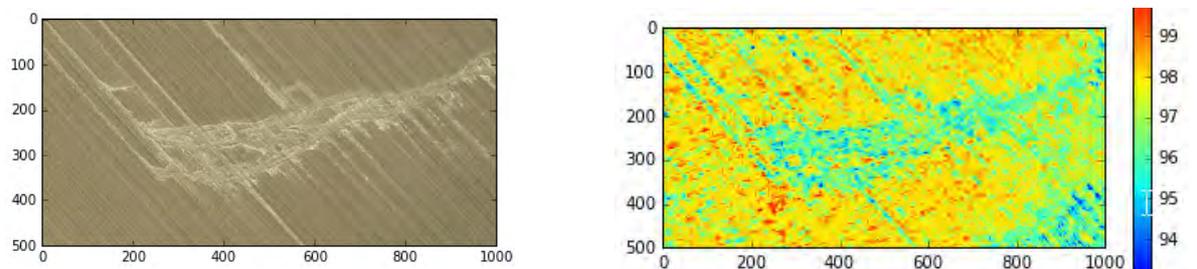
c) Fonction rank.equalize + amélioration du contraste (package scikit-image).

Figure 56 : Effet de deux filtres égalisateurs sur la bande spectrale V d'un système complexe de rigoles (pour b et c : axe x = pixel de l'image ; axe y = pixel de l'image)

L'homogénéisation de l'image permet une analyse ultérieure par seuil de l'image.

4.3.1. Résultats d'extraction d'un système complexe de rigoles avec des couleurs RGB

La bande spectrale offrant le plus d'information est celle de la saturation des couleurs du système de couleur TSV car les zones érodées sont plus pâles (Figure 57).

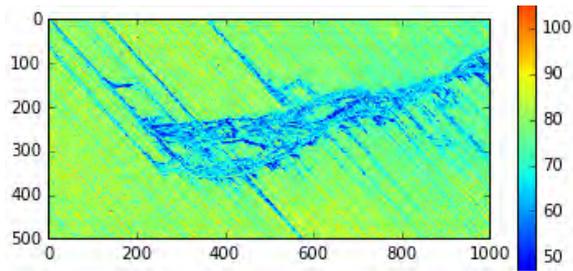


a) Image initiale

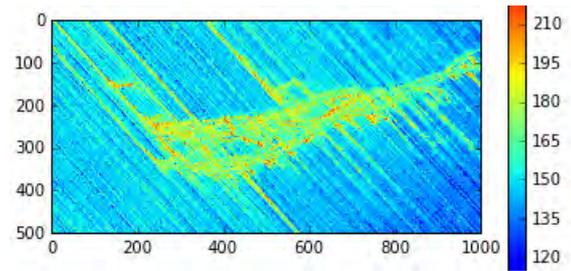
(axe x = pixel de l'image ; axe y pixel de l'image)

b) Bande T (teinte)

(axe x = pixel de l'image ; axe y gauche = pixel de l'image ; axe y droite = niveau de gris de la bande H (0-255))



c) Bande S (saturation)
 (axe x = pixel de l'image ; axe gauche = pixel de l'image ;
 axe y droite = niveau de gris de la bande S (0-255))



d) Bande V (valeur)
 (axe x = pixel de l'image ; axe y gauche = pixel de l'image ;
 axe y droite = niveau de gris de la bande V (0-255))

Figure 57 : Extraction des rigoles depuis une image RGB

La Figure 58 montre le résultat de l'extraction des rigoles par seuil sur la bande S. L'utilisation du seuil de 70 sur la bande S permet une délimitation des zones avec érosion. Cependant le seuil est assez étroit et cette méthode n'est pas appropriée pour une analyse d'autres images. La profondeur des rigoles ne peut pas être mesurée à cause de la résolution de 4 cm alors que les rigoles ont une profondeur de 5 à 10 cm (Figure 59). Cette méthode est peu généralisable et demande plus de réglages fins.

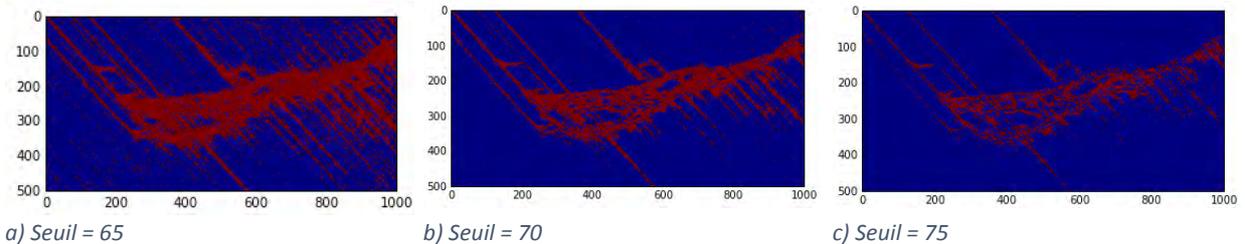
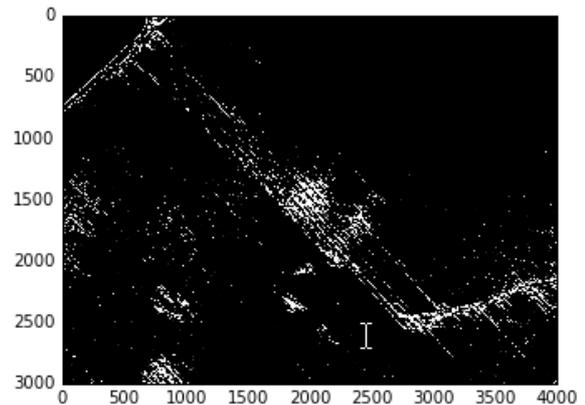


Figure 58 : Effet de l'utilisation de différents seuils pour l'extraction des rigoles sur la bande S
 (pour a, b, c : axe x = pixel de l'image ; axe y = pixel de l'image)



a) Image initiale



b) Extraction des rigoles basé sur la bande S

Figure 59 : Extraction générale basée sur des couleurs pâles
 (pour a et b : axe x = pixel de l'image ; axe y = pixel de l'image)

5. Rigole artificielle servant de référentiel

Cette partie du projet Air-osition s'inscrit dans le cadre du travail de Master d'André-Laurent Perruchoud (CHANGINS) (Perruchoud, 2017). La Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD), et plus précisément l'équipe de Bertrand Cannelle de l'Institut d'ingénierie du territoire du Département Environnement Construit et Géoinformation, a également participé à l'élaboration de ce référentiel en mettant notamment à disposition son matériel de géomatique, en participant aux mesures et en rédigeant une partie de ce chapitre.

5.1. Objectifs

Afin de valider la méthode de calcul de volume d'érosion basée sur des images prises par drone, une rigole artificielle est creusée. Pour cette partie du projet les objectifs sont :

- Valider la méthode des images aériennes par drone pour calculer le volume de terre érodée en se basant sur les mesures d'un laser scanner ;
- Comparer les résultats obtenus avec les images aériennes faites à différentes résolutions (4 ; 2 ; 1 ; 0.25 cm/px) ;
- Comparer les méthodes de mesures manuelles avec la méthode des images aériennes par drone.

La lasergrammétrie est, à l'heure actuelle, la méthode la plus performante pour mesurer une surface complexe réelle (autre que plan, sphère...). C'est pourquoi cette méthode utilisant un laser scanner est choisie comme méthode de référence pour la validation des autres méthodes. Cette technique permet de mesurer un ensemble de points 3D en un temps relativement restreint (100 000 pts par seconde) et avec une précision meilleure que le centimètre. Le laser scanner est un dispositif de mesure permettant de mesurer des millions de points en 3D en quelques minutes. Ce dispositif est lourd à mettre en place et nécessite du temps. De plus, le coût d'un laser scanner terrestre se situe entre 150'000 et 200'000 CHF. C'est pourquoi cette méthode est uniquement utilisée pour la validation et ne peut que difficilement être généralisée.

5.2. Matériel et méthodes pour la rigole artificielle

5.2.1. Création de la rigole

Une rigole artificielle d'une trentaine de mètre de long avec deux bras (Figure 60) est créée sur le site de Changins (Vaud) sur une parcelle de blé déchaumée de la station de recherche agronomique fédérale de l'Agroscope Changins.

Une fois la rigole creusée à la pioche et afin d'avoir une surface la plus régulière possible, le terrain est nivelé au râteau sur une longueur de 35 m et une largeur d'environ 12 m.

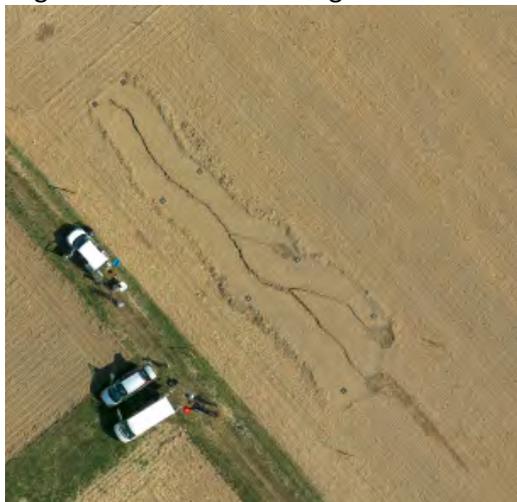


Figure 60 : Rigole artificielle sur le site de l'Agroscope Changins (Source CHANGINS)

Pour simuler les conditions réelles, mais également pour permettre une détection correcte lors de l'analyse des images, le fond de la rigole doit présenter un contraste suffisant, c'est pourquoi 1'200 litres d'eau y sont déversés (Figure 61). Cette fausse érosion permet de « laver » le fond de la rigole et d'ainsi faire apparaître les cailloux rincés par l'écoulement de l'eau.



Figure 61 : Simulation de l'érosion dans le fond de la rigole artificielle (Source CHANGINS)

Pour pouvoir comparer les techniques de mesures entre elles (photogrammétrie par drone, mesures manuelles et au laser scanners), il est nécessaire de créer un référentiel commun. Pour cela, un relevé tachéométrique (outil traditionnel du géomètre, Figure 62a) est réalisé. Il permet de mesurer des points très précisément en 3D. La Figure 62b, c et d montre les types de point levés par tachéométrie.



Figure 62 : Tachéomètre et cibles levés dans le référentiel commun (Source HEIG-VD)

Une fois les mesures tachéométriques acquises et le traitement fait, chacun des points possède des coordonnées 3D précises. Ensuite, chaque technique (drone, laser scanner, levés manuels à 0.25 cm) est mise en œuvre à tour de rôle. Les profils propres à chaque technique peuvent ainsi être directement comparés parce qu'ils sont dans le même référentiel.

5.2.2. Acquisition des données et méthodologie d'analyse

- Mesures manuelles

La méthode manuelle est celle expliquée au paragraphe 3.1.1. Les mesures sont effectuées tous les 0.25 m. Ceci représente une quantité de données considérablement plus élevée que lors des campagnes de terrain habituelles (tous les 1 à 2 m), mais cela est fait dans le but d'être le plus exhaustif possible afin de pouvoir comparer les méthodes. Bien sûr pour le calcul du volume, les mesures à 1 et 2 m ont également été considérées pour être au plus proche de ce qui se fait dans la réalité.

La méthode pour estimer le volume de terre érodée est la même que dans le reste du projet Air-rosion, cependant une troisième formule est utilisée. Il s'agit de la méthode complète de Prasuhn et Fischler (2007) qui préconise de calculer la largeur moyenne (haut et bas) de la rigole ce qui

peut s'avérer être une opération délicate et fastidieuse. Etant donné que cette décision a été prise après coup, la largeur du fond de la rigole a été définie sur la base des nuages de points issus du relevé au laser terrestre de surface. Les mesures ainsi récoltées présentent une bonne fiabilité (communication personnelle B. Cannelle, le 08.02.2017) et sont ajoutées aux données récoltées sur le terrain. Ainsi il est possible d'utiliser la formule du trapèze qui devrait aboutir à une meilleure évaluation manuelle du volume de sol érodé en intégrant les différents segments de la rigole.

- Mesures par drone

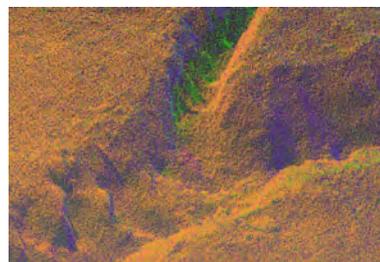
Les drones qui ont servi pour l'acquisition des images aériennes sont le eBee de CHANGINS et l'hexacoptère de la HAFL (voir paragraphe 3.2.1.). Plusieurs vols ont été effectués à différentes résolutions à savoir 4, 2, 1 et 0.25 cm/px. L'objectif est de tester ces différentes résolutions afin de voir laquelle est la plus adéquate en fonction de la précision obtenue et de la quantité de données engendrées. Plus la résolution est petite/précise plus la quantité de données est importante.

- Laser scanner terrestre

Le laser scanner utilisé pour cette expérimentation est un Riegl VZ1000⁵. Six positions de scanner ont été nécessaires pour mesurer l'entier de la rigole. En effet, la rigole n'étant pas rectiligne, il n'était pas possible de la mesurer entièrement depuis une seule position. En la mesurant depuis différents endroits, les parties cachées sont minimisées et la « microtopographie » de la rigole peut aussi être mesurée. La Figure 63a ci-dessous présente le dispositif ainsi que le déroulement d'une acquisition d'une station de scan. La Figure 63b présente le nuage de points final, acquis depuis plusieurs endroits (une couleur de point par position de scan).



a) Exemple d'une station de scan



b) Nuage de points issu de la fusion des 6 stations (1 couleur par station)

Figure 63 : Déroulement et résultat d'un levé via laser scanner (Source HEIG-VD)

En tenant compte des spécifications du laser scanner et du recalage, la précision est de l'ordre de 5 mm, il faut comparer cette valeur à la granulométrie d'un champ labouré qui est, dans le meilleur des cas, du même ordre de grandeur. La densité de points est supérieure à 10 pts par cm² sur la zone de la rigole, ce qui permet de modéliser la moindre aspérité du terrain et de pouvoir calculer aussi bien des profils que des volumes fins et précis.

Les profils ont ensuite été extraits (automatiquement) du nuage de points tous les 25 cm comme dans le cas du levé manuel (Figure 64).

⁵ <http://www.riegl.com>



Figure 64 : Exemple de coupes extraites automatiquement

Dans le cadre du travail de comparaison détaillée des méthodes (Perruchoud, 2017), l'analyse s'est portée sur les 10 premiers mètres de la rigole.

Pour traiter les données du laser, le logiciel Cloud Compare est utilisé (D. Girardeau-Montaut). CloudCompare est un logiciel libre d'édition et de traitement des nuages de points en 3D qui, entre autres fonctionnalités, octroie une importance particulière au champ scalaire. Le volume de la rigole est calculé en appliquant une méthodologie au plus près de celle de la mesure manuelle :

1. Des sections de 25 cm dans le sens de la pente et de 1 m perpendiculairement à la pente sont délimitées (Figure 65a). Pour chaque section, le point d'inflexion de part et d'autre de la rigole est considéré comme la hauteur du sol avant l'épisode érosif (Figure 65b), de façon équivalente à la méthode manuelle précédemment décrite. Tous les points situés en-dessous de cette couche constituent le fond de la rigole (Figure 65c) ;
2. Le volume contenu de chaque segment de 25 cm entre la surface du sol avant érosion et le fond de la rigole est alors calculé par l'outil Compute 2.5D volume de CloudCompare. Cette opération est répétée pour chaque section de 0.25 x 1 m ;
3. Le calcul est ensuite répété avec les différentes résolutions appliquées aux données laser. Lors du paramétrage de Compute 2.5D volume, l'outil a besoin de la dimension du maillage à appliquer sur le nuage de point, en sachant que chaque cellule contiendra la moyenne des valeurs X, Y et Z pour tous les points du nuage qu'elle englobe. Aussi, les résolutions sont choisies en fonction de celles des prises de vue aériennes, c'est-à-dire, par pixel, 2.5 mm, 10 mm, 20 mm et 40 mm.

La fonction d'interpolation est activée afin de remplir les cellules vides par la moyenne des valeurs des pixels environnants les plus proches. Cette étape s'avère indispensable afin de comparer l'algorithme du laser et celui de l'imagerie aérienne. Sans standardisation de la taille des pixels entre les données, les différences de résolutions apporteraient un biais important aux résultats, diminuant par là leur fiabilité.



a) Section de 0.25 x 1 m.

b) Séparation de la hauteur du sol

c) Séparation du fond

Figure 65 : Illustrations du travail sur le nuage de points du laser

Les mesures manuelles se sont basées sur le découpage des sections tous les 25 cm. Pour la comparaison avec les mesures du drone, le découpage des sections a également été réalisé.

5.3. Résultats pour l'ensemble de la rigole

Le calcul du volume de la rigole avec le laser scanner est effectué par tronçon par l'équipe de Bertrand Cannelle de la HEIG-VD (Figure 66). Le Tableau 9 montre le volume calculé pour chaque tronçon. Au total le volume de la rigole d'érosion, calculé avec le laser, est de 1.087 m³. Cette mesure sert donc de référence.



Figure 66 : Division de la rigole artificielle en 5 tronçons pour faciliter le calcul du volume

Nom	ID	Volume	Unité
Tronçon 1		0.399	m ³
Tronçon 2		0.035	m ³
Tronçon 3		0.280	m ³
Tronçon 4		0.103	m ³
Tronçon 5		0.270	m ³
Total		1.087	m³

Tableau 9 : Résultat du calcul du volume de la rigole d'érosion pour chaque tronçon avec le laser scanner (référentiel)

Les résultats ci-dessous (Tableau 10), calculés en fonction des différentes résolutions et manuellement, montrent qu'une résolution de 2 cm/pixel est un bon compromis pour pouvoir estimer un volume de terre érodée en ayant une quantité de données raisonnable. La résolution à 4 cm/pixel n'est pas suffisamment précise pour pouvoir calculer correctement le volume. Le résultat avec une résolution de 1 cm/pixel est la plus proche de la référence avec 6 % de différence. Cette résolution engendre une quantité de données trop importante pour une généralisation de la méthode, cependant elle devrait être utilisée pour un calcul très précis du volume si la pratique l'exige. Quant à la résolution de 0.25 cm/pixel, elle génère trop de bruit lors du traitement des images ce qui n'aboutit pas un résultat concluant.

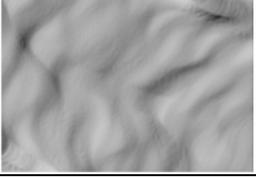
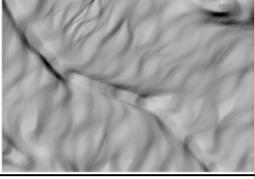
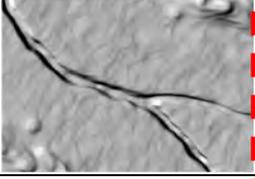
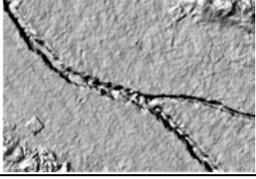
Laser scanner (référence)	Manuellement	4 cm/pixel	2 cm/pixel	1 cm/pixel	0.25 cm/pixel
					
					
1.09 m³	1.5 m ³	Pas assez précis	0.97 m ³	1.03 m ³	0.93 m ³
Réf.	+ 39 %		- 11 %	- 6 %	- 15 %

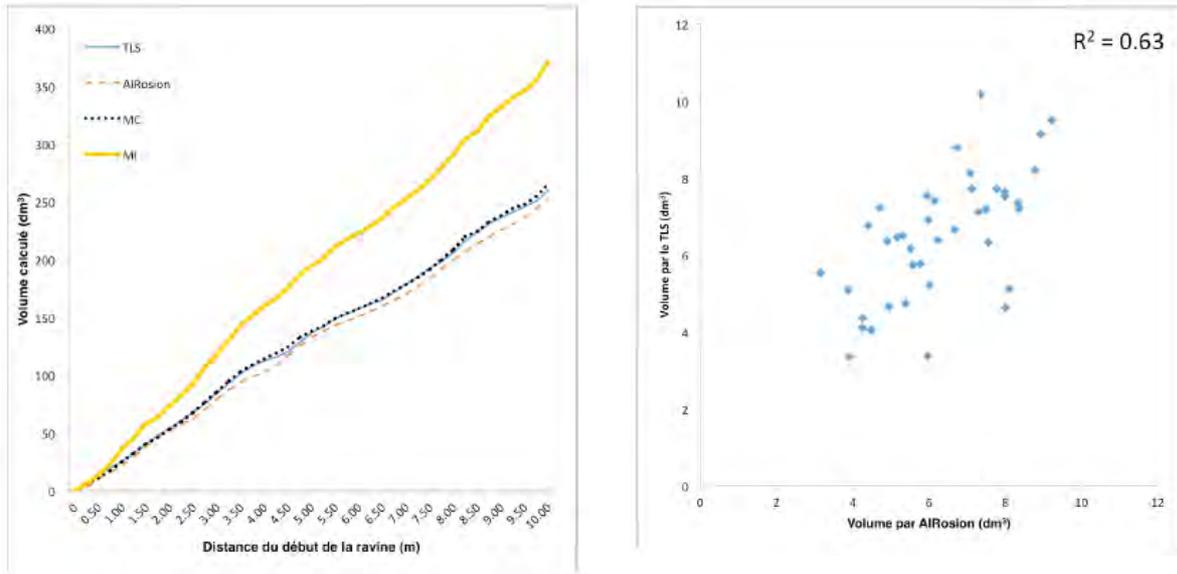
Tableau 10: Résultats du calcul de la rigole d'érosion en m³ en fonction des différentes mesures.

5.3.1. Comparaison détaillée des méthodes pour les dix premiers mètres de la rigole

Le travail de Master d'André-Laurent Perruchoud (Perruchoud, 2017) repose sur la comparaison détaillée des dix premiers mètres de la rigole. Ces dix mètres sont découpés en sections de 25 cm. Comme mentionné dans la partie "acquisition des données" (5.2.2.), les résultats du laser et du drone doivent être confrontés avec des tailles de cellule identiques afin de comparer la précision des méthodes et non les différentes résolutions. Par exemple, le résultat du MNS d'une résolution de 0.25 cm/px a été comparé à celui du laser scanner dont le maillage a été paramétré à 0.25 cm/px. En mettant en parallèle les résultats des deux algorithmes à résolutions identiques, il est possible d'évaluer la cohérence de la méthode des images aériennes sans que la performance des instruments de mesure induise de biais.

Les résultats de la mesure manuelle avec les formules géométriques décrites (3.1.1) est ici appelée méthode initiale (MI), la méthode décrite par Prasuhn et Fischler (2007) est appelée ici méthode corrigée (MC), les résultats du laser sont indiqués sous TLS et, pour finir, les résultats de la méthode des images aériennes sont représentés sous le nom d'Air-osion.

Avec une résolution de 1 cm/px, la Figure 67a montre des résultats proches, sauf pour la méthode de mesure manuelle utilisant les formes géométriques (MI). L'analyse du nuage de points donne un coefficient de détermination de R^2 de 0.63 (Figure 67b).

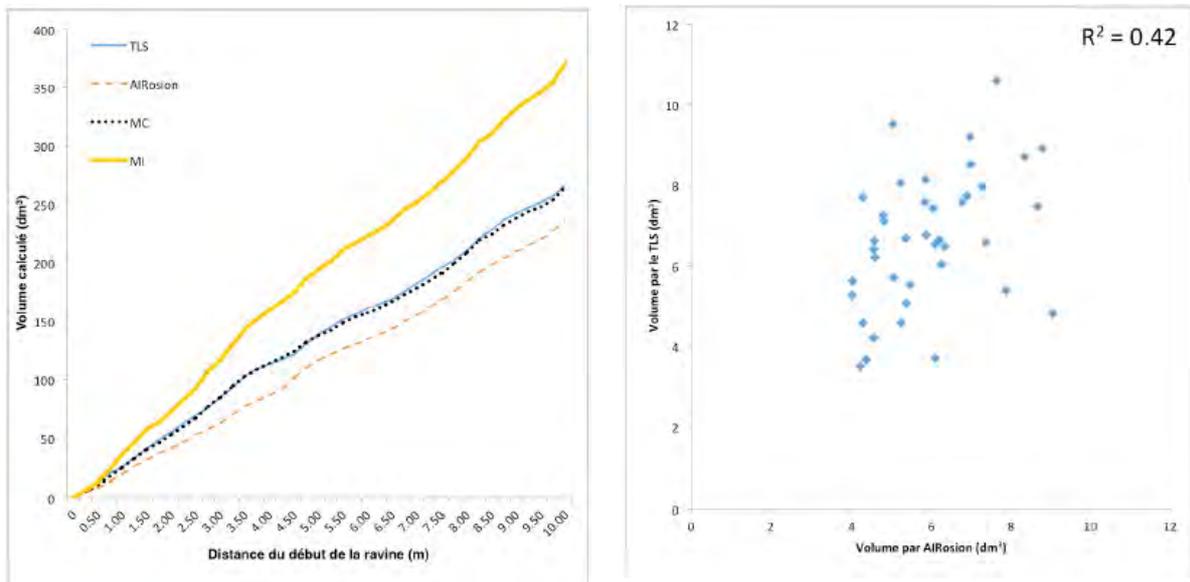


a) Calcul du volume cumulé de la rigole

b) Distribution du nuage de points

Figure 67: Calcul du volume avec une résolution de 1 cm/px

Avec une résolution de 2 cm/px, les résultats sont proches pour la méthode de mesure manuelle complète (MC) et les mesures laser. Une petite sous-estimation est observée avec la méthode des images aérienne (Air-osion). Une surestimation pour la méthode de mesure manuelle utilisant les formes géométrique (MI) est également visible avec cette résolution (Figure 68a). L'analyse du nuage de points donne un coefficient de détermination de R^2 de 0.42 (Figure 68b).



a) Calcul du volume cumulé de la rigole

b) Distribution du nuage de points

Figure 68: Calcul du volume avec une résolution de 2 cm/px

Il est certain que, sur le terrain, les relevés ne sont pas faits tous les 25 cm mais usuellement plutôt tous les 1 à 2 mètres. Par manque de temps, le calcul du volume érodé de l'ensemble de la rigole basé sur la méthode complète de Prasuhn et Fischler (2007) n'a pas pu être réalisé. Il serait intéressant de compléter ce point afin de pouvoir l'ajouter dans le tableau comparatif des méthodes

(Tableau 10). En termes de validation de la méthode des images aériennes, il est démontré que cette dernière fournit des résultats suffisamment précis avec une résolution de 2 cm par pixel, et d'autant plus avec une résolution de 1 cm par pixel.

La méthode d'analyse par images aériennes par drone est donc validée comme méthode adéquate pour calculer le volume de terre érodée.

6. Conclusion et perspectives

De manière générale, la collaboration entre les différentes institutions partenaires du projet Air-osion a permis de mettre en réseau les compétences et les ressources nécessaires afin d'établir un suivi de l'érosion sur une partie du Plateau Suisse.

Système d'alarme ERMS

Le système d'alarme ERMS basé sur les données CombiPrecip a permis de localiser les cellules présentant de fortes pluies (> 10 mm/h). Ces cellules ont été ensuite mises en lien avec la carte des risques d'érosion ERK2. La combinaison de ces deux jeux de données n'a pas permis la localisation précise des événements érosifs (tels qu'observé sur le terrain) probablement à cause de la taille de la maille des données CombiPrecip (1x1 km) et de la non prise en compte du facteur couverture du sol de la carte ERK2.

Une perspective à étudier est de créer un géoportail auprès des services cantonaux de la protection des sols pour la saisie des observations de dégâts d'érosion sans risque de condamnation, rétorsion ou amendes. Il s'agirait d'une plateforme « Crowdsourcing » pour les exploitants agricoles qui seraient prêts, dans le cadre d'un nouveau projet, à documenter rapidement les dégâts pour une meilleure évaluation des situations. Cette nouvelle approche permettrait de ne plus devoir effectuer des trajets en voiture un peu à l'aveugle à la recherche de dégâts d'érosion comme dans le cadre du projet Air-osion. De plus cela permettrait de favoriser considérablement la mise en réseau entre les exploitants. Il est très important de souligner que ce géoportail servirait uniquement à la collecte de données.

Actuellement trois nouvelles stations radar sont construites en Suisse, ainsi le réseau de radar actuellement disponible va être amélioré dans les années à venir. Grâce à cela, le modèle CombiPrecip utilisé dans le projet Air-osion pourra proposer qualitativement de meilleures données dans le cadre d'un nouveau projet. Elles permettront de localiser de manière plus précise la distribution des fortes précipitations. En outre, les données d'occupation des sols du programme Copernicus⁶ sont également disponibles. Il s'agit de données multi-spectrales des satellites Sentinel A et B en libre accès, avec une résolution spatiale de 10 m. Depuis juin 2017, elles sont disponibles tous les 5 jours. Cela permettra une observation précise du développement du couvert végétal pendant les périodes critiques des semis, lorsque le sol est nu. Ainsi il sera possible de localiser précisément les zones à risque d'érosion grâce aux informations suivantes : fortes précipitations, occupation du sol, espèce végétale, longueur et déclivité de la pente. Dans l'idée d'un nouveau projet avec les données CombiPrecip, il faudrait également mettre en place un suivi de terrain beaucoup plus intense, donc nécessitant plus de moyens ou une collaboration accrue avec les exploitants des sites déterminés. Ceci afin de pouvoir corréliser les données météo in situ, à la fois avec les cartes fournies par le système CombiPrecip et les observations de dégâts sur le terrain.

⁶ Nouveau programme européen pour l'observation de la terre www.copernicus.eu

De surcroît, parmi les nouvelles données disponibles dès 2018, il y aura également une nouvelle carte des risques d'érosion ERK2 actuellement développée à l'Institut géographique de l'Université de Bern par Pascal Bircher, une carte des risques pour les prairies dans les zones de montagne en voie d'être terminée par l'Institut des géosciences de Bâle, ainsi que les données GELAN (abréviation de l'allemand Gesamtlösung EDV Landwirtschaft und Natur) avec des informations précises sur les prestations écologiques requises, les vignes, les fruitiers et les autres cultures pérennes. Ces données, mises à niveau dans le cadre de l'application de la législation environnementale et agricole, devraient être disponibles pour chaque canton dès 2018 et pourraient ainsi être utilisées et valorisées dans un futur projet.

La comparaison entre les données du système d'alarme d'un côté, les données de trois stations Agrometeo et des visites de terrain de l'autre a montré que le système d'alarme ERMS signalait 80 % des phénomènes pluvieux d'intensité supérieure à 10 mm/h à l'échelle de la région d'étude. Ce taux passe à 93 % dans le cas d'intensités dépassant 20 mm/h. L'outil ERMS est donc utilisable à un niveau régional.

Cependant, dans l'état actuel de développement de l'outil ERMS, il semble que la localisation fine de ces phénomènes manque de précision. En outre, il conviendrait de se pencher sur un éventuel problème de "blindzones". Enfin, il serait intéressant de pouvoir considérer d'autres types de précipitation tels que la grêle. En effet, la rigole documentée sur le site n° 4 HEIA-FR en avril 2016 est apparue suite à un orage de grêle (information donnée par l'agriculteur, entretien téléphonique du 27.04.2016).

Un autre aspect, qui n'est pas pris en compte actuellement dans le système d'alarme, est le taux d'humidité des sols au moment où survient un événement pluvieux. Si un suivi plus strict est imaginé, il faudrait absolument prendre en compte cet élément dans la recherche et voir si les alertes permettent de sommer les pluies successives et prédire l'engorgement des sols, plus susceptibles alors de subir une érosion.

L'observation et les mesures sur le terrain

Concernant la méthode de mesure manuelle, le travail de Master d'André-Laurent Perruchoud (Perruchoud, 2017) montre clairement que la méthode des formules géométriques (triangle ou rectangle), bien que plus rapide, mène à une surestimation systématique du volume, alors que la méthode de Prasuhn et Fischler (2007), qui nécessite la mesure de la largeur de la rigole en surface et en profondeur, fournit des résultats bien plus précis.

Le travail de Master de Laura Ebnetter (Ebnetter, 2017) sur l'observation de l'environnement parcellaire au-travers des données du questionnaire WOCAT modifié, permet une bonne compréhension des phénomènes érosifs à l'échelle du sous bassin versant et montre l'importance d'une étude au cas par cas. Il en ressort que les facteurs qui agissent sur les phénomènes érosifs sont : les types de machines travaillant le sol, le manque de couverture du sol, les grandes surfaces d'écoulement qui contribuent à l'érosion, les parcelles avec de longues pentes, la canalisation de l'écoulement de surface par les raies de charrue, les sillons de pomme de terre, les voies de passage des tracteurs, la rotation de cultures intensives ou l'accumulation de l'écoulement dans les talwegs. Ces facteurs ne sont pas généralisables d'où l'importance d'étudier chaque situation en détail.

Dans la partie aérienne du projet Air-losion, il est observé qu'il est important de bien définir les paramètres du capteur et du plan de vol pour avoir des données de qualité et de les adapter en fonction de l'échelle d'étude. Il est montré qu'une résolution de 4 cm/px est suffisante pour une analyse de l'écoulement de l'eau à l'échelle d'un sous bassin versant, alors que, pour pouvoir calculer un volume de manière précise, il est nécessaire d'avoir une résolution plus élevée (1 à 2 cm/px). Pour comprendre l'écoulement de l'eau, il faudrait encore tester la faisabilité d'une résolution plus grande qui permettrait de diminuer le poids des données et les temps de vol, tout en restant suffisamment

précis pour l'analyse. Ainsi les images aériennes pourraient aussi être prises par d'autres types d'aéronef en fonction de la surface qu'il faudrait survoler. En outre, les drones, les capteurs et les logiciels se sont améliorés et se sont beaucoup développés depuis l'appel d'offre du projet Air-osion en 2014. Les capteurs LIDAR pour drone permettent aujourd'hui d'obtenir des données beaucoup plus précises pour les modèles de surface et permettent des analyses multi-spectrales des terres cultivées. Enfin, l'utilisation de point de contrôle au sol (GCP) donne une meilleure précision, car elle garantit la calibration verticale du modèle numérique de surface avant érosion.

L'analyse des images à haute résolution et la validation de la méthode

L'analyse des images dépend fortement de la qualité des images initiales prises par le drone. Les méthodes semi-automatiques développées dans le cadre du projet Air-osion permettent la visualisation, l'analyse qualitative et parfois quantitative de l'érosion après un fort événement pluvieux ou une période de pluies. Les objectifs initiaux ont bien été atteints. Il est en effet possible d'extraire les rigoles d'érosion et de calculer leur volume, même dans des cas compliqués comme celui des champs de pommes de terre, pour autant que les limites de la méthode sélectionnée soient prises en compte, de même que le type de support (MNS ou orthophoto RGB). Le support optimal pour pouvoir extraire et calculer le volume reste le MNS. La validation de la méthode est prouvée grâce à la comparaison avec les mesures du laser scanner. Bien entendu la résolution des images initiales dépendra de la précision souhaitée.

Dans le cadre d'une suite au projet Air-osion, il serait possible d'aller encore plus loin en s'appuyant sur les nouvelles géodonnées disponibles (nouvelle carte ERK2, amélioration des données CombiPrecip, données Sentinel, etc.). Ces données permettraient une meilleure localisation des zones à risque que ce n'est actuellement le cas.

Comme les phénomènes d'érosion ne sont pas liés uniquement à un seul facteur, ils sont difficilement généralisables. Ainsi, une étude au cas par cas à l'échelle d'un sous bassin versant, déterminé grâce aux nouvelles géodonnées, permettrait la compréhension de la dynamique hydrique sur l'ensemble de ce sous bassin de référence. L'analyse de ce dernier grâce à un MNS précis de la zone ainsi qu'aux observations de l'environnement parcellaire (WOCAT) permettrait d'identifier plus précisément les causes et proposer directement des solutions adéquates. Cet outil serait plus en adéquation avec les besoins de la profession. La complémentarité de cette approche est nécessaire pour faire le lien entre le risque et la réalité (approche downscaling). De plus, avec les changements de la nouvelle ordonnance sur les paiements directs, il sera possible de faire une séparation en fonction des causes (cultures, événements extrêmes, etc.). Au niveau de la méthodologie permettant de trouver des solutions, la documentation des cas d'érosion au niveau du bassin versant (paragraphes 3.1.2 et 3.1.3) est probablement la plus efficace. Elle permet d'analyser les causes de la problématique érosive dans une zone donnée et de chercher une solution adaptée. Elle permet aussi de différencier en première approche si les causes sont d'ordre cultural ou lié aux infrastructures, rendant ainsi plus réaliste l'application de l'ordonnance sur les paiements directs. C'est un support intéressant pour la discussion des différentes parties prenantes (producteurs, commune, AF, etc.). Un développement d'une marche à suivre structurée permettra probablement d'analyser et de trouver des solutions efficaces.

7. Remerciements

Les partenaires du projet Air-osion remercient le mandant l'Office fédéral de l'Environnement pour le projet et pour sa confiance.

Ils remercient également tous les agriculteurs qui ont autorisé l'accès à leur parcelle, ainsi que les différents observateurs qui ont annoncé des phénomènes érosifs. Sans eux, il n'aurait pas été possible d'obtenir des données.

Un dernier merci à l'équipe de Bertrand Cannelle de la HEIG-VD pour son travail de validation sur la rigole artificielle.

Références

Ebneter L., 2017. Bodenerosion bei Starkniederschlägen im Schweizer Mittelland – Eine Analyse von Ursachen und Massnahmen mit und für LandwirtInnen. Masterarbeit, Universität Bern, 145 p.

Farnos A., 2015. Soil erosion in Switzerland: quantification methodology using very high-resolution aerial images. Master SET – MAEVA, Université Aix Marseille, 35 p.

Gisler S., Liniger H., Prasuhn V., 2010. Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur Erosionsrisikokarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz im 2x2-Meter-Raster (ERK2). Bern: Centre for Development and Environment (CDE), 55 p.

Grebner D., Roesch T., Schwarb M., 1999. Extreme Gebietsniederschläge unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1981-1993. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.5, Bern.

Guerra A.J.T., Fullen M.A., Jorge M.C.O., Bezerra J. F. R., Shokr M. S., 2017. Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review. *Pedosphere* volume 27(1), pp. 27–41.

Klaus D.P., d'Oleire-Oltmanns S., Ries J.B., Marzloff I., Ait Hssaine A., 2014. Soil erosion in gully catchments affected by land-levelling measures in the Souss Basin, Morocco, analysed by rainfall simulation and UAV remote sensing data. *Catena*, volume 113, pp. 24–40.

Perruchoud A-L., 2017. Quantification de l'érosion linéaire sur les sols agricoles : l'imagerie aérienne à très haute résolution grâce aux drones. Maîtrise universitaire ès Sciences en biogéosciences Master of Science in Biogeosciences, Université de Lausanne et Université de Neuchâtel, 63 p.

Pineux N., Lisein J., Swerts G., Biielders C.L., Lejeune P., Colinet G., Degré A., 2017. Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion in an agricultural watershed? *Geomorphology* volume 280, pp. 122–136.

Prasuhn, V., Liniger H., Gisler S., Herweg K., Candinas A., Clément J-P., 2013. A High-Resolution Soil Erosion Risk Map of Switzerland as Strategic Policy Support System. *Land Use Policy* 32, pp. 281–91.

Prasuhn V., et Fischler M., (2007). Fiche technique : érosion. *Revue UFA, Production végétale* 8, 1-8.

Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder D.C., (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture-Agriculture Handbook No. 703.

Sideris I.V., 2014: The CombiPrecip Experience. Development and operation of a real-time radar-raingauge combination scheme in Switzerland.

Vanwalleghema IT., Gómezb J.A., Infante Amatec J., González de Molinac M., Vanderlindend K., Guzmánb G., Lagunae A., Giráldezampact J.V., 2017. Impact of historical land use and soil management change on soil erosion and agricultural sustainability during the Anthropocene. *Anthropocene*, volume 17, pp. 13–29.

Wischmeier W. H., and Smith D. D. (1965). Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Agr. Handbook No. 282, U.S. Dept. Agr., Washington, DC.

Wischmeier W. H., and Smith D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. Agr. handbook No. 537, U.S. Dept. of Agr., Science and Education Administration.

Annexes

Annexe 1

Nombre de forte pluie (> 10 mm/h) / événement pluvieux (bleu) ; nombre d'heure de pluie par événement pluvieux (rose)

Annexe 2

Sélection d'alertes ERMS proches des journées de terrain ou centrées sur la région d'étude et détail des observations de terrain sur les divers sites

Annexe 3

Représentation de toutes les alarmes ERMS d'avril à décembre 2016 ainsi que tous les jours où les intensités de pluie, fournies par Agrometeo, étaient supérieures à 10 mm/h

Annexe 4

Comparaison données Agrometeo et données terrain

Annexe 5

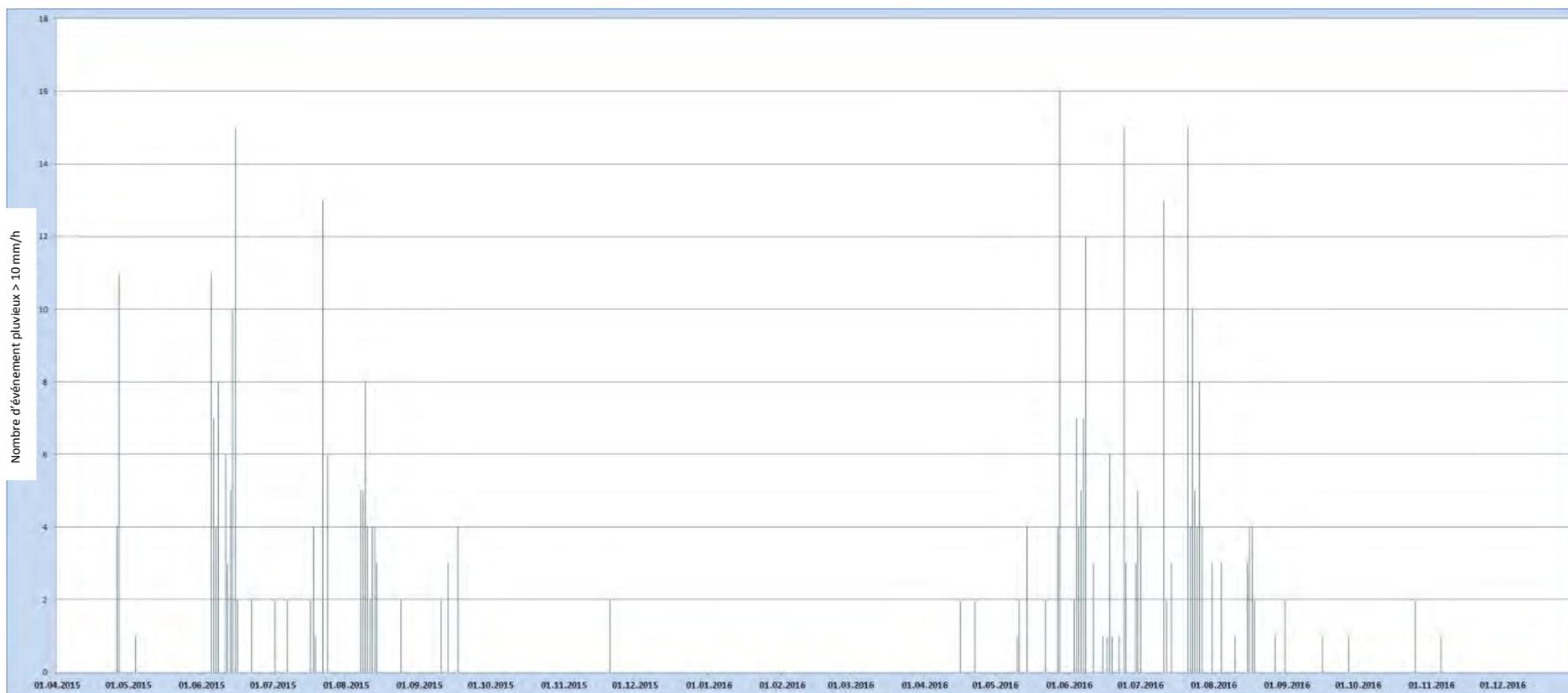
Protocole d'observation des dégâts d'érosion et de l'environnement parcellaire

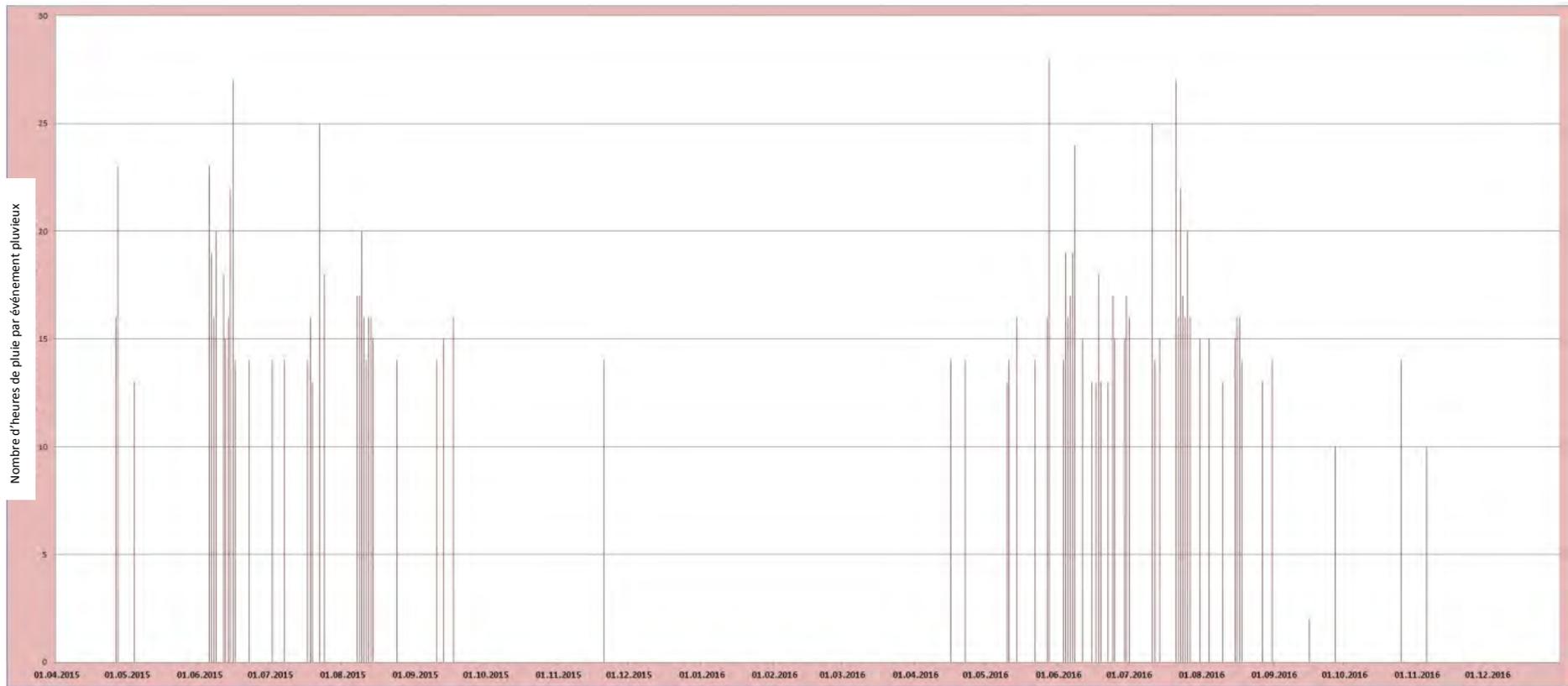
Annexe 6

Spécificité de la caméra Canon EOS 100D

Annexe 1

Nombre de forte pluie (> 10 mm/h) / événement pluvieux (bleu) ; nombre d'heure de pluie par événement pluvieux (rose).





Annexe 2

Sélection d'alertes ERMS proches des journées de terrain ou centrées sur la région d'étude et détail des observations de terrain sur les divers sites

Date alarme	22.04.2016		11.05.2016		28.05.2016	03.06.2016	04.06.2016		08.06.2016		24.06.2016*	11.07.2016	14.07.2016	31.07.2016*	18.08.2016	16.09.2016	27.09.2016	25.10.2016		05.11.2016	
Date terrain		27.04.2016		26.05.2016				06.06.2016		20.06.2016									31.10.2016		08.11.2016
Site HEIA-FR n° 1	0	ND	1	0	0	0	0	ND	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	ND	0	ND
Site HEIA-FR n° 2	0	N	1	N	1	1	0	N	0	N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ND
Site HEIA-FR n° 3a	0	N	0	0	1	0	0	N	1	N	1	0	0	0	0	0	0	0	ND	0	ND
Site HEIA-FR n° 3b	0	N	0	0	1	0	0	N	1	N	1	0	0	0	0	0	0	0	N	0	N
Site HEIA-FR n° 4	0	R	0	0	0	0	0	R	1	R	1	0	0	0	0	0	0	0	N	0	0
Site HEIA-FR n° 5	0	ND	0	N	0	0	0	N	0	N	0	0	0	0	0	0	0	0	N + R	0	N + R
Site HEIA-FR n° 6	0	ND	0	ND	0	0	1	ND	1	ND	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Site HEIA-FR n° 7	0	ND	0	ND	0	0	0	ND	0	ND	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	N

Alarme : Site sous le nuage de l'alarme ? Oui = 1, Non = 0

Terrain : Type d'érosion : R = rigole N = érosion en nappe 0 = pas d'érosion ND = site non visité

Ce sont les alarmes du 24.06.16 à 17h00 et du 31.07.16 à 13h qui sont prises en compte dans ce tableau.

Annexe 3

Représentation de toutes les alarmes ERMS d'avril à décembre 2016 ainsi que tous les jours où les intensités de pluie, fournies par Agrometeo, étaient supérieures à 10 mm/h

Relation entre l'intensité des précipitations, en mm/h selon les mesures Agrometeo, et les alertes ERMS: Le symbole « ? » signale une absence d'information due à une panne du système de mesure. En rose : intensité précipitation > 10 mm/h sans correspondance d'une alerte ERMS. En vert : alerte ERMS sans relation avec intensité de pluie > 10 mm/h sur les stations de mesure. En violet : journées avec intensité précipitations > 10 mm/h sur au-moins une station ET alerte ERMS.

Lieu	DELLEY	DUDINGEN	PRAZ	Alerte ERMS
Paramètre	Prec. intens.	Prec. intens.	Prec. intens.	1=alerte
Unité	mm/h	mm/h	mm/h	0=pas d'alerte
16.04.2016	12.0	10.8	7.2	1
22.04.2016	6.0	49.2	27.6	1
23.04.2016	4.8	14.4	7.2	0
10.05.2016	1.2	1.2	1.2	1
11.05.2016	8.4	8.4	8.4	1
14.05.2016	1.2	1.2	2.4	1
22.05.2016	4.8	3.6	7.2	1
27.05.2016	2.4	13.2	3.6	1
28.05.2016	6.0	30.0	4.8	1
29.05.2016	9.6	8.4	10.8	0
03.06.2016	6.0	3.6	3.6	1
04.06.2016	2.4	6.0	20.4	1
05.06.2016	0.0	0.0	0.0	1
06.06.2016	0.0	0.0	0.0	1
07.06.2016	1.2	0.0	0.0	1
08.06.2016	20.4	15.6	24.0	1
10.06.2016	50.4	1.2	15.6	0
11.06.2016	8.4	10.8	10.8	1
15.06.2016	2.4	1.2	2.4	1
17.06.2016	1.2	4.8	4.8	1
18.06.2016	2.4	12.0	2.4	1
19.06.2016	4.8	44.4	9.6	1
22.06.2016	0.0	0.0	0.0	1
24.06.2016	1.2	31.2	10.8	1
25.06.2016	27.6	48.0	9.6	1
29.06.2016	46.8	30.0	30.0	1
30.06.2016	0.0	4.8	3.6	1
01.07.2016	0.0	0.0	0.0	1
02.07.2016	12.0	15.6	10.8	0
11.07.2016	15.6	21.6	52.8	1
12.07.2016	6.0	18.0	18.0	1
14.07.2016	12.0	20.4	6.0	1
21.07.2016	0.0	0.0	1.2	1
22.07.2016	50.4	2.4	27.6	1
23.07.2016	4.8	18.0	27.6	1
24.07.2016	0.0	3.6	0.0	1
25.07.2016	0.0	4.8	0.0	1
26.07.2016	0.0	0.0	0.0	1

27.07.2016	0.0	0.0	0.0	1
31.07.2016	15.6	21.6	49.2	1
04.08.2016	8.4	21.6	26.4	1
10.08.2016	0.0	0.0	0.0	1
15.08.2016	0.0	0.0	0.0	1
16.08.2016	0.0	46.8	8.4	1
17.08.2016	0.0	1.2	0.0	1
18.08.2016	7.2	72.0	6.0	1
27.08.2016	0.0	1.2	0.0	1
31.08.2016	0.0	0.0	0.0	1
04.09.2016	3.6	13.2	7.2	0
16.09.2016	4.8	14.4	27.6	1
27.09.2016	0.0	?	0.0	1
25.10.2016	32.4	?	31.2	1
26.10.2016	4.8	?	12.0	0
05.11.2016	13.2	?	14.4	1

Annexe 4

Comparaison données Agrometeo et données terrain (ND = non documenté, 0= pas d'érosion, 1= érosion en nappe, 2=rigole d'érosion, 3=érosion en nappe et rigole). Les stations HEIA-FR sont référencées par leur numéro.

Dates	Stations Agrometeo			Stations HEIA							
	DELLEY	DUD.	PRAZ	1	2	3A.	3B.	4	5	6	7
	Préc. Intens. mm/h										
16.04.2016	12.0	10.8	7.2								
17.04.2016	6.0	8.4	7.2								
18.04.2016	3.6	4.8	4.8								
19.04.2016	0.0	0.0	0.0								
20.04.2016	0.0	0.0	0.0								
21.04.2016	0.0	0.0	0.0								
22.04.2016	6.0	49.2	27.6								
23.04.2016	4.8	14.4	7.2								
24.04.2016	1.2	1.2	1.2								
25.04.2016	0.0	0.0	1.2								
26.04.2016	3.6	3.6	6.0								
27.04.2016	0.0	1.2	0.0	ND	1	1	1	2	ND	ND	ND
15.05.2016	0.0	1.2	0.0								
16.05.2016	0.0	0.0	0.0								
17.05.2016	0.0	0.0	0.0								
18.05.2016	6.0	2.4	7.2								
19.05.2016	7.2	7.2	4.8								
20.05.2016	0.0	0.0	0.0								
21.05.2016	0.0	0.0	0.0								
22.05.2016	4.8	3.6	7.2								
23.05.2016	7.2	6.0	7.2								
24.05.2016	1.2	0.0	0.0								
25.05.2016	0.0	0.0	0.0								
26.05.2016	0.0	0.0	0.0	0	1	0	0	0	1	ND	ND
27.05.2016	2.4	13.2	3.6								
28.05.2016	6.0	30.0	4.8								
29.05.2016	9.6	8.4	10.8								
30.05.2016	1.2	0.0	0.0								
31.05.2016	1.2	1.2	2.4								
01.06.2016	0.0	0.0	0.0								
02.06.2016	4.8	4.8	4.8								
03.06.2016	6.0	3.6	3.6								
04.06.2016	2.4	6.0	20.4								
05.06.2016	0.0	0.0	0.0								
06.06.2016	0.0	0.0	0.0	ND	1	1	1	2	1	ND	ND

Dates	Stations Agrometeo			Stations HEIA							
	DELLEY	DUD.	PRAZ	1	2	3A.	3B.	4	5	6	7
	Préc. Intens. mm/h										
07.06.2016	1.2	0.0	0.0								
08.06.2016	20.4	15.6	24.0								
09.06.2016	3.6	4.8	2.4								
10.06.2016	50.4	1.2	15.6								
11.06.2016	8.4	10.8	10.8								
12.06.2016	2.4	4.8	1.2								
13.06.2016	4.8	3.6	7.2								
14.06.2016	6.0	3.6	3.6								
15.06.2016	2.4	1.2	2.4								
16.06.2016	6.0	9.6	8.4								
17.06.2016	1.2	4.8	4.8								
18.06.2016	2.4	12.0	2.4								
19.06.2016	4.8	44.4	9.6								
20.06.2016	1.2	2.4	1.2	0	1	1	1	2	1	ND	ND
20.10.2016	0.0	?	0.0								
21.10.2016	2.4	?	1.2								
22.10.2016	0.0	?	0.0								
23.10.2016	2.4	?	3.6								
24.10.2016	6.0	?	13.2								
25.10.2016	32.4	?	31.2								
26.10.2016	4.8	?	12.0								
27.10.2016	0.0	?	0.0								
28.10.2016	0.0	?	0.0								
29.10.2016	1.2	?	0.0								
30.10.2016	0.0	?	0.0								
31.10.2016	0.0	?	0.0	ND	0	ND	1	1	3	0	0
01.11.2016	0.0	?	0.0								
02.11.2016	0.0	?	0.0								
03.11.2016	0.0	?	0.0								
04.11.2016	1.2	?	1.2								
05.11.2016	13.2	?	14.4								
06.11.2016	1.2	?	2.4								
07.11.2016	1.2	?	1.2								
08.11.2016	1.2	?	3.6	ND	ND	ND	1	0	3	0	1

Annexe 5

Protocole d'observation des dégâts d'érosion et de l'environnement parcellaire

Feldprotokoll ERMS-Projekt: Erfassung Hangeinzugsgebiet											
Ort:		Grundstücks-Nr.:			Datum:		ausgefüllt durch:				
Fallstudie:		LandwirtInnen/Kontakt:					Regenereignis [mm/h]:				
Felder	GPS	Fotos	Kultur	Bodenbed [%]	Bearbeitungsrichtung	Anbautechnik	Erosionsmasse Hauptfließweg	Erosionsmasse nicht Hauptfließweg	Erosionsmengenabschätzung [t/ha]	SLM-Elemente	Hangn. SLME
				Schätzung gemäss Anhang 1	parallel (P), senkrecht (S) oder diagonal (D) zum Hang/Flach (F)	Pflug (P), Direktsaat (D), Stellenkäsensaat (S) gemäss Anhang 2	F: flächenhaft FL: flächenhaft-linienhaft L: Linienhaft (L1: Pflle bis 15cm, L2: Rinne 15-45cm, L3: Graben über 45cm)		Schätzung gemäss Anhang 3	GPS und Beschreibung von Elementen, welche Böden vor Erosion schützen (Hecken, Mauern, Gräben etc.)	Bestimmung mit Gefällmessgerät
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
Können Strukturen/Elemente beobachtet werden, welche Oberflächenabfluss leiten/kanalisieren? (GPS, Skizze)											

Feldprotokoll ERMS-Projekt: Erfassung Hangeinzugsgebiet									
Ort:		Grundstücks-Nr.:			Datum:		ausgefüllt durch:		
Fallstudie:		LandwirtInnen/Kontakt:							
Feldnr.	Gefälle [%]	Hangform	Hanglänge [m]	Fließstrecke [m]	Flächenbeitrag	Bodenart:	Verschlämmung [%]	Wurmlösung [%]	Bemerkungen
	Bestimmung mit Detailmesser	N 1-D Bestimmung gemäß Anhang 4	Schätzung in der Feldnote	Vom inneren Feld bis zum oberen Rand des Feldes gemessen	Träger zum Abfluss beifl. V? X, nach Beitragsmenge (langes) in fließen OA II, akkumuliert Material (A)	Sand, Schluff, Ton Bestimmung gemäß Anhang 5	Bestimmung gemäß Anhang 6	Bestimmung gemäß Anhang 7	
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

Annexe 6

Spécificité de la caméra Canon EOS 100D

Canon EOS 100D



zum ausführlichen **Testbericht** der Canon EOS 100D

Allgemein

Hersteller:	Canon
Modell:	EOS 100D
Kameratyp:	Spiegelreflex (DSLR)
Markteinführung:	04 / 2013
UVP:	799,00 Euro

Preise*

CHECK24:	369,90 €*
Marketplace - Amazon.d...:	373,95 €*
Ansch Shop:	399,00 €*
Warsteiner Fotoversand:	419,00 €*
orimo:	482,19 €*
Amazon.de GmbH - Amazo...:	567,20 €*

Aufnahmeeigenschaften und Standards

Megapixel (effektiv):	17,9 Megapixel
Maximale Bildauflösung:	5.184 x 3.456 Bildpunkte
Sensortyp und -größe:	CMOS, 22,3x14,9mm
Cropfaktor:	1,6fach
Serienbilder pro Sekunde:	4,0 Bilder pro Sekunde
Bild-Format:	JPEG, RAW
Audio-Format:	PCM (stereo)
Video-Auflösung:	1.920 x 1.080 Bildpunkte
Video-Frequenz:	30 Vollbilder pro Sekunde
Video-Aufnahme:	1080p30 (Full-HD)
Video-Format:	MOV (H.264, Linear PCM mono)
EXIF Version:	2.30