



Gembloux Agro-Bio Tech
Université de Liège

GISER

Mesurer l'érosion grâce à un drone

Dans les paysages agricoles, la microtopographie du sol est en changement permanent notamment en raison de l'arrachement des particules de terre mais aussi de la redéposition. Disposant d'un site d'étude dont le suivi hydrologique est assuré à l'exutoire de 3 sous bassins imbriqués, l'acquisition d'information topographique fine sur ces bassins est une des voies possibles pour localiser et quantifier l'érosion de manière distribuée. D'autre part, un modèle numérique de terrain de résolution fine et actualisé est une donnée d'entrée essentielle dans un modèle d'érosion et de déposition. En parallèle, les systèmes aériens légers sans pilote sont en constante progression. C'est ainsi que nous avons ambitionné de tester l'hypothèse selon laquelle la répartition spatiale des zones d'érosion et de dépôt est observable, voire quantifiable par la confrontation de MNS successifs acquis via un drone.

Convention GISER, UCL-Elle et ULg-Gx ABT, financée par le SWP-DGO3-DDR.

Rapport « stand alone » mars 2015.

Résumé non technique disponible sur www.giser.be.

Contexte

L'observation traditionnelle des changements de topographie est effectuée (Jester et Klik, 2005) par l'installation de pieux de référence, le théodolite, le lidar terrestre (Barneveld et al., 2013 ; Brubaker et al., 2013 ; Gneeniss et al., 2014 ; Haubrock et al., 2009 ; Martin et al., 2008 ; Nield et al., 2010) ou par photogrammétrie terrestre (Barker et al., 1996 ; Gessesse et al., 2010 ; Hancock et Willgoose, 2001 ; Kaiser et al., 2014 ; Warner 1995 ; Westoby et al., 2012). Mais ces observations peuvent être effectuées seulement sur de petites zones tandis que l'échelle la plus adaptée pour comprendre des procédés d'érosion et de dépôt semble être l'échelle du bassin versant. De plus, ces méthodes de contact touchent à la surface du sol au moins dans la zone voisine, et peuvent la modifier (Ouédraogo et al., 2014).

La photogrammétrie aérienne est une technique en expansion qui pourrait être une alternative moins fastidieuse, bon marché et non destructive. Elle pourrait permettre à l'utilisateur une couverture continue de l'espace sans densité limitée d'échantillonnage (Colomina et Molina, 2014 ; Hugenholtz et al., 2013).

L'application des drones génère un intérêt croissant pour les sciences de la terre (Fonstad et al., 2013 ; Hancock et Willgoose, 2001). Beaucoup d'auteurs soulignent les avantages de cette technique rapide et bon marché qui montre des grandes opportunités (Aber et al, 2010 ; Fonstad et al., 2013 ; Lisein et al, 2013 ; Puech et al, 2013 ; Remondino et al, 2012 ; Tarolli, 2014). La photogrammétrie exige un équipement qui est 50 fois moins cher et 10 fois moins lourd que le laser (pierrot-Deseilligny et Clery, 2011). Fonstad et al (2013) démontrent que les avancées de la technique photogrammétrique peuvent permettre de fournir des qualités et résolutions de données qui sont comparables au lidar et à la photogrammétrie classique (différant de la photogrammétrie moderne en employant des avions pilotés par des hommes, un appareil-photo métrique et un faible chevauchement d'images) et peuvent produire des nuages de points avec une précision horizontale et verticale dans la gamme de centimètre. Aber et al. (2010) et d'Oleire-Oltmanns et al. (2012) décrivent la technique comme une manière de réduire le fossé existant entre l'échelle du terrain et celle du satellite. Elle peut être employée à différentes échelles et pour plusieurs applications (James et Robson, 2014).

La technique photogrammétrique permet la reconstruction de la géométrie tridimensionnelle de scène des photos bidimensionnelles (Westoby et al., 2012). Les images à recouvrement multiples sont saisies par un appareil-photo de qualité grand public se déplaçant autour la scène et les algorithmes détectent les points caractéristiques qui permettent d'assortir entre elles les photographies (Verhoeven, 2011). Le nuage de points produit est translaté et pivoté dans un système de référence spécifique en employant les points de contrôle au sol (GCPs) (Sona et al., 2014). Les poses d'appareil-photo ainsi géoréférencées peuvent alors être employées plus tard pour créer les produits numériques d'altitude au moyen d'assortiments denses d'images (Fonstad et al., 2013).

Initialement adoptée depuis quelques années dans les études de la morphologie côtière ou de rivière (Hapke et Richmond, 2000 ; Javernick et al., 2014 ; Lejot et al., 2007 ; Mancini et al., 2013 ; Mirijovsky et Vavra, 2012 ; Smith et al., 2008), la photogrammétrie par des drones a été finalement employée pour des études concernant l'éboulement (Lucieer et al., 2013 ;

Niethammer et al., 2012 ; Stumpf et al., 2013 ; Yugsi et al., 2006) ou les paysages des bad-lands, voire pour l'observation de l'érosion concentrée (d'Oleire-Oltmanns et al., 2012 ; Giménez et al., 2009 ; Marzolff et Poesen, 2009 ; Marzolff et al., 2011 ; Peter et al., 2014 ; Puech et al., 2009).

Dans cette partie du projet, on vise à étudier la performance de la comparaison d'images multitudes acquises avec un petit véhicule aérien téléguidé pour fournir des données précises d'un bassin versant où l'érosion diffuse est la forme de mouvement de sédiment la plus répandue.

Les objectifs sont premièrement d'obtenir MNS de haute résolution de le bassin versant expérimental afin de l'employer comme donnée d'entrée précise dans un modèle d'érosion ; ensuite d'étudier la dynamique d'érosion/dépôt en faisant une analyse diachronique comme recommandé par Tarolli (2014).

Cette analyse diachronique vise à localiser voire à quantifier les pertes de sol à l'échelle du bassin versant sur sol limoneux affecté par l'érosion diffuse. Le cas échéant, cette technique pourrait être donc employée en tant que technique rapide d'acquisition de données de terrain en vue de spatialiser (voir de quantifier) les phénomènes d'érosion et de dépôt au sein d'un bassin versant.

Matériel et méthode

1 Acquisitions des données

Cette campagne d'acquisition a été réalisée en étroite collaboration avec l'unité de Gestion des Ressources Forestières et des Milieux Naturels de Gembloux ABT.

Le drone utilisé est un petit Gatewing X100 (envergure : 100 cm ; poids avec la charge utile : 2 kg ; vitesse de croisière : 80 km/h ; taille de vol : 100-750 m ; durée de vol maximum : 40 minutes ; capacité de couverture par vol : 100 ha à 100 m au-dessus du niveau du sol avec un chevauchement d'image de 70 %). Le décollage est effectué au moyen d'une rampe de lancement à élastiques (Figure 1). Les vols sont entièrement automatisés, du décollage à l'atterrissage (atterrissage sur le ventre). L'atterrissage exige en pratique une bande d'atterrissage sans obstacle de 300 m de long par 30 m de large.



Figure 1. Vol du drone

La préparation de la prise de vue aérienne est effectuée avec une station de contrôle au sol en définissant les paramètres de vol suivants: délimitation de la zone rectangulaire à couvrir, hauteur de vol (entre 100 et 750 mètres au-dessus du niveau du sol), recouvrement des images (le recouvrement latéral est de la même valeur que le recouvrement longitudinal), ainsi que la direction et le sens du décollage et de l'atterrissage. À partir du chevauchement, de l'altitude, de la taille de sonde et de la longueur focale, le logiciel de planification de vol calcule la ligne de base (distance entre deux centres consécutifs d'image). La station de contrôle au sol est additionnée d'un modem qui permet la communication avec le drone. Ce véhicule aérien sans pilote a un système du pilote automatique qui est équipé d'une centrale inertielle (des gyroscopes et baromètre) ainsi que d'un GPS atteignant une précision de quelques mètres pour déterminer sa position, ainsi que l'altitude du X100 pendant le vol.

Le capteur embarqué est un appareil-photo compact Ricoh GR3 (capteur photographique CCD de 10 mégapixels, distance focale équivalente en 35mm de 28 mm). L'appareil photo est utilisé dans le mode manuel et la sensibilité ISO ainsi que le temps de pose sont définis juste avant le décollage en fonction de la luminosité. Le déclenchement de l'appareil est effectué par le pilote automatique sur base de la position de l'avion une fois que l'avion atteint son secteur de balayage.

Les levés aériens (2011, 2012 et 2013) ont été menés pendant l'hiver (décembre) pour observer un sol aussi nu que possible. Pour les cultures d'hiver, le blé et l'escourgeon sont à un stade très

bas. Et pour les parcelles consacrées à recevoir des cultures sarclées, elles sont juste labourées, les CIPAN n'étant plus présents à cette période de l'année.

Un vol supplémentaire a été réalisé le 22 mai 2014, soit deux jours après l'événement intense qui a causé d'importantes coulées sur notre bassin versant expérimental. La pluie a seulement duré 23 minutes mais a eu un pic d'intensité par minute de 109.73 mm/h, une énergie cinétique maximum de 5323 KJ. La quantité totale précipitée a atteint 15.95 mm. Il n'y avait pas de pluie antécédente durant les 48 heures précédentes. Un pic de débit a été enregistré au point 4 (exutoire de 400 ha) de 716 L/s.

Avant chaque vol, un minimum de dix points de contrôle au sol (GCPs) ont été manuellement placés sur le bassin et mesurés à l'aide d'un GPS Leica 1200, fonctionnant en mode statique RTK (real time kinematic) pour calibrer l'appareil-photo et pour éviter des distorsions non linéaires, et pour géoreferencer précisément les DEM résultant. Le GPS Leica 1200 a une exactitude nominale de 1 cm pour y et x et de 1,5 cm pour z (Leica Geosystems, 2008). Les GCPs sont matérialisés par des panneaux blancs en forme de cible dont le centre est bien défini afin de permettre leur localisation précise sur les images. Au cours du vol de 2014, des points de contrôles supplémentaires ont été considérés, tant au sein de la zone que sur la route. Ils y resteront de manière permanente. Ceci vise à améliorer la répartition spatiale et en altitude des points de contrôle utilisés pour le traitement photogrammétrique (Figure 2).

Ces cibles sont placées le jour même des vols. Pour éviter l'influence des GCPs par le mouvement de la végétation d'une photo à l'autre, les GCPs n'ont pas été placés où la végétation couvrait le sol. Les GCPs ont été relevés dans le système de projection Lambert Belge 1972.

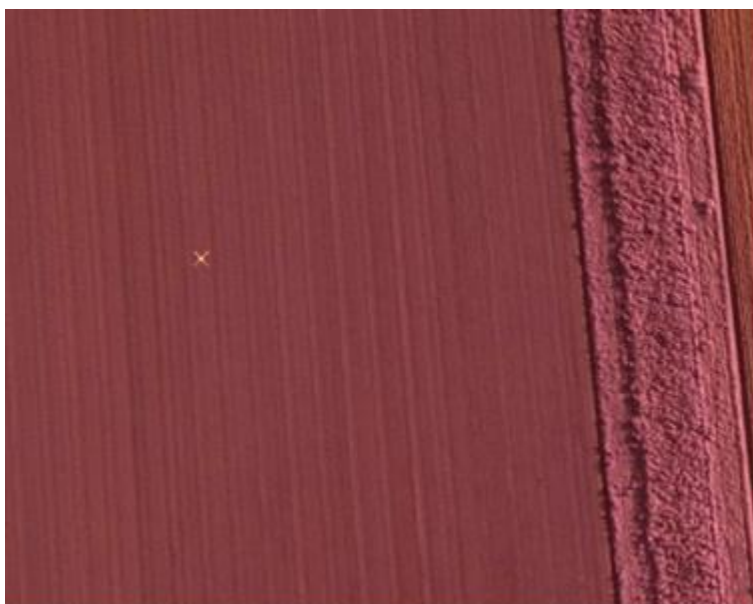


Figure 2. Exemple d'un des points de contrôle au sol (GCP)

Les autorisations de vol ont été données par l'autorité belge d'aviation civile. Les vols ont été conduits à 200 m au-dessus du niveau du sol (une contrainte existe, liée à l'antenne électrique présente sur le bassin (haute de 160m)), ce qui correspond à une résolution spatiale d'environ 6,76 cm/pixel.

Les photos ont été prises avec des lignes parallèles de vol et avec des chevauchements avant et latéraux de 80%, ce qui est équivalent à une distance de 25 m entre deux images adjacentes. Deux vols successifs sont nécessaires pour couvrir la totalité du bassin, mais les images des deux vols sont utilisées en tant qu'un bloc d'image unique. La direction des lignes du vol est choisie, si possible, afin d'être perpendiculaire au vent dominant, afin d'économiser l'énergie nécessaire au drone pour voler contre le vent. Les levés aériens ont été effectués dans des conditions constantes d'illumination (à midi), ciel clair et des conditions de vent modérées.

2 Traitement

Le logiciel photogrammétrique employé pour réaliser cette étude est la version professionnelle 1.0.4 d'Agisoft Photoscan. Les études soulignent l'efficacité de ce logiciel. Sona et al. (2014) ont identifié Photoscan comme celui qui fournirait les meilleurs résultats en termes de qualité des produits photogrammétriques comparés à un ensemble de logiciels. Il fournit également le meilleur produit, particulièrement dans des secteurs plats et en présence des ombres. Ce logiciel semble également être moins sensible que quelques autres à la présence de végétation en conditions de vol semblables aux nôtres (altitude de vol, appareil-photo et type de drone) (Ouédraogo et al., 2014).

La technique de photogrammétrie comporte plusieurs étapes.

1. Génération automatique de points de liaison
2. Calcul de l'orientation du bloc d'images
 - a. calibration de la camera
 - b. orientation relative (non géoréférencée)
 - c. orientation absolue (géoréférencée)
 - d. contrôle du résultat avec des points de vérification
3. Corrélation dense

D'abord, un nuage de points est produit après plusieurs étapes de transformation (Verhoeven, 2011). Premièrement, les photographies sont alignées. Dans cette étape, les images sont balayées pour détecter les points caractéristiques (points d'intérêt dans l'image qui seront comparés aux autres photos). Ces caractéristiques d'image sont automatiquement déterminées et sont employées pour calculer des correspondances (c.-à-d. des points de liaison) avec d'autres images (avec un algorithme d'assortiment ayant des capacités d'alignement plus élevées que ceux utilisés par les logiciels libres (Kaiser et al., 2014)). Les coordonnées du GPS embarqué dans le drone sont associées aux photographies afin de mettre en place préalablement les images et accélérer ainsi le calcul en assortissant seulement des caractéristiques d'image dans les photographies qui se chevauchent (Figure 3).

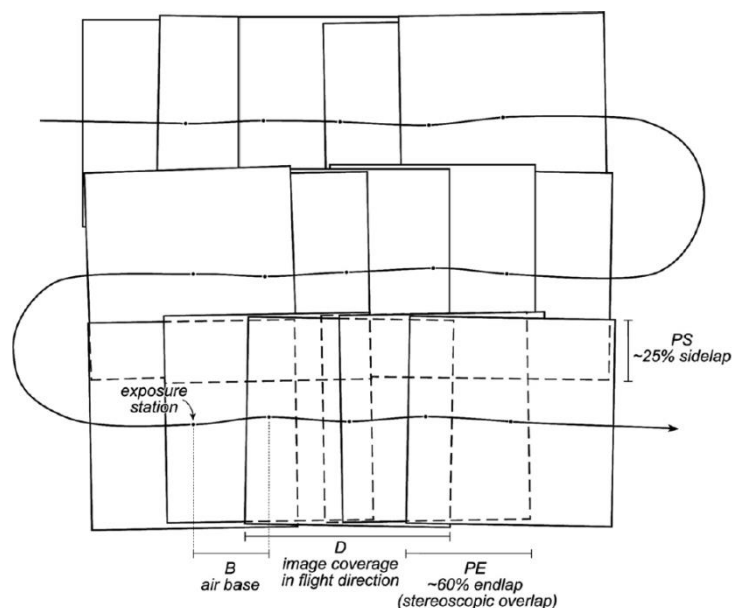


Figure 3. Exemple de recouvrement entre images (Aber et al, 2010)

L'orientation relative est alors exécutée au moyen de l'ajustement du bloc d'images qui emploie les points de liaison pour identifier la position 3D et l'orientation des photos, les XYZ des points de liaison et la calibration de l'appareil photo (Figure 4). Après cette étape, une inspection visuelle du modèle est effectuée et des points de liaison aberrants évidents sont supprimés du nuage de points clairsemé pour réduire les erreurs de reconstruction (Lucieer et al., 2013). Un nuage 3D de points clairsemé et la position/calibration de l'appareil photo résultent de cette étape.

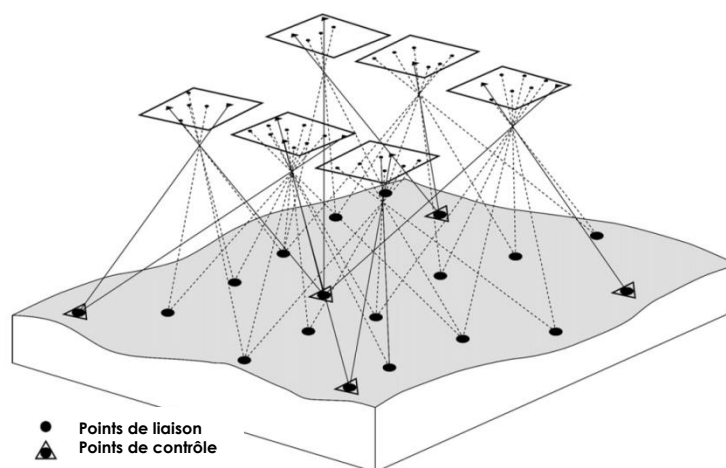


Figure 4. Principe de l'orientation absolue du bloc d'images (Aber et al, 2010)

Ensuite, le modèle est transformé en système de coordonnées absolu à condition qu'un minimum de trois GCPs soient disponibles (Javernick et autres, 2014). La transformation par l'utilisation de GCPs est faite dans l'interface utilisateur manuellement en identifiant et en marquant les GCPs dans les photographies. Une fois que l'identification des GCPs a été accomplie et que les coordonnées correspondantes XYZ ont été entrées, une transformation linéaire de similitudes, utilisant sept paramètres (trois translations, trois rotations, et une de mise à l'échelle,) est automatiquement exécutée. De plus, une transformation d'optimisation est également disponible qui utilise le nuage de points ainsi modelé et les paramètres de l'appareil

photo pour réduire la différence entre le modèle les coordonnées des GCPs fournies. Bien que l'appareil photo soit précalibré en laboratoire, l'orientation interne est alors, dans cette étape, rajustée à l'aide de ces informations provenant des GCPs. Le modèle de l'étape d'orientation relative précédente est alors mis à jour en incluant les observations des GCPs dans la procédure d'ajustement du bloc d'images. Ce processus, désigné sous le nom de « optimisation » dans Photoscan, est de première importance vu qu'il assure la suppression des déformations non linéaires en affinant le modèle de calibration de l'appareil photo (Javernick et autres, 2014) et permet le géoréférencement du modèle 3D dans un système de coordonnées réel.

Des résidus pour les GCPs ont été calculés comme première indication de l'exactitude géométrique du modèle. Cette précision dépend de plusieurs facteurs tels que la qualité d'image, la configuration de bloc d'images (recouvrement, organisation), la calibration de l'appareil photo et le type de surface mesurée (Gruen, 2012). L'évaluation de l'exactitude du géoréférencement est généralement exécutée en retirant un certain nombre de GCPs du processus et en les utilisant après comme points de contrôle (Javernick et autres, 2014). Dans notre cas, pour employer tous les points pour la création du modèle, les points de vérification au sol sont employés en validation croisée comme points de vérification pour mieux quantifier l'exactitude du géoréférencement. Un par un, les points de contrôle sont utilisés individuellement comme points de contrôle tandis que les autres sont employés comme GCPs.

À la fin, un nuage dense de points et une reconstruction de la surface (grille raster) sont calculés à partir du bloc d'images au moyen d'un algorithme d'assortiment dense (Lucieer et autres, 2013).

Le modèle est exporté vers un MNS et une orthophotomosaïque sous forme de grille raster à la résolution de 12 cm (1:2 de la pleine résolution). L'orthophotomosaïque est produite en corrigeant les différentes photographies vis-à-vis des déformations de relief et en créant une mosaïque et en les projetant sur une surface planimétrique avec un système de coordonnées réel: système de projection Lambert belge 1972.

Les valeurs finales des paramètres ont été déterminées pour les algorithmes de Photoscan après analyse préliminaire, et ont été appliquées à tous les modèles (Tableau 1). Une description de ces paramètres est compilée dans Agisoft (2012) et Verhoeven (2011).

Tableau 1. Paramètres entrés en photoscan

Point cloud : alignment parameters	
Accuracy	high
Image pair selection	Ground Control
Constrain features by mask	No
Maximum number of feature points	40000
Optimization with GCPs	
Self-calibration of the camera	Yes
Marker accuracy (m)	0
Projection accuracy (pix)	0.5

Tie point accuracy (pix)	4
Dense point cloud : reconstruction parameters	
Quality	high
Depth filtering	Aggressive
Mesh : reconstruction parameters	
Surface type	Height field
Source data	dense cloud
Polygon count	0 (no decimation required)
Interpolation	Enabled
Point classes	All

Toutes ces étapes ont été choisies parce qu'elles donnent la meilleure qualité du modèle parmi les autres procédures considérées (addition dans le traitement des photos d'un vol à altitude inférieur (100m) pendant l'année 2011 ou des points de contrôle artificiels dans le paysage comme les arêtes de toit et les panneaux routiers).

Le DEM produit par la photogrammétrie est aisément utilisable comme entrée dans un modèle d'érosion (non détaillé dans le présent rapport). Il est également employé pour calculer des voies concentrées d'écoulement.

Le MNS produit par la photogrammétrie est aisément utilisable comme entrée dans un modèle d'érosion. Il est également employé pour calculer les axes de ruissellement concentré.

3 Analyse diachronique

La comparaison du relief dans les temps est réalisée grâce à la disponibilité de séries temporelle de MNS.

Deux analyses sont réalisées. D'une part l'effet d'une précipitation importante (événement du 20 mai 2014) est analysé par différence entre le MNS acquis durant l'hiver 2013-2014 et le MNS de mai 2014 ; d'autre part l'évolution interannuelle du relief est analysée par différence entre le MNS hiver 2013-2014 et 2011-2012.

L'évolution du relief après un événement de précipitation a été étudiée via des transects réalisés à travers les axes notables d'écoulement bien identifiés sur l'orthophotomosaique. La validation de ces données peut être faite par une comparaison avec les lectures sur les règles graduées. Ces règles graduées sont placées dans des secteurs visuellement identifiés comme zones d'érosion et de déposition afin de lire la mesure après chaque événement notable et quelques treillis (comme des moustiquaires) sont également placés pour observer la succession des dépôts pendant une saison de culture.

L'évolution du relief au cours des deux dernières années a été analysée en se concentrant sur le comportement de certaines parcelles et des tendances générales ont ensuite été examinées sur tout le bassin.

Le changement de relief a été quantifié en soustrayant les rasters par une opération de soustraction dans Arcgis et en séparant des secteurs de perte (en rouge) et de profit (en vert). La comparaison est faite entre les deux MNS les plus éloignés dans le temps : c'est-à-dire 2013 et 2011.

Résultats

1 Production de MNS de haute résolution

Un résumé des statistiques de chaque campagne de vol est détaillé au Tableau 2. Les projections et points de liaison entre les images les plus faibles ont été trouvés pour le vol 2012. Cela permet d'observer une possible variabilité liée à quatre paramètres : (1) les changements des caractéristiques du drone entre ces vols, (2) quelques mouvements au sol (tracteurs se déplaçant pendant le vol), (3) la direction des lignes de vol et (4) les GCPs.

D'abord, le vol 2012 contient des images beaucoup plus floues comparées au vol 2011. En effet, avant le vol 2013, le drone était équipé de plus petits propulseurs qui transmettaient beaucoup plus de vibrations à l'appareil photo, ayant pour résultat une grande proportion d'images floues. Actuellement, la mise à jour de l'aile du drone (de plus grands propulseurs) pallie le problème en réduisant les vibrations dues au moteur.

D'autre part, on a observé, lors de ce vol, moins de recouvrement entre images car, avant 2013, le X100 prenait des images à intervalle de temps régulier, donc le recouvrement était probablement très fort influencé par le vent. Ensuite, le X100 a pris des images sur base de sa position GPS, donc sans une fréquence fixe. Le vol 2011 est moins influencé par cette instabilité parce qu'on a observé moins de vent pendant ce vol.

Deuxièmement, le vol 2012 a été en ligne de vol NE-SO (tandis que les autres ont pris la direction NO-SE) ce qui était, par conséquent moins optimal pour la jonction des deux vols.

Troisièmement, en termes d'objet mobile au sol, pour le vol de 2012, des disparités ont été notées : la présence d'un tracteur au milieu du bassin et la présence d'oiseaux.

Et enfin, la disposition des GCPs était moins optimale pour le vol 2012.

Par conséquent, la qualité et le nombre de points de liaison pour ce vol s'en ressent et les différences dans la précision du modèle semblent se rapporter plus à une interaction entre les conditions de vol, les conditions de vol et les conditions de terrain.

Tableau 2. Résumé des statistiques des vols 2011, 2012, 2013 et 2014

	2011	2012	2013	2014
Point density (points/m2)	70	68	71	65
Number of images	868	694	742	1075
align images	868	692	737	1072
Flying altitude (m)	190	195	188	205
Ground resolution (m/pix)	0.06	0.06	0.06	0.06

Coverage area (km2)	2.1	2.4	2.4	2.3
Tie-points for the point cloud	2.1E+06	1.0E+06	2.1E+06	2.2E+06
Projections	8.4E+06	3.0E+06	6.6E+06	7.9E+06
markers	10	11	13	20
markers projections	204	148	166	401

Le résultat d'évaluation de l'exactitude des MNS est fourni dans le Tableau 3.

Les résultats du modèle prouvent que les points de contrôle au sol (GCPs) ont un RMSE total de maximum 0.13m, avec des erreurs en Z qui sont souvent plus élevées que les erreurs de x et de y. Des images prises lors du vol de 2013 montrent cependant des résidus plus faibles en Z qu'en X-Y. Les meilleurs ajustements des différents blocks d'images sont réalisés pour le vol 2014 (les plus faibles RMSE et MAE), alors que le bloc du vol 2013 obtient la 2^e meilleure performance. L'évolution de notre expérience en termes de nombre et de disposition des GCPs pendant l'acquisition de séries chronologiques semble être convaincante.

Tableau 3. Evaluation de la précision de chaque vol par la méthode de validation croisée

Flight	RMSE (m)				MAE (m)				Mean pixel error
	total	x	y	z	total	x	y	z	
2011	0.13	0.04	0.04	0.12	0.11	0.03	0.03	0.09	0.36
2012	0.12	0.05	0.06	0.09	0.11	0.04	0.05	0.08	0.50
2013	0.12	0.06	0.09	0.05	0.10	0.05	0.07	0.04	0.35
2014	0.10	0.04	0.03	0.09	0.09	0.03	0.02	0.08	0.50

La position des GCPs est indiquée sur les MNS produits tous les ans à la Figure 5.

La position des GCPs et leur nombre varient au cours des acquisitions vers une meilleure répartition au sein du bassin versant expérimental (comme nous avons noté, d'un traitement à l'autre, la nécessité d'avoir une meilleure représentation du GCPs aux frontières du projet, qui sont aussi importants que ceux au milieu) et beaucoup plus de GCPs (placés même hors du secteur expérimental et sur la route asphaltée qui est moins sujette à l'enfoncement du mât de GPS pendant la mesure).

La présentation dans l'espace de ces Z-erreurs de GCP montre une distribution aléatoire des erreurs et suggère une première étape réussie du traitement photogrammétrique.

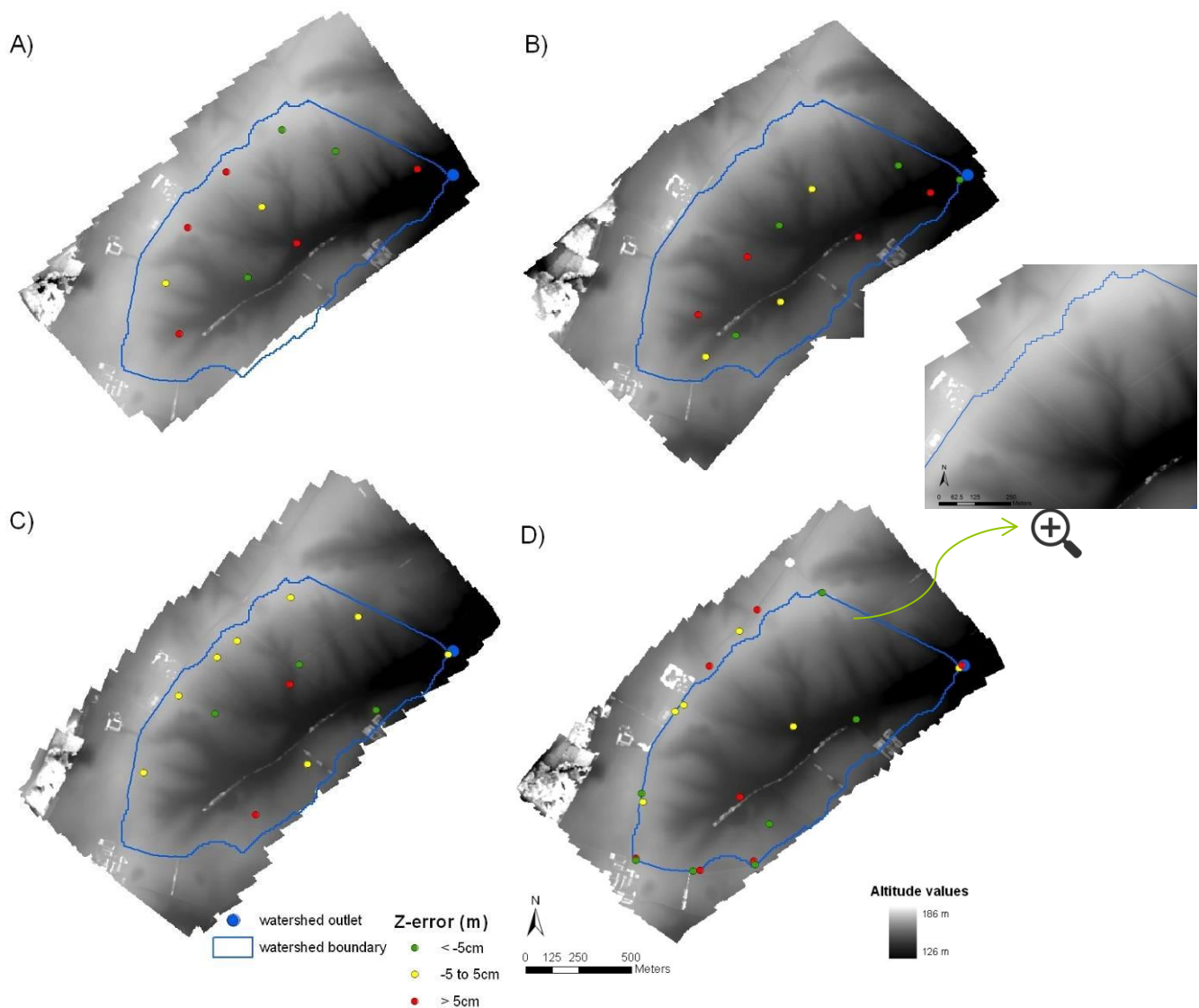


Figure 5. Distribution des résidus en Z sur leur MNS A) 2011, B) 2012, C) 2013 et D) 2014

Notons que concernant les procédures de photogrammétrie, des techniques automatisées récentes ont été publiées pour l'analyse de surfaces. Elles sont généralement peu transparentes. Des auteurs ont pourtant souligné l'importance de la paramétrisation appropriée (Marzloff et Poesen, 2009) qui ne devrait pas être considérée comme triviale. Des différences entre logiciels ont été démontrées (Ouédraogo et al., 2014 ; Sona et al., 2014) et sont imputables à la nouveauté de la technique. Elle ne semble en effet pas totalement mûre encore.

Les MNS (Figure 5), montrent la bande enherbée et la bande de bois qui divise le site, et les axes d'écoulement concentré observés sur le site pendant les événements érosifs. Des orthophotomosaïques sont également produites tous les ans à partir du traitement photogrammétrique. Sur celle de 2014, qui est produite après l'évènement majeur (Figure 6), les secteurs où les écoulements boueux ont été concentrés sont également clairement identifiés.

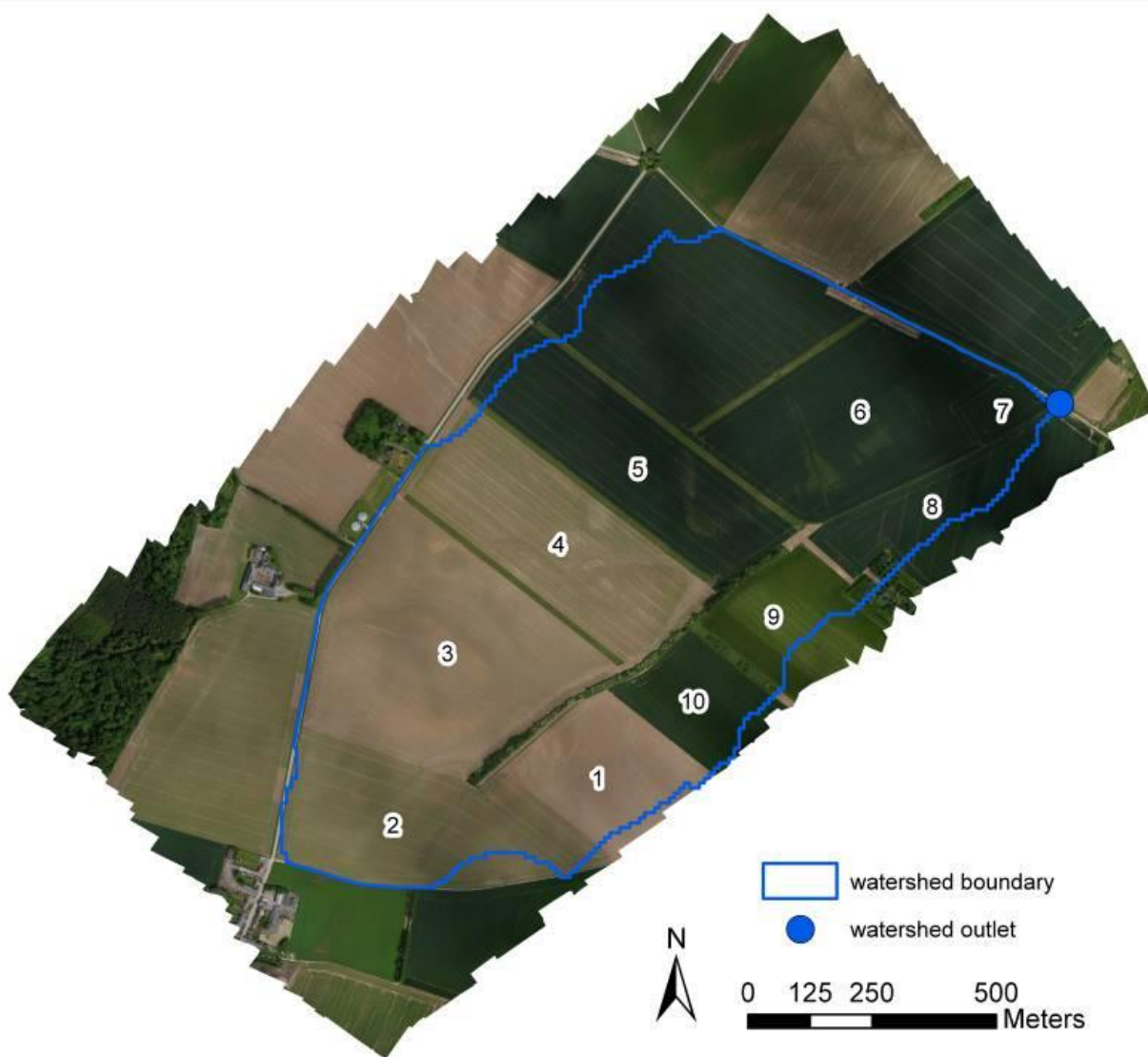


Figure 6. Orthophotomosaïque avec les numéros de parcelle utilisés dans l'analyse des résultats

2 Exploitation des MNS

Grâce au MNS produit, des axes d'écoulement concentré ont été extraits en utilisant un algorithme D8 dans ArcGis®. Une comparaison visuelle aux secteurs d'érosion/dépôt identifiés sur le site peut être réalisée (Figure 7).

On peut noter par exemple le cas de la parcelle 6 (Figure 6) où 2 axes d'écoulement concentré sont extraits du MNT. On les observe bien sur le terrain (Figure 8). Quand les données d'altitude du MNT 10m ont été employées pour produire des axes d'écoulement concentré dans le cadre du projet Erruissol, seul un axe a été produit à cet endroit en raison de la plus faible résolution du MNT. Les axes produits par le MNS drone permettent une représentation et un positionnement plus précis des axes de concentration du ruissellement. Ceci est d'un intérêt majeur pour le positionnement de petits ouvrages d'hydraulique douce notamment.

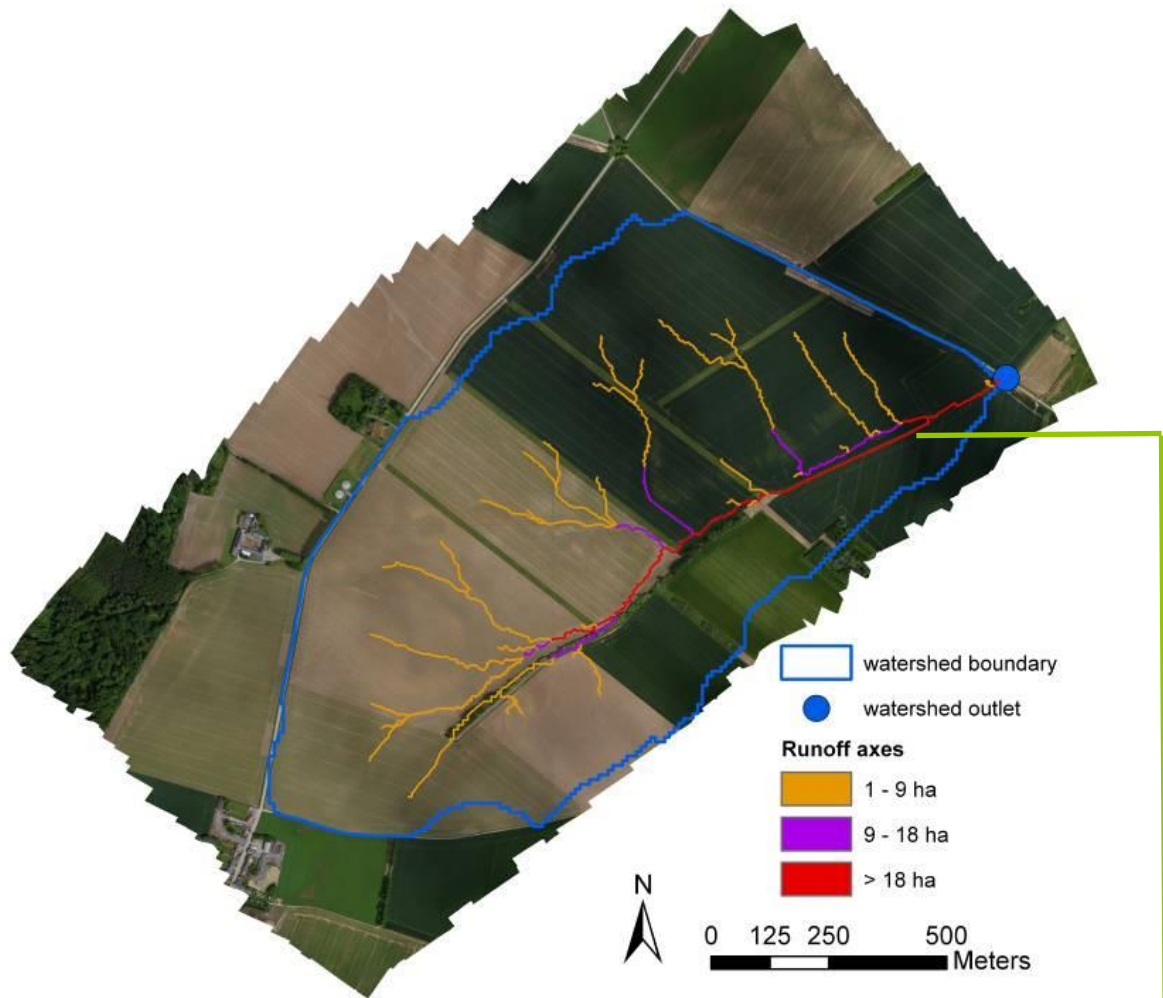


Figure 7. Axes de ruissellement concentre gènère sur le bassin par le drone



Figure 8. Les 2 axes de concentration observés sur le terrain à la parcelle

3 Evolution de l'Altitude à l'échelle de l'évènement

Des transects sont réalisés à travers les marques claires d'écoulement concentré afin de comparer l'altitude avant et après les précipitations intenses de mai 2014 (Figure 9). Les transects montrent que les zones d'écoulement peuvent être encaissées de 2m par endroit. Ce relief reste visible même si, d'une année à l'autre, le sol est lissé par le travail agricole. Notons encore que le bassin n'est pas caractérisé par une érosion concentrée prononcée.

La bonne superposition de courbes entre les années montre la bonne stabilité des résultats obtenus par la technique photogrammétrique. Il apparaît par contre après l'évènement du printemps 2014, au centre des vallées, une dépression supplémentaire où l'altitude est au-dessous du niveau précédent, suggérant localement jusqu'à une dizaine de centimètres de perte de sol.

Il convient de noter que si la courbe 2014 de la parcelle 1 se dédouble à la fin du transect, c'est parce que le transect finit dans la parcelle adjacente, où le blé s'était développé. Une augmentation d'altitude est donc détectée. L'effet de végétation est ici bien représenté.

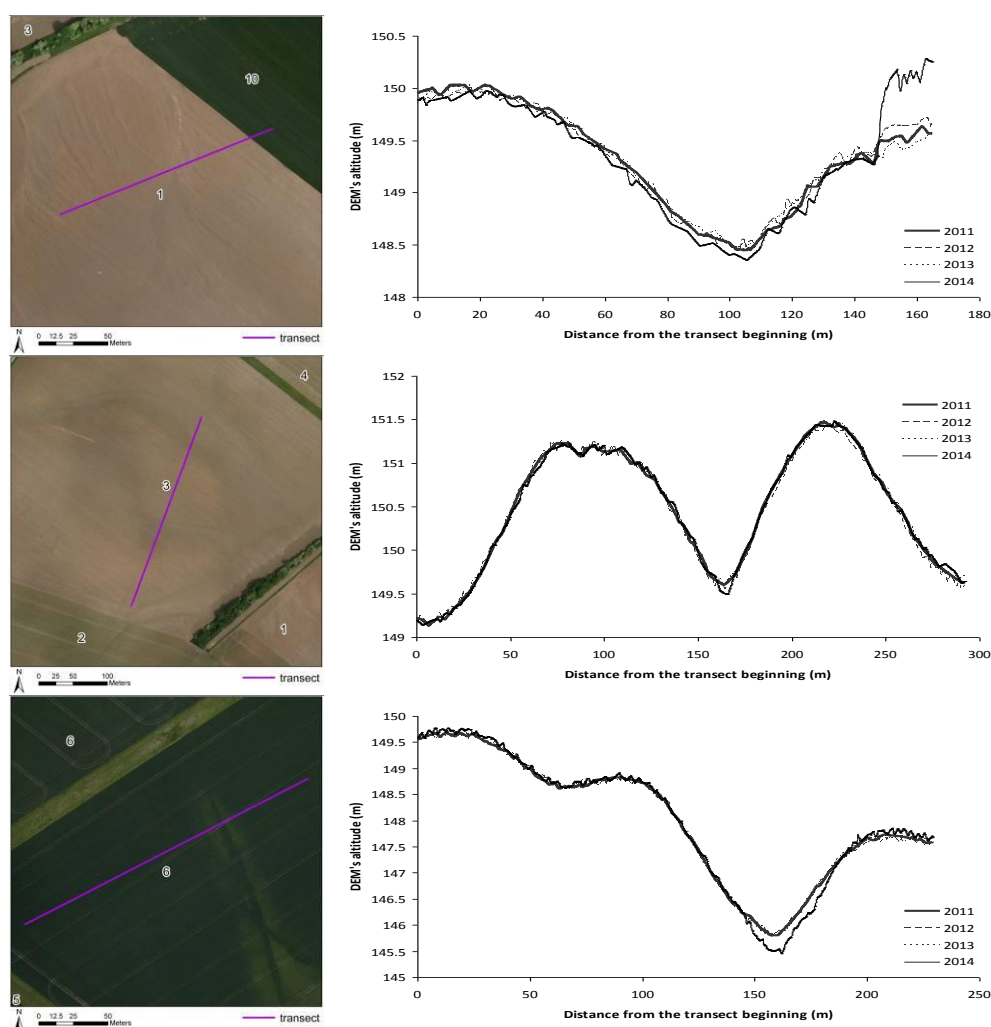


Figure 9. Transect à travers les axes de concentration relevés sur le site (parcelle 1-3-5-6)

Entre le vol de décembre 2013 et le vol de mai 2014, seulement peu d'événements se sont produits en dehors de l'orage de mai 2014. Les différences d'altitude entre mai 2014 et

décembre 2013 peuvent donc être comparées aux mesures de terrain réalisées par des règles graduées placées après le semis (01/04/2014).

Les Figure 10 et Figure 11 présentent ces comparaisons pour la parcelle 2. On observe les mêmes comportements entre les données issues du drone et les données issues des règles graduées. Le fait que les mesures sur nos règles graduées sont systématiquement inférieures à celles sur les cartes de différence des MNS 2014-2013 pourrait être expliqué par leur date de mise en place comme mentionné ci-dessus. En effet, les règles graduées ont dû traiter moins d'événements que la période entre décembre et mai.



Figure 10. Localisation des transects de validation par les jalons gradués

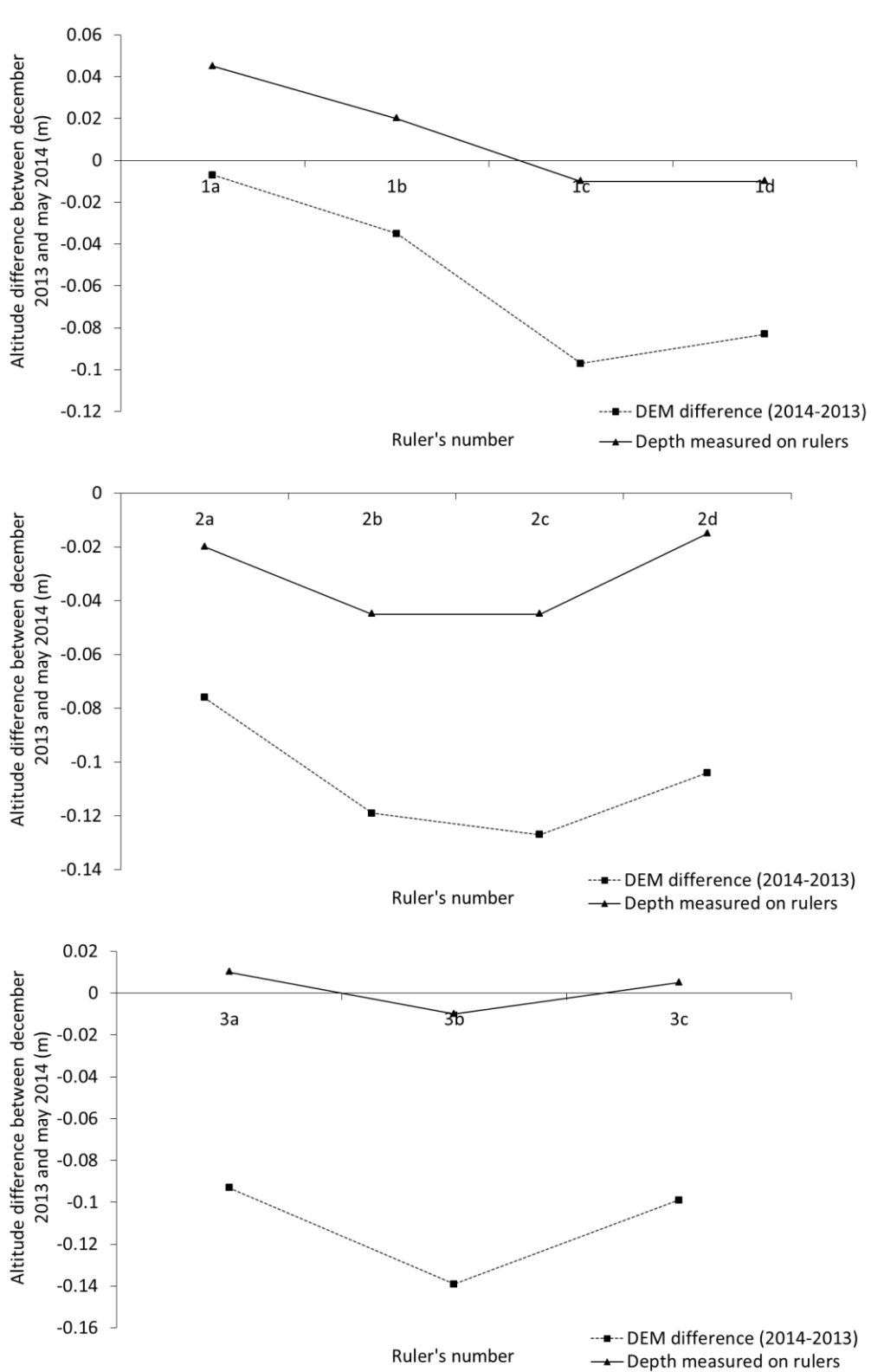


Figure 11. Validation des différences 2014-2013 par des mesures de terrain

4 Evolution de l'Altitude après 2 ans

Pour évaluer le modèle d'évolution de relief sur le bassin par les photographies séquentielles, le recouvrement des MNS 2011 et 2013 a été comparé. En effet, le vol 2012 a présenté un résultat plus faible pour l'ajustement de bloc d'images (Tableau 3) mais surtout, ce sont les MNS temporellement les plus éloignés et qui sont pris quand la surface de sol était aussi nue que possible afin de permettre une comparaison diachronique. Notons que les rotations étant biennales, nous avons observé la même préparation de sol et des états de surface similaires pour ces deux vols.

4.1 Analyse à la parcelle

Des schémas d'évolution du passage durant ces 2 ans peuvent se dessiner à l'échelle de la parcelle.

Dans les parcelles 3 et 4, des transects à partir du dessus jusqu'au bas de la pente et dans la direction du sens des cultures montrent des différences négatives sur le dessus de la pente (signal d'érosion) pour augmenter progressivement vers des différences positives sur le fond de la parcelle (signal de dépôt) (exemple de transect pour la parcelle 3 et 4 aux Figure 12 et Figure 13). On sait toutefois que, dans ces tendances érosion-dépôt, une part peut être attribuée au phénomène de compensation des erreurs résiduelles.

A titre de comparaison, les Figure 14 et Figure 15 illustrent l'ampleur des dépôts observés en base de pente après une saison de culture et valident les gammes de valeurs issues du traitement photogrammétrique.

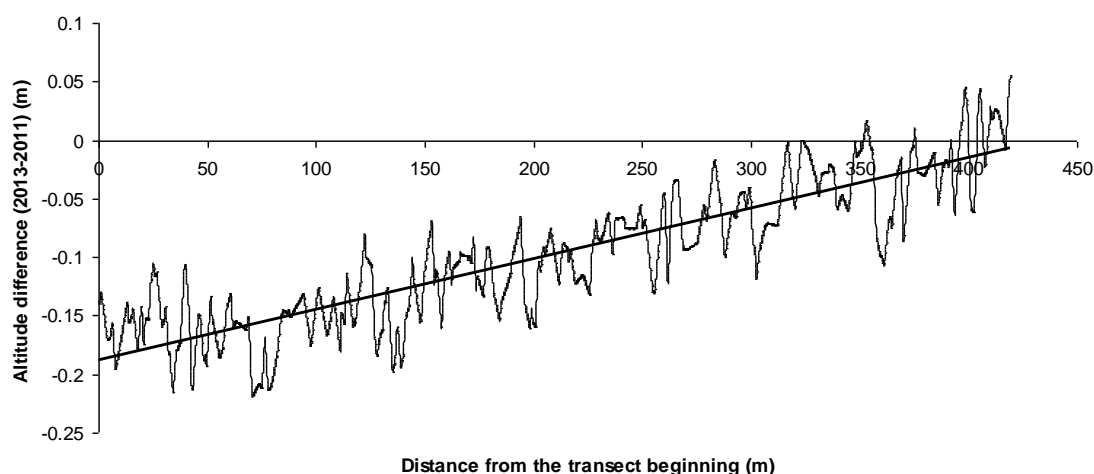


Figure 12. Transect du haut vers le bas de la parcelle 3

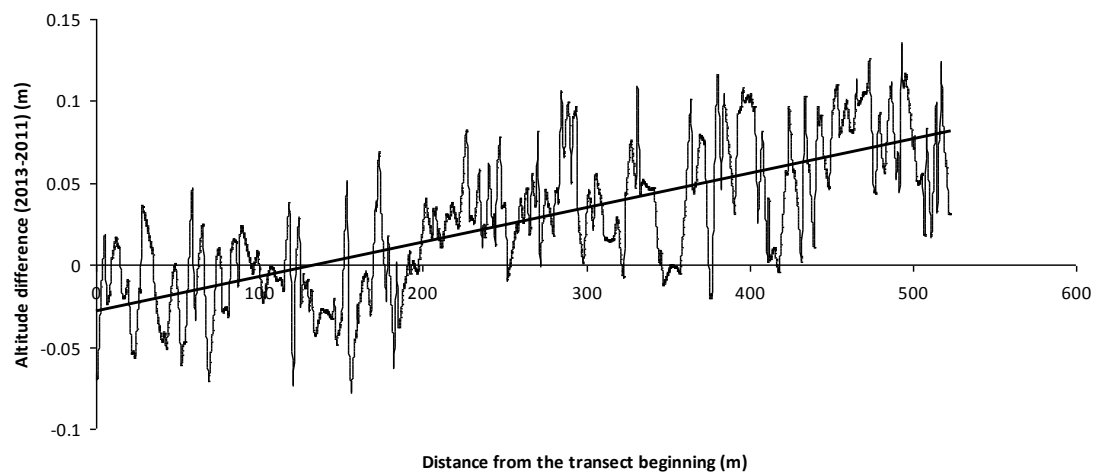


Figure 13. Transect du haut vers le bas de la parcelle 4



Figure 14. Accumulation de dépôt en bas de parcelle 3 (gauche) et 4 (droite)



Figure 15. Exemple de déposition observée avec une saison de culture en bas de parcelle. Le treillis visible sur l'image a été posé et attaché au sol juste après la plantation des pommes de terre

À l'inverse, des transects perpendiculaires à la direction de pente dans une parcelle divisée par une bande enherbée (parcelle 6 à la Figure 6) montrent qu'une claire augmentation de l'altitude est présente à l'endroit de la bande enherbée ce qui correspond au développement de la végétation. Mais ici, aucun signal « érosion – dépôt » n'apparaît (Figure 16). À l'inverse, la différence d'altitude semble être stable le long du transect.

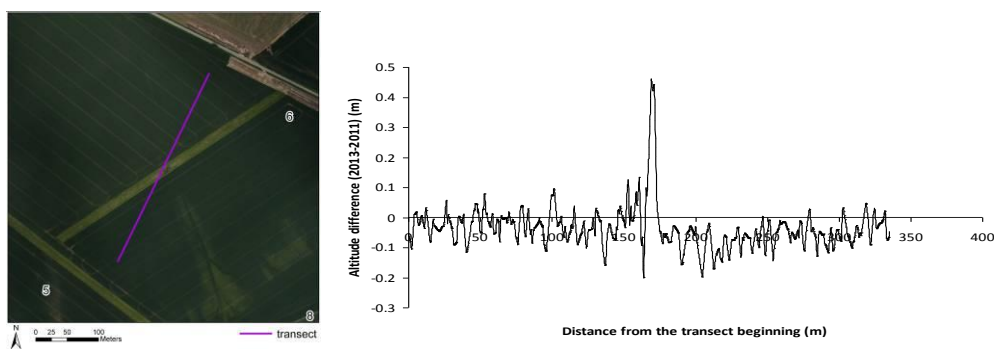


Figure 16. Transect à travers la bande enherbée (parcelle 6)

4.2 A l'échelle du bassin

La différence entre les MNS 2013 et 2011 tend à suggérer une dominance de l'érosion sur le bassin versant (Figure 17) ce qui est en vérité observé sur le site.

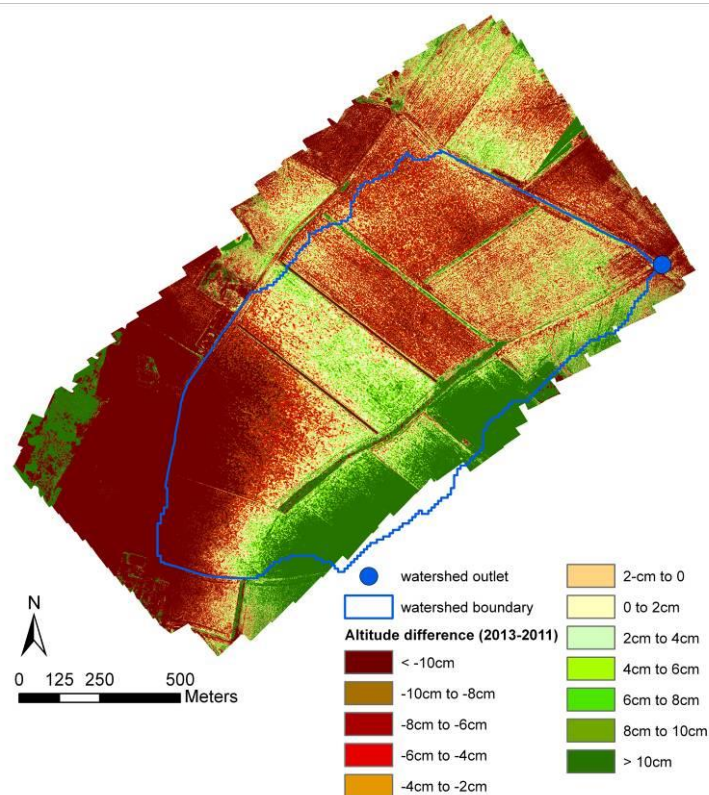


Figure 17. Différence d'altitude entre les vols 2011 et 2013

Si ce résultat était a priori attendu, il faut cependant noter que la rive droite du bassin versant se voit attribuer un signal de dépôt, ce qui n'est pas attendu. Il pourrait résulter du manque de points de contrôles au sud du BV lors des vols les plus anciens. Plus la zone est éloignée de GCPs, plus grandes sont les déformations non linéaires. Cette carte doit donc être interprétée avec précaution. L'expérience de cette étude encourage à placer plus de GCPs à la frontière du projet, même en dehors du bassin. C'est pourquoi nous avons placé plus de cibles sur le site, dont certaines permanentes, pour le dernier vol de 2014.

Globalement, on peut toutefois souligner que l'effet du découpage parcellaire tend à apparaître plus clairement que l'effet des axes de ruissellement continu. Ceci tend à suggérer l'importance d'approfondir la connaissance du fonctionnement des transitions entre parcelles au sein du bassin versant. La connectivité du parcellaire semble déterminante dans notre bassin expérimental.

Mais, au vu de l'évolution positive de la qualité des MNS, de la facilité croissante d'obtention des autorisations de vol et du prix très limité de cette opération, nous proposons de poursuivre l'acquisition annuelle d'un MNS pour notamment aborder la question des transitions entre parcelles mais aussi pour observer l'effet supposé important de la suppression récente des bandes enherbées.

L'usage des séries temporelles de MNS comme une mesure d'érosion?

L'analyse diachronique de MNS est potentiellement de grand intérêt pour une étude à l'échelle du bassin versant où d'autres méthodes sont trop destructives, chères ou longues.

Même si cette technique n'est pas aussi mûre que d'autres plus conventionnelles pour la mesure de l'érosion, elle a répondu à nos besoins notamment en termes de qualité du MNS de base (permet de voir une meilleure réalité de terrain au niveau des axes notamment) et de flexibilité (acquisition dans les 48 heures qui suivent un événement). Cette acquisition illustre bien la résolution temporelle que le drone peut réaliser, aussi bien que sa capacité à s'adapter aux phénomènes naturels (Koh et Wich, 2012). Vu que les capacités de calcul augmentent sans cesse et que les logiciels de photogrammétrie sont en progrès constant, cette technique ouvre les portes à une amélioration des données acquises par cette méthode.

Tout d'abord, obtenir un modèle numérique d'altitude de très fine résolution est bien entendu essentiel pour avoir une restitution précise du relief mais aussi pour connaître ses dérivés comme son réseau de drainage (axes de concentration).

Concernant l'usage des séries temporelles de MNS comme mesure des changements de relief, la première partie de l'étude à savoir l'étude à l'échelle de l'événement en utilisant l'événement intense de mai 2014 donne un aperçu des potentialités de cette approche. Des transects à travers des secteurs où les phénomènes d'érosion sont plus prononcés peuvent être validés par des observations de terrain ou par les règles graduées d'une manière qualitative et quantitative.

Avec l'analyse pluriannuelle, une étude à la parcelle montre des résultats encourageants et tout à fait concordants avec des mesures de terrain. En revanche, à l'échelle du bassin versant, il apparaît qu'une durée d'observation plus longue sera nécessaire pour capter les effets de la connectivité entre les parcelles. On observe toutefois déjà que le parcellaire joue un rôle majeur dans l'évolution de la surface du sol. Notre contexte d'étude (sol limoneux, relief doux, érosion diffuse, travail du sol régulier), impose une longue observation pour détecter des patterns d'érosion sur le bassin entier.

Une série de perspectives peuvent être en outre être soulignées.

Rock et al. (2011) n'ont pas pu trouver un lien entre le nombre de GCPs et la précision du MNS (contraire à nos observations) mais ont démontré que l'erreur augmente avec l'altitude de vol. De nos jours, l'altitude de vol semble être l'un des paramètres sur lesquels nous pouvons jouer pour améliorer la précision. Mais cela prend alors beaucoup plus de temps (augmentation de coût et de temps de l'acquisition qui sont les principaux avantages de la technique) ou n'est pas même toujours possible (contraintes aériennes telles que l'antenne présente sur notre zone d'étude). d'Oleire-Oltmanns et al., 2012 notent également qu'une limite pour l'acquisition de données utilisant un drone est la hauteur de vol.

Un autre chemin à explorer pour les futures études est de combiner des données acquises à partir d'autres niveaux et d'autres perspectives (basse altitude ou photos terrestres).

Récemment, James et Robson (2014) ont mis en évidence que les MNS de haute résolution peuvent montrer des déformations systématiques de large-échelle (également Javernick et al. 2014) qui limitent leur utilisation plus large même si un tel MNS peut aller jusqu'au détail centimétrique. Ils proposent de prendre et d'inclure des images obliques supplémentaires dans le réseau d'image. Cette piste pourrait nous permettre de réduire de manière significative l'erreur systématique des MNS.

Enfin, les techniques et les algorithmes sont en développement permanent notamment pour mieux adapter les opérations au biais de la végétation, de l'ombre et de l'éclairage. Par conséquent, cette technique offre des perspectives encourageantes pour l'avenir, notamment quand les études continuent pour améliorer sans cesse la précision (Tournadre et al., 2014).

Cette analyse des données issues du drone fait l'objet d'un article en cours de finalisation.

Cette recherche a été réalisée en collaboration avec l'axe « Gestion des Ressources forestières » (sous la direction de Philippe Lejeune) du département BIOSE (Ingénierie des biosystèmes) de Gembloux Agro-Bio Tech. Nous tenons à adresser un remerciement à leur égard.

Remerciement

Nous tenons à remercier, pour la mise à disposition de cette technique, l'axe « Gestion des Ressources forestières » (sous la direction de Philippe Lejeune) du département BIOSE (Ingénierie des biosystèmes) de Gembloux Agro-Bio Tech.

Bibliographie

Aber, J.; Marzloff, I.; Ries, J.B. 2010. Small Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands; p. 256.

AgiSoft, 2012. Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition. Version 0.9.0. Retrieved October 28, 2012 from <http://www.agisoft.ru/products/photoscan/professional/>.

Barker, R., Dixon, L., Hooke, J., 1997. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 1217–1227.

Barneveld, R. J., Seeger, M., Maalen-Johansen, I., 2013. Assessment of terrestrial laser scanning technology for obtaining high-resolution MNSs of soils. *Earth Surface Processes and Landforms* 38 (1), 90–94.

Brubaker, K. M., Myers, W. L., Drohan, P. J., Miller, D. A., Boyer, E. W., 2013. The use of LiDAR terrain data in characterizing surface roughness and microtopography. *Applied and Environmental Soil Science* 2013.

Chandler, J.H., Fryer, J.G., Jack, A., 2005. Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement. *Photogrammetric Record* 20 (109), 12–26.

Colomina, I., Molina, P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing : A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92, 79–97.

- d'Oleire Oltmanns, S., Marzloff, I., Peter, K. D., Ries, J. B., 2012. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in morocco. *Remote Sensing* 4 (11), 3390–3416.
- Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., Carbonneau, P. E., 2013. Topographic structure from motion : a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms* 38 (4), 421–430.
- Gessesse, G., Fuchs, H., Mansberger, R., Klik, A., 2010. Assessment of erosion, deposition and rill development on irregular soil surfaces using close range digital photogrammetry. *The Photogrammetric Record* 25(131), 299–318.
- Giménez, R., Marzloff, I., Campo, M.A., Seeger, M., Ries, J.B., Casali, J., Álvarez-Mozos, J., 2009. High-resolution photogrammetric and field measurements of gullies with contrasting morphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 1915–1926.
- Gruen, A., Development and status of image matching in photogrammetry. *The Photogrammetric Record* 27(137), 36–57.
- Hancock, G., Willgoose, G., 2001. The production of digital elevation models for experimental model landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 475–490.
- Hapke, C., Richmond, B., 2000. Monitoring beach morphology changes using small-format aerial photography and digital softcopy photogrammetry. *Environmental Geosciences* 7, 32–37.
- Haubrock, S.N., Kuhnert, M., Chabrilat, S., Güntner, A., Kaufmann H., 2009. Spatiotemporal variations of soil surface roughness from in-situ laser scanning. *Catena* 79, 128–139.
- Hugenholtz, C. H., Moorman, B. J., Riddell, K., Whitehead, K., 2012. Small unmanned aircraft systems for remote sensing and earth science research. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 93 (25), 236–236.
- James, M., Robson, S., 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 1413–1420.
- Javernick, L., Brasington, J., Caruso, B., mai 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using structure-from-motion photogrammetry. *Geomorphology* 213, 166–182.
- Jester, W., Klik, A., 2005. Soil surface roughness measurement - methods, applicability, and surface representation. *Catena* 64, 174–192.
- Kaiser, A., Neugirg, F., Rock, G., Müller, C., Haas, F., Ries, J., Schmidt, J., 2014. Small-Scale Surface Reconstruction and Volume Calculation of Soil Erosion in Complex Moroccan Gully Morphology Using Structure from Motion. *Remote Sensing* 6, 7050-7080.
- Koh, L.P., Wich, S.A., 2012. Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Tropical Conservation Science* 5, 121-132.
- Leica Geosystems, 2008. Leica GPS1200 User Manual.
- Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T., Trémélo, M.-L., Allemand, P., octobre 2007. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. *Earth Surface Processes and Landforms* 32 (11), 1705–1725.
- Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S., Lejeune, P., 2013. A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. *Forests* 4 (4), 922–944.

- Lucieer, A., Jong, S., Turner, D., 2014. Mapping landslide displacements using structure from motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography* 38 (1), 97–116.
- Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S., Gabbianelli, G., 2013. Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography : The structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sensing* 5 (12), 6880–6898.
- Martin, Y., Valeo, C., Tait, M., 2008. Centimetre-scale digital representations of terrain and impacts on depression storage and runoff. *Catena* 75, 223–233.
- Marzolf, I., Poesen, J., 2009. The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system. *Geomorphology* 111, 48–60.
- Marzolf, I., Ries, J.B., Poesen, J., 2011. Short-term versus medium-term monitoring for detecting gully-erosion variability in a Mediterranean environment. *Earth Surface Processes and Landforms* 36, 1604–1623.
- Miřijovský, J., Vávra, A., 2012. UAV photogrammetry in fluvial geomorphology. Conference Proceedings SGEM 2012. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria.
- Nield, J.M., Wiggs, G.F.S., Squirrel, R.S., 2011. Aeolian sand strip mobility and protodune development on a drying beach: examining surface moisture and surface roughness patterns measured by terrestrial laser scanning. *Earth Surface Processes and Landforms* 36, 513–522.
- Niethammer, U., James, M., Rothmund, S., Travelletti, J., Joswig, M., 2012. UAV-based remote sensing of the super-sauze landslide : Evaluation and results. *Engineering Geology* 128, 2–11.
- Ouédraogo, M. M., Degré, A., Debouche, C., Lisein, J., 2014. The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate MNSs of agricultural watersheds. *Geomorphology* 214, 339–355.
- Peter, K. D., d'Oleire Oltmanns, S., Ries, J. B., Marzolf, 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* 113, 24–40.
- Pierrot-Deseilligny, M.; Clery, I. ; 2011. Evolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3d par photo des milieux naturels. *Collection EDYTEM* 12, 51–64.
- Puech, C., Thommeret, N., Kaiser, B., Bailly, J-S., Jacome, A., Rey, F., Mathys, N., 2009. MNT à très haute résolution dans les modelés fortement disséqués : des données aux tests d'application. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 2, 141-152.
- Remondino, F., del Pizzo, S., Kersten, T., Troisi, S., 2012. Low-cost and open-source solutions for automated image orientation – a critical overview. In : Ioannides, M., Fritsch, D., Leissner, J., Davies, R., Remondino, F., Caffo, R. (Eds.), *Progress in Cultural Heritage Preservation. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 7616. Springer, Berlin Heidelberg, pp. 40–54.
- Rock, G.; Ries, J.B.; Udelhoven, T. Sensitivity Analysis of UAV-Photogrammetry for Creating Digital Elevation Models (MNS). In *Proceedings of Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics*, Zurich, Switzerland, 14–16 September 2011; Volume XXXVIII-1/C22.
- Saavedra, C., 2005. Estimating spatial patterns of soil erosion and deposition in the Andean region using geo-information techniques : A case study in Cochabamba, Bolivia. Wageningen Universiteit.

- Slattery, M. C., Gares, P. A., Phillips, J. D., 2002. Slope–channel linkage and sediment delivery on north carolina coastal plain cropland. *Earth Surface Processes and Landforms* 27 (13), 1377–1387.
- Smith M., Chandler J., Rose J., 2009. High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography Kite aerial photography. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 155–161.
- Stroosnijder, L., 2005. Measurement of erosion : is it possible ? *Catena* 64 (2), 162–173.
- Stumpf, A., Malet, J.-P., Kerle, N., Niethammer, U., Rothmund, S., mars 2013. Image-based mapping of surface fissures for the investigation of landslide dynamics. *Geomorphology* 186, 12–27.
- Tarolli, P., juillet 2014. High-resolution topography for understanding earth surface processes : Opportunities and challenges. *Geomorphology* 216, 295–312.
- Tournadre, V., Pierrot-Deseilligny, M., Faurec, P. H., 2014. UAV PHOTOGRAMMETRY TO MONITOR DYKES–CALIBRATION AND COMPARISON TO TERRESTRIAL LIDAR. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 1 (1), 143–148.
- Verhoeven, G., 2011. Taking computer vision aloft — archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with PhotoScan. *Archaeol. Prospect.* 18, 67–73.
- Warner, W. S., 1995. Mapping a three-dimensional soil surface with hand-held 35 mm photography. *Soil and Tillage Research* 34 (3), 187–197.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., Reynolds, J. M., 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry : a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300–314.
- Yugsi, F., Eisenbeiss, H., Remondino, F., Winkler, W., 2006. Multi-Temporal monitoring of landslides in archaeological mountainous environments using optical imagery: The case of El Tambo, Ecuador. The Space2Place conference in Rome, Space To Place - 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology, Proc. of the 2nd Int. Workshop, Eds.: Stefano Campana, Maurizio Forte. BAR International Series 1568, Archaeopress, Oxford, pp. 173-178.

Contact :

Cellule GISER

c/o SPW-DGO3-DDR

Av. Prince de Liège 7

5100 Jambes

081 336 471

nathalie.pineux@ulg.ac.be

aurore.degre@ulg.ac.be