



Gembloux Agro-Bio Tech
Université de Liège

GISER

Modélisation du dépôt des sédiments

Les calculs relatifs à l'érosion étant basés principalement sur l'équation universelle des pertes en sol qui ne représente pas le dépôt des sédiments, la quantité de sédiments arrivant sur les aménagements anti-érosifs est fréquemment surestimée. C'est la raison pour laquelle l'étude de nouveaux modèles prenant en compte les phénomènes de redéposition des sédiments était au programme des tâches de Giser. La prise en compte de ce phénomène permettrait d'évaluer de manière beaucoup plus réaliste l'efficacité de diverses mesures anti-érosives. C'est ainsi qu'au terme d'une étude bibliographique, le modèle Landsoil a été sélectionné et des analyses de sensibilité préliminaires sur les paramètres d'entrée ont été réalisées.

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.

Choix du modèle

Les modèles existants prenant en compte les phénomènes de redéposition des sédiments ont d'abord été analysés et comparés.

1 Présentation des modèles

Divers modèles permettent à la fois le calcul de l'érosion et du dépôt.

Ceux-ci peuvent être (i) empiriques ce qui les rend limités aux conditions pour lesquelles ils ont été développés (USLE, MUSLE, RUSLE), (ii) conceptuels et ont alors pour but de représenter les processus physiques gouvernant le système en les décrivant à l'aide de relations empiriques, ; ils sont typiquement basés sur la représentation du bassin versant comme étant une série de stockages internes et généralement linéaires, nécessitant chacun une caractérisation de leur comportement dynamique; incluent une description générale des processus dans le bassin versant, sans inclure les détails spécifiques résultant des interactions complexes, (iii) ou physiques et sont dans ce cas basés sur la connaissance de la physique des processus d'érosion et de transport des sédiments, ils décrivent le système « sédiment » en utilisant les équations qui gouvernent le transfert de masse, de moment et d'énergie (Merritt et al., 2003 ; Saavedra, 2005).

Une liste non exhaustive de ces modèles est présentée dans le Tableau 1.

Mais parmi ces modèles, beaucoup nécessitent un grand nombre de paramètres d'entrée (LISEM, WEPP, EUROSEM, KINEROS2, SHETRAN, EROSION-3D, AGNPS, LASCAM, ANSWERS, CREAMS), ou ne calculent que la quantité de sédiments générées et pas le transport de sédiments et la déposition (SEDNET, Thornes, MMMF, LISEM, AGNPS, LASCAM).

Tableau 1. Liste des modèles d'érosion et de redéposition

<u>Nom du modèle</u>	<u>Type de modèle</u>	<u>Echelle</u>	<u>Paramètres d'entrée</u>	<u>Sortie</u>	<u>Références scientifiques</u>
Modèles d'érosion/transport sédiments					
SEDNET	conceptuel	Petit ss-BV	20 faciles à obtenir (exemple : Surface de la section, bulk densité, vitesse des sédiments, somme annuelle des précipitations moyennes)	<ul style="list-style-type: none"> - sédiments suspendus - contributions relatives des écoulements - processus d'érosion en banc et en ravine 	Prosser et al., 2001 Newham et al., 2003 Ding& Richards, 2009
Thornes	conceptuel	ss-BV	<ul style="list-style-type: none"> - quantité de pluie journalière - durée de la pluie - intensité du pic - durée du pic - quantité de ruissellement - taux du ruissellement maximal 	<ul style="list-style-type: none"> - ruissellement - érosion 	Diodato, 2006 ANH, 2009
MMMF	conceptuel	ss-BV	<ul style="list-style-type: none"> - quantité de pluie - durée de la pluie - intensité du pic - durée du pic - quantité de ruissellement - Conductivité hydraulique - MNT 	<ul style="list-style-type: none"> - ruissellement - érosion 	Morgan& Duzant, 2008
USPED	physique	ss-BV	<ul style="list-style-type: none"> - facteur R - pluviographe - un évènement de pluie - quantité de ruissellement 	<ul style="list-style-type: none"> - érosion - déposition 	Mitasova et al., 1996

			- débit de pointe		
LISEM	physique	Petit ss-BV	Très détaillés et de haute résolution (raster des zones de pluie, direction des drains, gradient de pente, localisation et largeurs des chenaux, raster des gradient du lit du chenal, fraction du sol couvert par végétation, index de la surface enherbée, rugosité du sol, charge caillouteuse de la surface du sol, largeur des routes pavées et autres surface, conductivité saturée, humidité du sol à saturation, humidité du sol initiale, paramètre de succion : pression matricielle)	<ul style="list-style-type: none"> - ruissellement - rendement en sédiments 	<p>De Roo et al. 1994</p> <p>De Roo&Jetten, 1999</p> <p>Jetten et al., 2003</p>
WEPP	physique	ss-BV	Nécessite beaucoup de paramètres (>200 !) : composants de croissance et de résidu de plantes (couverture et taille, LAI par jour), dates et pratiques de gestion, volumes d'eaux de surface, rugosité hydraulique, approximations de durée et du pic du flux, rugosité, densité, conductivité hydraulique à saturation, configuration du BV, topographie du chenal, sols du chenal, gestion du chenal, caractéristiques hydrauliques du chenal.	<ul style="list-style-type: none"> - ruissellement - caractéristiques/rendements en sédiments - forme des pertes en sédiments/perte en sol 	<p>Flanagan et al., 2007</p> <p>Mullana e tal., 2012</p>
EUROSEM	physique	Petit ss-BV	Paramètre hydrologique et de végétation nombreux et pas toujours physiquement mesurables : précipitation, microtopo et topographie, végétation, propriétés hydrauliques et mécanique du sol (conductivité hydraulique du sol, quantité de pluie déjà absorbée par le sol, vitesse de capillarité, contenu du sol en eau, valeur initiale du contenu en eau, fraction charge caillouteuse à la surface, Manning, rayon hydraulique, pente, périmètre mouillé, largeur du chenal en amont)	<ul style="list-style-type: none"> - ruissellement - érosion - sédiments 	Morgan et al., 1997
KINEROS2	physique	Petit ss-BV	Paramètre hydrologique et de végétation nombreux et pas toujours physiquement mesurables : précipitation, microtopo et topographie, végétation, propriétés hydrauliques et mécanique du sol (conductivité hydraulique du sol, quantité de pluie déjà absorbée par le sol, vitesse de capillarité, contenu du sol en eau, valeur initiale du contenu en eau, fraction charge caillouteuse à la surface, Manning,	<ul style="list-style-type: none"> - ruissellement - taux des pics - érosion - sédiments 	Saavedra, 2005

			rayon hydraulique, pente, périmètre mouillé, largeur du chenal en amont)		
SHETRAN	physique	ss-BV	+ de 30 paramètres (flux d'eau, transport de sédiments et transport de solutés)	<ul style="list-style-type: none"> - l'érosion des sols par impact des gouttes de pluie et tombant des feuilles et par écoulement de surface (sans rigole) - le transport du matériel érodé par écoulement de surface 	Ewen et al., 2000
EROSION-3D	physique	ss-BV	Intensité de la pluie et durée, MNT, Texture, Bulk density, COT, humidité initiale du sol, Manning, résistance à l'érosion, couverture de la canopée	<ul style="list-style-type: none"> - ruissellement - érosion - sédiments 	Schmidt et al., 1999
CAESAR	physique	variable	<ul style="list-style-type: none"> - modèle numérique de terrain - pluies horaires sur la période considérée - caractéristiques granulométriques du sol. 	Distribution des altitudes et des sédiments, débits d'eau et de sédiments	Coulthard et al. , 2001, 2002, 2003, 2012 Hancock et al., 2010, 2011, 2012 Van de Wiel et al., 2007
VFSMod	physique	Bande enherbée	<ul style="list-style-type: none"> - Hyétogramme de pluie - Conductivité hydraulique à saturation du sol - Le contenu en eau du sol à la saturation - Teneur en eau initiale du sol - Succion du sol au front d'infiltration - Stockage de surface du sol - Hydrogramme - Longueur + largeur de la bande enherbée - Pente - Coefficient de Manning - Caractéristiques des sédiments entrants (taille médiane des 	Efficacité de rétention du ruissellement et des sédiments	Muñoz-Carpena et al., 1999, 2011 Abu-Zreig et al., 2001

			particules, densité, vitesse de chute) - Espacement entre les tiges de végétation + hauteur - Porosité du dépôt en sédiments - Concentration en sédiments du flux entrant (sédimentographe) - Proportion en sédiments fins - Paramètres de transport pour les pesticides (si besoin) - Nombre de nœuds pour le domaine - Le nombre de courants pour la résolution numérique et le temps total de simulation		
RUSLE2	conceptuel	ss-BV	- érosivité - erodibilité - forme de la pente, pente et longueur de pente - facteur cultural	Perte en sol, détachement, planning de conservation des pertes en sol, rendement en sédiments	USDA-Agricultural Research Service, 1998 Yoder et al., 2001 Kinnell, 2010
Landsoil	physique	De la parcelle au BV	- Raster MNT - Stade de fermeture de la surface du sol (4 classes) - Rugosité moyenne de la surface dans le sens de travail du sol (dénivelé en cm) (de 0 à 15 cm) - importance de la couverture végétale (4 classes en %) - Rugosité moyenne de la surface dans le sens perpendiculaire à celui du travail du sol (dénivelé en cm) (de 0 à 15 cm) - azimut du sens de travail du sol (angle en °) - occupation du sol (code culture) - raster de la pluie (mm) - raster de la durée (heure)	Nouvel MNT, accumulation du ruissellement	Ciampalini et al, 2012

			<ul style="list-style-type: none"> - raster de la pluie des 48h précédentes (mm) - raster de l'intensité maximale de la pluie (mm/h) - Polygone parcellaire 		
Watem/ Sedem	conceptuel	ss-BV	<ul style="list-style-type: none"> - MNT (20m) - parcelle - C - K - R - coefficient de capacité de transport - coefficient de transport du labour - bulk density 	Carte de l'érosion/déposition par pixel	Notebaert et al., 2006
Modèles d'érosion/transport sédiments et qualité des eaux					
AGNPS	conceptuel	Petit ss-BV	400 paramètres (climat, caractérisation du terrain, opérations sur le terrain, caractéristiques chimiques, opérations d'élevage)	<ul style="list-style-type: none"> - volume de ruissellement - taux critique - concentration en SS, N, P et COD 	Bosch et al., 2001
LASCAM	conceptuel	BV	Précipitation journalière, évaporation, usage du sol (index de couverture végétale), données topo, mesures de courant	<ul style="list-style-type: none"> - Ruissellement - sédiments - flux de sel 	Viney et al., 2000
ANSWERS	physique	Petit ss-BV	Pente, porosité, contenu en humidité, capacité d'infiltration, érodibilité, couverture, capacité d'interception, facteur C et P, rugosité, rétention de surface, largeur et rugosité du chenal	<ul style="list-style-type: none"> - sédiments - nutriments 	Sharma & Singh, 1995
CREAMS	physique	Parcelle	Grand nombre de paramètres (50 : hydrologie, érosion, pesticides, nutriments)	<ul style="list-style-type: none"> - érosion - déposition 	Shirmohammadi et al., 2001

Dans le contexte du projet GISER, l'objectif est de pouvoir cartographier et quantifier les dépôts de sédiments. Par conséquent, il faut un modèle qui

- soit distribué,
- ajuste le paysage en réponse à l'érosion et au dépôt (donc qui utilise un MNT de départ et le modifie progressivement).

Sur cette base, 3 modèles ont été retenus et sont présentés plus en détails ci-dessous.

1.1 WATEM/SEDEM

WATEM/SEDEM est un modèle de la perte de sol et du transport de sédiments (Figure 1). Il a été calibré et validé à l'aide de données concernant l'apport de sédiments de 21 bassins versants en Belgique du nord et centrale.

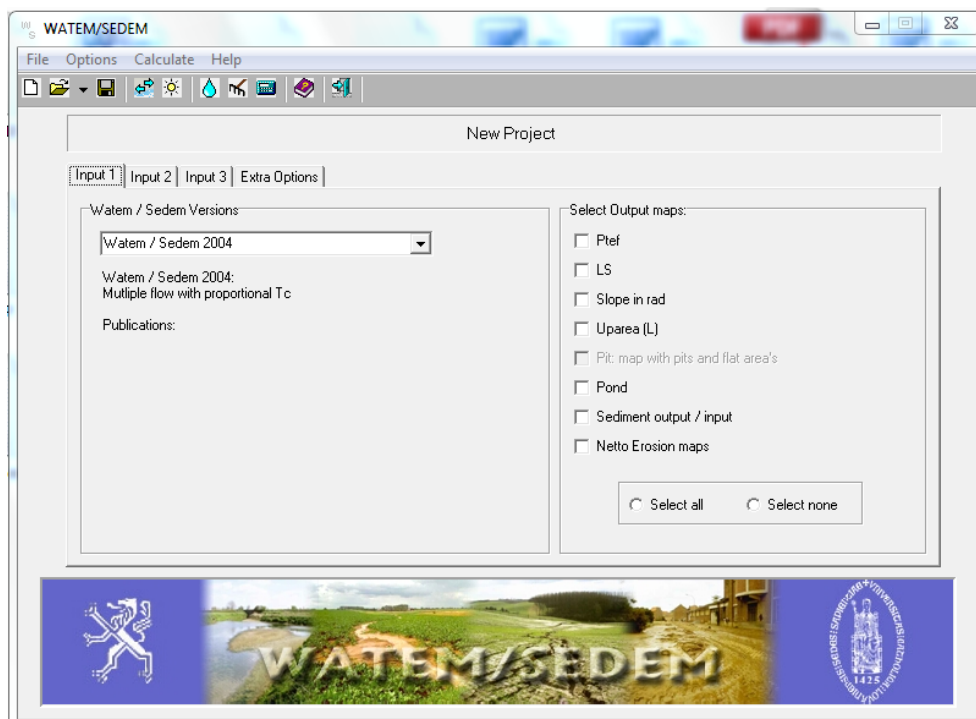


Figure 1.interface du modèle Watem-sedem

Le modèle est une version adaptée de WATEM (Water and Tillage Erosion Model ; Van Oost et al., 2000) et de SEDEM (Sediment Delivery Model ; Van Rompaey et al., 2001). Il comprend plusieurs parties, permettant de :

- Calculer la perte en terre par l'érosion :
 - o inter-rigoles et en rigoles,
 - o en ravines temporaires,
 - o par le travail du sol.
- Estimer l'exportation des sédiments vers les cours d'eau.

L'ajout d'une composante « déposition » permet de quantifier l'intensité réelle de la dégradation du sol et les quantités de sédiments charriés vers les cours d'eau et les zones d'habitation. WATEM/SEDEM ne tient pas compte de la perte en terre due à l'arrachage des cultures à racines et à tubercules.

1.1.1 Les algorithmes de Watem/Sedem

1.1.1.1 L'érosion hydrique

Le modèle Watem/Sedem a été développé au Laboratoire de Géomorphologie Expérimentale (KUL). Dans ce modèle, la perte en sol est basée sur le modèle de RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).

$$A = R * K * LS * C * P$$

- A : quantité moyenne de perte en sol causée par l'érosion en ravines [t ha-1an-1]
- R : facteur d'érosivité de la pluie [MJ mm ha-1an-1]
- K : facteur d'érodibilité du sol [t h MJ-1 mm-1]
- LS : facteur topographique de pente et de longueur [-]
- C : facteur cultural [-]
- P : facteur de contrôle de l'érosion [-]

1.1.1.2 Le transport des sédiments

Un deuxième module dans Watem/Sedem permet de calculer le transport des sédiments et la sédimentation. Le modèle calcule la quantité de sédiments exportée jusqu'à la surface de l'eau. Cela peut être fait en acheminant les sédiments jusqu'à la rivière et en tenant compte de la déposition possible des sédiments.

La déposition est contrôlée par la capacité de transport (T_c), calculée pour chaque pixel. Cette capacité de transport est la quantité maximale de sédiments qui peut passer à travers un pixel.

La capacité de transport est supposée proportionnelle au volume potentiel d'érosion en ravines :

$$T_c = k_{tc} * E_{prg} = k_{tc} * R * K * (LS - 4.12 * S_g^{0.8})$$

- k_{tc} : coefficient de capacité de transport (doit être calibré et validé), valeurs proposées par Van Rompaey et al. (2001) pour le bassin de la Dyle, avec une résolution de 20m
- E_{prg} : érosion potentielle en ravines
- S_g : pente locale (m/m)
- R, K, LS : facteurs de l'équation de RUSLE

Si le flux de sédiments dépasse en un point la capacité de transport, il y a dépôt et la quantité de sédiments quittant ce point égale la capacité de transport.

1.1.1.3 L'érosion due au travail du sol

Le flux net dû à la translocation du labour est proportionnelle au gradient de pente local :

$$Q_s = K_t * S$$

S : gradient de pente local

Le modèle est basé sur le modèle d'érosion des sols STREAM (Cerdan, 2002a) et sur le modèle d'érosion de labour WaTEM/SEDEM (Govers, 1994). STREAM (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion in relation with Agricultural Management) est un système expert opérant à l'échelle de la petite zone/domaine et à l'échelle de l'événement pluvieux, qui est spatialement distribué et a été développé sous la plate-forme Arcgis dans le langage Arc Objet (Figure 2).



L'hypothèse sur laquelle le système est basé, est que les caractéristiques de la surface du sol sont les facteurs majeurs contrôlant les processus de ruissellement de l'eau et de redistribution/érosion des sols dans les paysages agricoles. Les caractéristiques de surface incluent la rugosité du sol, l'encroustement de surface et la couverture par la végétation évaluées à l'échelle du domaine. Toutes ces propriétés ont été classifiées par des règles développées par Le Bissonais (1998, 2005) pour analyser l'infiltration de l'eau et le ruissellement.

Le modèle considère un équilibre infiltration/ruissellement pour des événements de pluie simple sur base des caractéristiques de pluie :

- la quantité totale de pluie
- L'intensité maximale
- La durée de la pluie

Le stockage de l'eau et le ruissellement sont calculés pour chaque pixel et interviennent dans le calcul de l'infiltration du sol comme suit :

$$B = T - W - I * t$$

B : équilibre infiltration ruissellement en mm ;

T : la quantité totale de l'événement pluvieux en mm

W : le stockage d'eau du sol résiduel après l'événement précédent en mm ;

I : le taux d'infiltration du sol en mm/heure

t : durée de l'événement de ruissellement en heures

L'infiltration du sol et le stockage d'eau résiduel sont estimées pour les propriétés de surface du sol et pris en compte pour une collection de 6 classes. Le ruissellement résultant est acheminé à l'échelle de la zone en utilisant un modèle de ruissellement simple flux modifié (Jenson and Domingue, 1988; Souchère et al., 1998), calculé à chaque pixel avec un outil implémenté dans un code structuré en Arc Objet, comme un équilibre infiltration/ruissellement suivant la contribution des cellules amont :

$$V = a * B * 10^{-3} + \sum V_i$$

V : ruissellement cumulé quittant la cellule en m³

a : aire du pixel en m²

V_i : ruissellement venant du pixel i amont en m³.

La direction du ruissellement peut suivre une direction linéaire principale dans le paysage, comme une direction de fossé ou de labours dans les champs. La modification d'une direction est calculée considérant le chemin d'écoulement de la topographie et les directions de labour avec un effet de bord basé sur la rugosité de surface du sol. Pour considérer le réseau de canaux, un élément linéaire du chemin de l'eau est introduit avec la possibilité de modifier sa valeur d'infiltration.

1.2.1 Les processus d'érosion considérés

1.2.1.1 L'érosion hydrique

1.2.1.1.1 Erosion diffuse

Le calcul de l'érosion hydrique diffuse inclut les processus de pente référant à une translocation de masse par ruissellement dans laquelle le flux de l'eau est responsable de la remobilisation des particules

détachées par l'érosion par effet splash. Dans le modèle, l'évaluation vient d'une analyse expert des propriétés de surface basée sur les observations de pluie et de ruissellement de terrain. Une combinaison des propriétés de surface et des caractéristiques de pluie est utilisée pour estimer la concentration en sédiments à l'échelle de la parcelle (γ , g/l):

$$\gamma = f(C, R, F, I_{p_{\max}})$$

C: couverture végétale (%) (Règles expert et observations à la parcelle)

R: rugosité de surface (règles expert et observations à la parcelle)

F : encroustement du sol (classes) (règles expert et observations à la parcelle)

$I_{p_{\max}}$: intensité de la pluie maximale (mm/h)

La distribution de sédiments dans chaque pixel i (M_i , kg) est calculée en intégrant la concentration en sédiments avec le volume de ruissellement :

$$M_i = \gamma V$$

Avec V le volume de ruissellement (m^3) et γ la concentration en sédiments à l'échelle de la parcelle (g/l).

Pour quantifier l'influence de la pente, le débit de masse est réinterprété en introduisant une fonction basée sur le modèle WEPP (Laften, 1991) :

$$S_f = 1.05 + 0.85 e^{-4 \sin \theta}$$

S_f : facteur de pente adimensionnel

θ : pente locale (°)

M_i est calculé en considérant la dépendance à la pente :

$$M_i = \gamma S_f V$$

La formule ci-dessus permet de considérer une description expert de l'érosion diffuse et d'arranger cette variabilité selon l'influence locale de la pente. Appliquant cette dépendance, il n'y a pas de différence dans l'équilibre du domaine. L'estimation originale en termes de taux quittant la parcelle (échelle à laquelle l'érosion a été évaluée) est préservée en appliquant la modification suivante :

$$M_i = [\gamma + \gamma (S_f - S_*)] V$$

S_* : pente moyenne de la parcelle après application de la fonction modifiante

1.2.1.1.2 Module d'érosion concentrée

Le module d'érosion concentrée est basé sur une relation empirique entre les propriétés de surface du sol, la pente, l'accumulation du ruissellement cumulé et les sections des ravines observé.

Sensibilité à l'érosion concentrée Ω :

$$\Omega = \text{friction} \times \text{cohésion} \times V \times S$$

Friction et cohésion représentent les facteurs de classe dépendant de la couverture du sol et de la rugosité de surface

S : pente locale en m/m

V : volume de ruissellement (m³)

Les modules diffus et concentrés sont limités en transport de sédiment, contrôlés par la concentration maximum en sédiments basée sur plusieurs fonctions de seuil en respectant la topographie locale et la couverture du sol. Cela inclut la concavité du profil, le gradient de pente, le type d'usage du sol, et la couverture du sol.

1.2.1.2 Les redistributions du sol par l'érosion de labour causée par les pratiques agricoles

Le taux de transport du sol est calculé comme suit :

$$Q_s = -K_t S$$

Q_s : unité de flux volumétrique de sédiments (kg/m)

K_t : coefficient de labour (kg/m)

S : pente locale en m/m

Le modèle considère deux directions principales de labour selon la ligne de niveau ou selon la pente. Toutes les directions intermédiaires entre la direction de la pente et du labour sont discrétisées en classe et donc, les coefficient de labour les plus appropriés à partir de table de référence de la littérature sont appliqués (Van Muysen, 2000).

1.3 CAESAR

Le logiciel CAESAR se présente comme à la Figure 3.

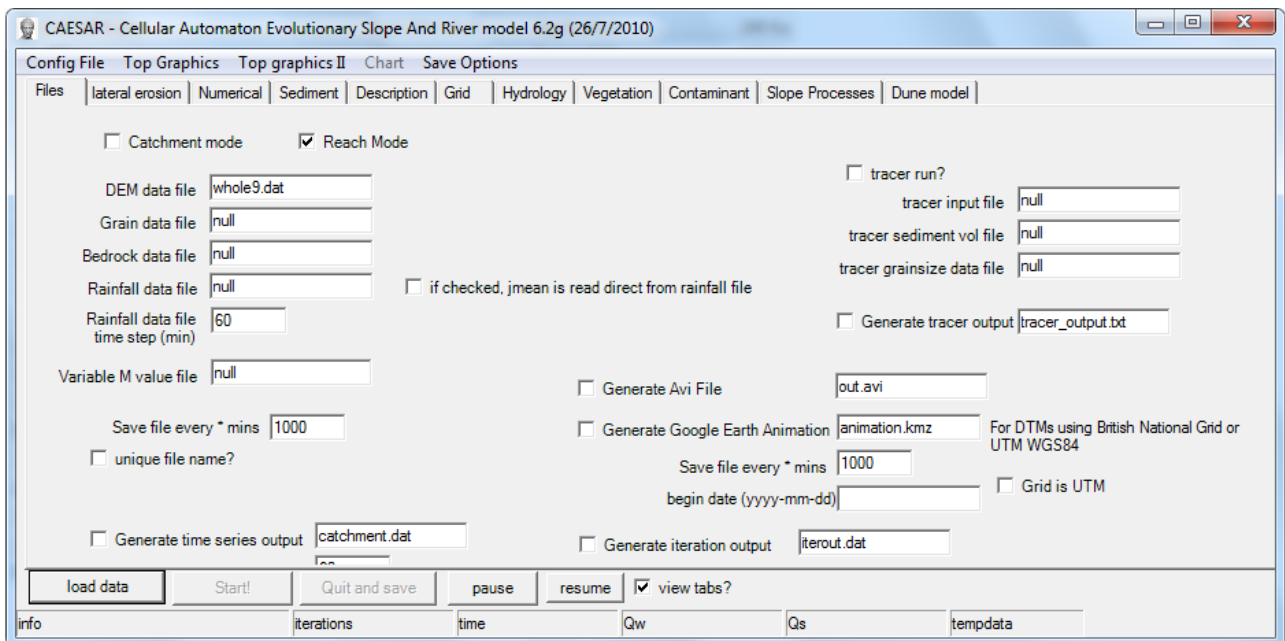


Figure 3. Interface de Caesar

1.3.1 Calcul du débit total - TOPMODEL

Pour chaque cellule appartenant à la zone étudiée, une version modifiée du modèle TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979) génère le débit de surface et de subsurface (=hypodermique) Q_{tot} (les deux débits étant combinés).

$$Q_{tot} = \frac{\frac{m}{T} \log((r - j_t) + j_t * \exp(\frac{rT}{m}))}{r}$$

- T : pas de temps (s)
- r : intensité de la pluie (m/h)
- m : paramètre qui contrôle l'augmentation et la diminution du contenu en humidité du sol et qui est évalué à partir de la courbe de décrue de l'hydrogramme de crue (nécessite donc une calibration du modèle), calé à 0.01 au Nord de l'Australie (Coulthard, 2012)

$$j_t = \text{contenu en humidité du sol} = \frac{r}{\frac{r - j_{t-1}}{j_{t-1}} \exp(\frac{(0 - r)T}{m}) + 1}$$

Remarque : S'il n'y a pas de précipitations ($r=0$), on utilise les équations suivantes :

$$Q_{tot} = \frac{m}{T} \log(1 + (\frac{j_t T}{m}))$$

$$j_t = \frac{j_{t-1}}{1 + (\frac{j_{t-1} T}{m})}$$

1.3.2 Calcul de l'infiltration

Pour chaque cellule de la zone d'intérêt, un seuil d'infiltration est estimé. Ce seuil dépend de la quantité d'eau qui peut s'infiltrer dans le sol, de la conductivité hydraulique du sol (K), de la pente (S) et de la résolution du MNT (Dx).

$$Q_{sub} = KS(Dx)^2$$

1.3.3 Proportion acheminée aux trois cellules voisines

Le ruissellement de subsurface est ensuite acheminé aux autres cellules à l'aide d'une routine à balayage particulière (voir paragraphe suivant) et la proportion de l'infiltration attribuée à chacune des 3 cellules receveuses est donnée par l'équation suivante :

$$Q_i = Q_{sub} \frac{S_i}{\sum S_i}$$

- Q_i : fraction de débit délivrée à la cellule voisine i (m^3/s)
- Q_{sub} : ruissellement de subsurface total de la cellule donneuse (m^3/s)

- Si : pente entre la cellule considérée et la cellule voisine i (pour les cellules voisines en diagonales, on divise par $\sqrt{2(Dx^2)}$).

On soustrait ensuite le seuil d'infiltration au débit total $Q_{surf} = (Q_{tot} - \text{Threshold})$ et on obtient le ruissellement.

1.3.4 Hauteur d'eau transmise à chaque cellule (d) :

$$d = \left(\frac{Q_n}{S^{0.5}} \right)^{3/5}$$

- S : pente ;
- n : coefficient de Manning
- Q = Q_{surf}

Remarque : Pour les pentes très faibles, le calcul de la hauteur d'eau peut conduire à une valeur excessive. Pour éviter cela, quand la pente est inférieure à 0.005, la profondeur est mise à la même valeur que le débit.

1.3.5 Proportion de ruissellement acheminée aux trois cellules voisines

L'eau de surface est ensuite acheminée aux cellules voisines, le calcul des proportions de ruissellement par cellule tient compte de la hauteur d'eau et de différence d'altitude entre les pixels :

$$Q_i = Q_{surf} \frac{[(e + d) - e_i]}{\sum [(e + d) - e_i]}$$

- Q_i : fraction de débit délivrée à la cellule voisine i (m^3/s)
- Q_{surf} : ruissellement de surface total de la cellule donneuse (m^3/s)
- e : altitude (m)
- d : profondeur (m)
- i : numéro de la cellule receveuse

La hauteur d'eau maximale calculée pour chacun des quatre balayages (voir point suivant) est enregistrée et utilisée pour les calculs d'érosion fluviale et de dépôt.

1.3.6 Algorithme à balayage

Le modèle utilise un algorithme à balayage simple qui permet de calculer le débit dans toutes les directions. Il fonctionne sur un maillage quadrillé et est illustré à la Figure 4.

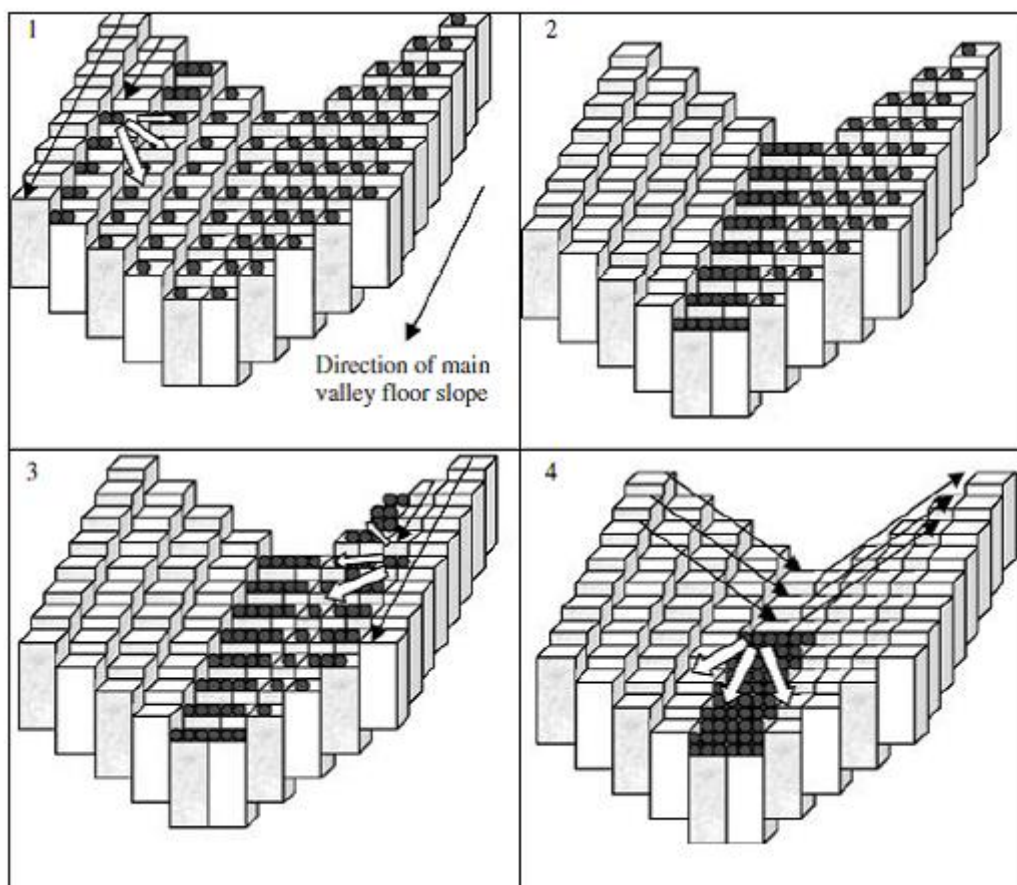


Figure 4. Algorithme d'écoulement - balayage

Cette figure représente une vallée en forme de « V ». Les points noirs représentent les précipitations ajoutées à chaque maille. A chaque itération, la procédure effectue 4 balayages. Le premier balayage fonctionne de gauche à droite (schéma 1) et à chaque cellule, l'eau est poussée vers la droite, dans les 3 cellules voisines les plus basses. Quand la base de la vallée est atteinte, le balayage se poursuit vers la droite mais comme les cellules sont toutes plus élevées, le ruissellement n'est pas transmis plus loin vers la droite (schéma 2). Au deuxième balayage (schéma 3), la même procédure est effectuée mais cette fois, de droite à gauche. Toute l'eau du bassin versant se retrouve alors dans le fond de la vallée. Le troisième balayage, fonctionnant du haut vers le bas, pousse toute l'eau en dehors du bassin versant (schéma 4). Un quatrième balayage fonctionne ensuite du bas vers le haut mais n'a aucun effet dans cette configuration-ci de relief (non représenté sur la figure).

A chaque balayage, le débit maximum à travers chaque point est enregistré et pris comme débit pour ce point.

Cette méthode présente l'avantage d'être rapide (ce qui permet d'appliquer CAESAR à des maillages de plus d'un millions de cellules) tout en gardant les caractéristiques des algorithmes de flux à directions multiples.

1.3.7 Erosion concentrée/Dépôt

1.3.7.1 Représentation des axes d'écoulement

Un système de couches actives est utilisé de manière similaire à Parker (1990), Hoey et Fergusson (1994), et Toro-Escobar et al (1996) pour représenter l'érosion et le dépôt de grains de différentes tailles.

CAESAR utilise 12 couches actives :

- 1 pour le socle rocheux (non érodible);
- 1 pour la couche active de surface ;
- 10 couches de sous-surface

La profondeur de la couche active de surface est définie comme étant deux fois le diamètre représentant 90% des granulométries cumulées ($2 \cdot D_{90}$). Pour les 10 couches actives inférieures, la profondeur est définie comme étant $4 \cdot D_{90}$.

Neuf tailles de particules sont représentées, allant de 0.0005 à 0.256 m. De plus, la couche active de surface possède deux catégories supplémentaires, représentant le tapis de végétation et le lit rocheux.

Quand du matériel est ajouté à la couche active supérieure (dépôt), du matériel est enlevé de cette couche et ajouté à la couche située en dessous :

$$E_i = \left(\frac{F_i^x}{\sum F_{i-n}^x} \right) (\sum F_{i-n}^x - A)$$

- E_i : quantité de matière enlevée de la couche supérieure (x) et ajoutée à la couche située juste en dessous (x+1), de fraction de taille de grain i;
- A : épaisseur correcte de la couche active ($2 \cdot D_{90}$ ou $4 \cdot D_{90}$) ;
- Fix : proportion de matériel déplacé, de classe granulométrique i, dans la couche x.

Dans le cas de l'érosion, du matériel est amené des couches inférieures selon l'équation :

$$E_i = \left(\frac{F_i^{x+1}}{\sum F_{i-n}^{x+1}} \right) (A - \sum F_{i-n}^x)$$

Ces deux équations se propagent vers le bas et vers le haut respectivement, permettant le déplacement du matériel à travers les couches actives. Aucune fonction de transfert ou terme de filtration n'est utilisé (Hoey et Fergusson, 1994, et Toro-Escobar et al., 1996) car il n'y a pas d'échelle temporelle.

Cette représentation du lit de la rivière permet le développement d'un blindage de surface et le stockage des sédiments déposés dans la stratigraphie des 10 autres couches actives.

1.3.7.2 Calcul de l'érosion concentrée

La quantité de matériel érodé par érosion concentrée, de cellule en cellule, est déterminée en utilisant la formulation de Einstein-Brown (cette formulation a été choisie parce qu'il y a beaucoup d'informations disponibles concernant les conditions hydrauliques locales).

La charge totale érodée est la somme des différentes fractions de tailles érodées. Le calcul est donc appliqué pour les 9 classes de tailles et pour les 2 systèmes de la couche active supérieure.

Equations d'Einstein-Brown :

$$\psi = \frac{(\rho_s - \rho)^D}{\rho d S}$$

- ψ : équilibre entre les forces érosives et de retenue sur une particule ;
- $\rho_s - \rho$: densité relative de la particule immergée dans l'eau ;
- D : taille de la particule (m) ;
- d : profondeur du ruissellement (m) ;
- S : pente d'énergie ;

Un taux de transport par charriage (Φ) adimensionnel est ensuite calculé :

$$\Phi = Q_s \sqrt{\frac{\rho}{(\rho_s - \rho)gD^3}}$$

- Q_s : flux volumétrique de sédiments (m³/s)

La relation établie par Einstein permet de relier Φ à ψ :

$$\Phi = 40(1/\psi)^3$$

En réarrangeant les équations, il est donc possible de calculer le débit en sédiments Q_s .

Pour chaque cellule du maillage, la quantité de matériel qui peut être érodée pour chaque classe de taille de grains est :

- calculée ;
- enlevée de la couche active de la cellule en question ;
- déposée sur la couche active supérieure de la cellule située en aval.

1.3.8 Processus de pente

1.3.8.1 Mouvement de masse

Le mouvement de masse est représenté comme un processus de suppression instantané. Lorsque la pente entre deux cellules adjacentes dépasse un certain seuil (0.5 ou 45°), le matériel est déplacé de la cellule amont vers la cellule aval jusqu'à ce que l'angle devienne plus petit que le seuil. Comme un petit glissement dans une cellule à la base d'une pente peut déclencher des mouvements plus importants en amont, le modèle utilise une procédure itérative pour vérifier les cellules adjacentes jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de mouvement.

1.3.8.2 Glissement de terrain (soil creep)

Le glissement de terrain est calculé entre chaque cellule tous les mois (selon l'échelle de temps du modèle), à l'aide de l'équation de diffusion suivante :

$$Creep = \frac{S0.01}{Dx}$$

- S : pente
- Dx : résolution du MNT (m)
- creep : glissement (par an)

Pour le mouvement de masse ainsi que pour le glissement, la taille du grain du matériel déplacé est prise en compte en transférant le matériel des couches actives des cellules donneuses vers les receveuses. Cela permet à du sédiment « neuf » d’être transféré des versants vers les rivières.

1.3.9 Le couvert végétal

Les interactions entre la végétation et le modèle sont représentées de deux manières. Premièrement, les changements dans le couvert végétal (ex : déforestation) sont pris en compte en modifiant la valeur du paramètre m dans le modèle hydrologique car cela modifie le pic et la durée de l’hydrogramme de crue pour un événement orageux donné.

Deuxièmement, une fraction « turf » (représentant une protection apportée au sol par la végétation) est ajoutée à la couche active de surface. Des mesures expérimentales de contraintes de cisaillement obtenues par Prosser (1996) pour des surfaces recouvertes de végétation sont utilisées pour calculer la résistivité de cette couche.

Un modèle simple de croissance est également inclus, donc les surfaces alluviales déposées peuvent se végétaliser. Le modèle sera entièrement revégétalisé en 10 ans, selon un taux de croissance linéaire.

Une représentation simplifiée du modèle est schématisée dans la Figure 5.

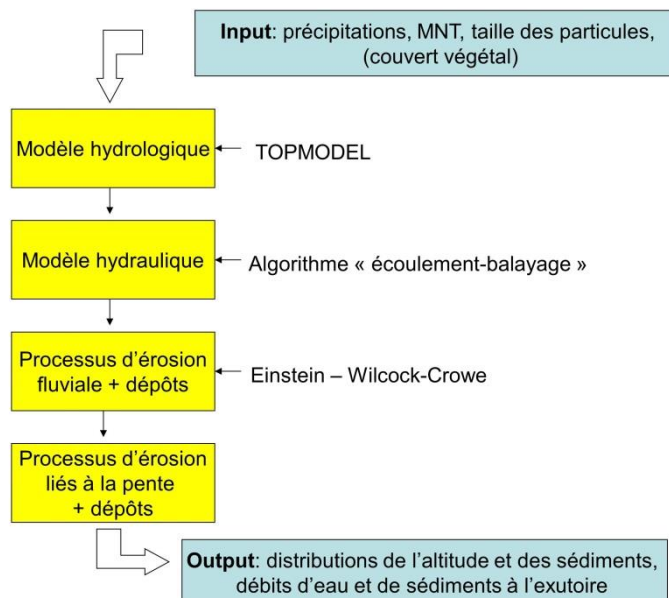


Figure 5. Représentation schématique de Caesar

2 Comparaison des modèles

Une comparaison des 3 modèles développés est présentée dans le Tableau 2.

Tableau 2. Comparaison des modèles de déposition

	<u>Gestion de l'évolution de la topographie</u>	<u>Echelle temporelle</u>	<u>Prise en compte du labour</u>	<u>Prise en compte des variabilités du sol</u>
Watem/sedem	Non	Annuelle	Oui	Oui
Caesar	Oui	Événementielle	Non	Peu
Landsoil	Oui	Événementielle	Oui	Oui

Le choix du modèle doit être fait en fonction de l'usage que Giser fera de celui-ci. Une approche temporelle souple semble préférable afin de valoriser toutes les données observées sur le terrain (événementielles ou non). Par ailleurs, Watem/sedem comprend des paramètres calibrés très sensibles à la résolution du MNT (au dire de ses auteurs) et disponibles pour un MNT de 20 mètres uniquement actuellement.

Le modèle Caesar est moins « axé sol » mais davantage topographie/hydrographie, il ne prend pas en considération l'effet du travail du sol.

La préférence se porte donc sur Landsoil car il présente simultanément les caractéristiques suivantes: il est utilisable sur des événements individuels et sur des chroniques longues, il ajuste le paysage en réponse à l'érosion et au dépôt, il prend en compte à la fois les variabilités du sol (possibilités d'évaluer les effets d'implantation de bandes enherbées par exemple). Son module Stream a déjà été utilisé en Région wallonne et une calibration existe (Evrard, 2008).

Landsoil

Après des contacts approfondis avec les équipes de développement du modèle à l'INRA (Rennes et Orléans), un accord d'échange et un premier séjour pour la prise en main du modèle, Giser a obtenu la mise à disposition du modèle Landsoil.

Le modèle Landsoil a été développé par Ciampalini et al. en 2012 et ses sites actuels d'utilisation sont le contexte méditerranéen (Ciampalini et al., 2012) et la Bretagne (Lacoste, 2012). Ce modèle à base expert a été développé pour des sols semblables à ceux de nos régions (Souchère, 1998 ; Cerdan, 2002a ; Cerdan, 2002b ; Souchère, 2003).

1 Données d'entrée du modèle

Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons les différentes données d'entrée nécessaires à l'utilisation du modèle. Dans son interface graphique, chaque champ doit se remplir progressivement et ensuite, les différents onglets deviennent disponibles les uns à la suite des autres après qu'ils soient correctement complétés. Ce développement dans Arcgis permet la visualisation rapide des sorties du modèle sous format raster dont la taille des pixels dépend de la résolution du MNT d'entrée.

1.1 Conditions initiales

1.1.1 Données pédologiques et d'organisation du paysage

1.1.1.1 Le parcellaire

1.1.1.1.1 Les états de surface

Un parcellaire, au format vecteur, est nécessaire au modèle pour fonctionner. À chaque parcelle, est associé un état de surface du sol au moment de chaque événement (faciès, rugosité, couverture végétale) pour caractériser son aptitude à l'infiltration ou au ruissellement et à l'émission de charges solides.

Un répertoire des rotations culturales et variations d'état de surface du sol associées sur le bassin versant est donc nécessaire.

Pour chacun des paramètres, différentes classes sont reconnues par le modèle :

- ❖ Pour le faciès, 4 classes sont distinguées dans le modèle :

<u>Classe</u>	<u>Description</u>
F0	Stade fragmentaire (état initial conféré par le travail du sol) : chaque particule de terre visible en surface appartient à un agglomérat plus ou moins important mais parfaitement délimité et séparé de ses voisins
F11	1er stade de dégradation (faciès fragmentaire altéré, croûte structurale discontinue) : certains fragments sont bien distincts et leur forme est très peu modifiée par rapport à l'état F0, alors que d'autres sont soudés, leurs contours restant reconnaissables
F12	2ème stade de dégradation ---> croûte structurale (faciès continu sans dispersion) : les fragments sont intégrés dans les zones d'aspect continu, leurs contours ne sont plus reconnaissables mais il n'y a pas de signe de dispersion
F2	Stade sédimentaire (faciès continu avec croûte sédimentaire): on distingue alors, nettement les zones hautes présentant des signes de départ de terre et les micro-dépressions recouvertes d'un manteau très lisse, plus ou moins épais, constitué de particules élémentaires avec alternance de lits de limons et de sables fins de teinte claire et des taches plus foncées constituées d'une fine pellicule d'argile et de matières organiques

La distinction n'est actuellement faite que sur base d'associations visuelles à un gabarit tel que ci-dessous (Faculté universitaire de Tours, S. Salvador).



F11



F12



F2

Afin de standardiser la qualification du faciès, un gabarit quantifié devrait être établi via une méthode telle que le « Visual Soil Assessment (European Commission) ».

❖ Pour la couverture du sol, le choix peut se faire entre 3 classes quantifiées : de 0-20%, de 21 à 60% et de 61 à 100% de couverture.

❖ Pour la rugosité moyenne de la surface (dans le sens du travail du sol (différence entre les hauteurs extrêmes du micro-relief du sol en regardant parallèlement au travail de celui-ci (Ludwig *et al.*, 1996)) et dans le sens perpendiculaire à celui du travail du sol), 5 classes existent :

- 0 à 1 cm (R0)
- 1 à 2 cm (R1)
- 2 à 5 cm (R2)
- 5 à 10 cm (R3)
- 10 à 15 cm (R4)
- >15 cm (R5)

Pour ces paramètres, une campagne photographique a été réalisée en 2014 afin d'établir nos propres gabarits pour le site. Ceci a permis de constater une bonne correspondance avec les valeurs attribuées mensuellement par culture dans la thèse réalisée par Evrard (2008). Cela va permettre d'utiliser les

valeurs issues de cette thèse qui a validé ces paramètres en contexte limoneux, pour les périodes où aucune observation ni photo n'a été réalisée (2012 et 2013). Le bassin versant utilisé par Evrard (Velm) est, en effet, très similaire à celui du bassin expérimental Giser ce qui rend la transposition de ces règles d'autant plus réaliste.

Le modèle prévoit d'associer au parcellaire les états de surface du sol. Il a été envisagé d'associer également au parcellaire les plages pédologiques pour tester leurs influences. Des tests préliminaires réalisés lors d'un travail de fin d'étude de Gembloux Agro-Bio Tech ont, à ce sujet, montré une augmentation de la capacité d'infiltration des parcelles en Abp par rapport aux autres plages pédologiques pour une même occupation du sol (par ailleurs plus importante pour les cultures de céréales que pour les cultures sarclées).

Sur cette base, des tables des états de surface mensuels pour les combinaisons entre l'occupation du sol et la pédologie ont été établies. Le Tableau 3 est donné à titre d'exemple pour les combinaisons rencontrées lors du mois d'avril 2014.

Tableau 3. Etats de surfaces du sol pour chaque combinaison occupation du sol-pédologie retrouvée sur le bassin au mois d'avril 2014 (-1 : non relevé)

Occupation du sol	Sigle pédologique	Faciès	Rugosité parallèle	Couverture végétale
Betterave sucrière	Aba	F11	R1	C1
	AbB	F11	R1	C1
	Abp	F0	R1	C1
Bois	Aba/AbB/Abp/Lba/Lbp/Sba	F0	R5	C3
Chicorée à inuline	Aba	F11	R1	C1
	Abp	F0	R1	C1
Colza/moutarde	Aba/abB/Abp	F11	R2	C3
Couvert à base d'un mélange certifié de semences contenant au moins 20% de chaque famille	Aba/AbB/Abp/Lba/Lbp/Sba	F0	R4	C3
Froment d'hiver	Aba	F12	R1	C3
	AbB	F11	R1	C3
	Abp	F11	R2	C3
	Acp	F11	R2	C3
	Lba	F11	R3	C3
	Lbp	F11	R3	C3
	Sba	F11	R3	C3
Lin textile	Aba/Abp/Lba	F0	R2	C1
Luzerne	Aba	F11	R4	C3
Maïs d'ensilage	Aba/AbB/Abp/Lba/Lbp	F11	R3	C1
Maïs grain	Aba/AbB/Abp/Lba/Lbp	F11	R3	C1
Orge d'hiver	Aba	F12	R1	C3

	AbB	F11	R1	C3
	Abp	F11	R2	C3
Pomme de terre de consommation	Aba	F11	R3	C1
	AbB	F11	R3	C1
	Abp	F12	R3	C1
Prairie permanente	Aba/AbB/Abp/Acp/Lba/Lbp/Sba	F11	R4	C3
Surface bétonnée	/	-1	-1	-1
Terre nue sans labour	Aba/Abp	F2	R0	C1
Tournière enherbée	Aba/AbB/Abp/Acp/Lba/Lbp	F11	R4	C3
Trèfle	Aba/AbB/Abp/Lba	F11	R4	C3

Ainsi, la première règle de décision vise à attribuer une capacité d'infiltration à chacune des combinaisons de ces trois paramètres. Ces règles de décision ont été initialement définies pour une zone d'étude spécifique à savoir le bassin versant de Blacqueville en Normandie (Luvisols limoneux du Pays de Caux). Elles proviennent de 13 ans d'expérimentations de laboratoire et de terrain à l'échelle locale (souvent la parcelle) créant ainsi une base de données qui a ensuite été utilisée à l'échelle du bassin versant (Souchère et al., 2005; Evrard et al., 2009). Bien qu'il y ait une forte ressemblance des caractéristiques de ces sols avec la région limoneuse belge, une validation de ces paramètres est nécessaire. Cette adaptation aux conditions locales a été réalisée grâce à des mesures de terrain réalisées au mini-disque Decagon pour les cultures sarclées ainsi que par des mesures de laboratoire au perméamètre pour les cultures de céréales (temps de mesure trop long sur site car compaction du sol et difficulté d'assurer un bon contact entre le sol et l'appareil à cause du développement important de ce type de culture) à raison de 3 répétitions par combinaisons. Le Tableau 4 compare les mesures avec celles réalisées sur les sols limoneux de Velm (Evrard, 2008) et celles de Normandie (Cerdan, 2002b). Cette campagne de mesures de terrain devra bien évidemment être poursuivie sur le long terme, la campagne ayant généré la création des règles originelles en Normandie ayant elle-même duré 13 ans (Souchère *et al.*, 2005).

Tableau 4. Capacité d'infiltration (mm/h) en fonction des états de surface

Rugosité [cm]	Taux de couvert végétal [%]	Faciès											
		F0			F11			F12			F2		
		Normandie (Cerdan, 2002b)	Velm (Evrard, 2008)	mesures BV 2014	Normandie (Cerdan, 2002b)	Velm (Evrard, 2008)	mesures BV 2014	Normandie (Cerdan, 2002b)	Velm (Evrard, 2008)	mesures BV 2014	Normandie (Cerdan, 2002b)	Velm (Evrard, 2008)	mesures BV 2014
R4	C3												
	C2												
	C1	50	60		20	60							
R3	C3						50						
	C2												
	C1	50	60		20	60		10	50				
R2	C3	50	60		50	60	30	20	60				
	C2	50	60		50	60		10	50				
	C1	50	60		20	40		10	40				
R1	C3	50	60		20	60	20	10	50	10			
	C2	50	60		20	50		10	40				
	C1	20	60		10	40	20	5	20	10			
R0	C3							10	40		5	20	
	C2									20	2	10	10
	C1	10	60		10	50		5	20		2	10	

1.1.1.1.2 Le travail du sol

D'autres données sont également attribuées au parcellaire (Figure 6) :

- l'azimut du sens de travail du sol est nécessaire. Il varie de 0 à 360°, 0° indiquant le nord en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre
- un Ktil (coefficient de transport) est aussi associé à une parcelle : Ktil max (parallèle à la direction du labour) et Ktil min (perpendiculaire à la direction du labour).

Toutes ces conditions initiales varient au cours de l'année et doivent donc être mis à jour à chaque évènement. Pour un coût en temps de modélisation réaliste, ces paramètres vont plutôt être établis mois par mois.

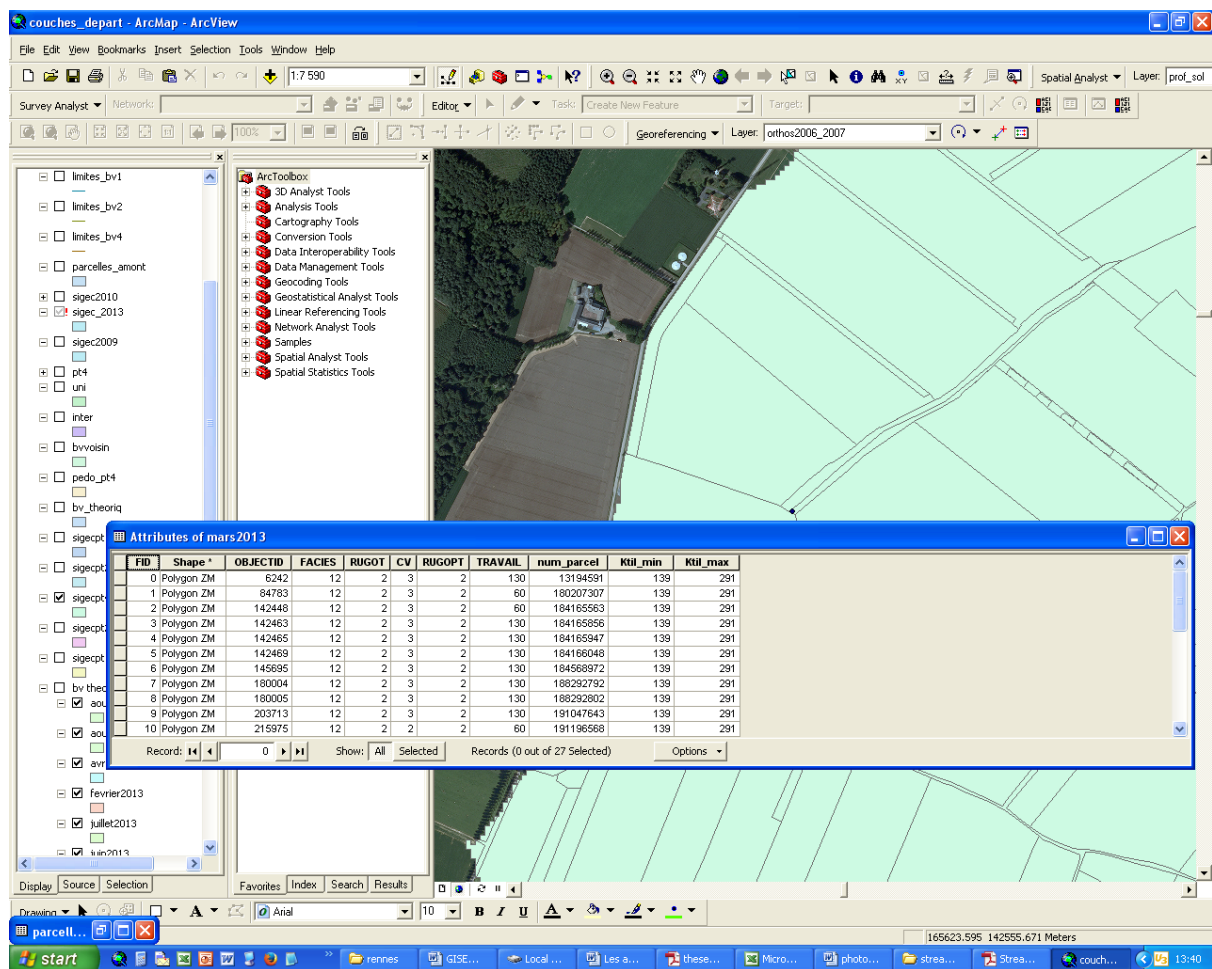


Figure 6. Attributs du parcellaire

1.1.1.2 Cartographie des types de limites de parcelles

Le modèle vise à prendre en compte l'impact de différents types de transitions entre parcelles. Ainsi, une distinction est faite entre fossé, route, dérayure, ou limite simple (Figure 7) ; cette couche est à entrer au format vecteur.



Figure 7. Cartographie des limites de parcelles dans Landsoil

Cette prise en compte de la structure du paysage (topographie, parcellaire, travail du sol, structures anthropiques, fossés, haies...) pour définir la circulation du ruissellement et les redistributions de sol est une des spécificités du modèle Landsoil.

1.1.1.3 *Autres caractéristiques pédologiques*

La profondeur initiale des sols (m) est demandée au format raster afin de prévoir (pour les simulations sur de longues durées) les cas où l'entière épaisseur du sol serait épuisée.

Une valeur moyenne de densité apparente du sol est également nécessaire pour la zone à modéliser.

1.1.2 *Données topographiques*

Un modèle numérique de terrain est nécessaire comme donnée d'entrée du modèle. Il s'agit d'une couche de type raster. Pour rappel, au fil d'événements pluvieux, le modèle fera évoluer ce modèle numérique de terrain pour rendre compte des zones d'arasement et des zones de dépôt dans le bassin versant.

1.2 *Evènements*

LandSoil fonctionne à la résolution temporelle de l'événement : pluvieux ou aratoire.

La fréquence du **travail** du sol sur le bassin (uniquement celui qui engendre un déplacement de sol au sein de la parcelle et qui peut modifier les écoulements) doit être connue pour connaître le/les évènements aratoires à simuler par an. Le type de travail du sol doit également être connu pour pouvoir déterminer les Ktil (voir 1.1.1.1).

Concernant les évènements **pluvieux**, les auteurs considèrent une pluie sans interruption de plus de 3h. Chaque événement pluvieux est caractérisé par 4 variables :

- le cumul pluviométrique au cours de l'événement (mm)
- la durée efficace de l'événement pluvieux (h) (durée pour laquelle l'intensité est \geq à 2mm/h)
- l'intensité maximale calculée à 6 min (mm h⁻¹)
- le cumul des pluies antécédentes sur 48h (mm).

Dans les règles de Landsoil, un évènement est considéré comme efficace si l'intensité maximale est supérieure ou égale à 100mm/h et si le cumul des précipitations est supérieur ou égal à 40mm.

Sur cette base, certains évènements où une crue avait été observée au point aval (point4) de notre site étaient mis en évidence. Mais d'autres événements étaient également retenus alors qu'ils n'avaient pas conduit à un écoulement significatif sur le terrain. Et à l'inverse, des événements ayant provoqué des écoulements sur le bassin n'avaient pas été sélectionnés comme efficaces par ces règles de sélection.

Un travail de fin d'étude de Gembloux Agro-Bio Tech a établi une adaptation de ces critères de sélection qui permet de retenir tous les évènements où une crue avait été observée au point 4 (les seuls pour lesquelles il n'existe pas d'évènement correspondant à la crue étant simplement les données de

précipitations non mesurées pour cause de réparation du disdromètre). Un autre pas de temps de la pluie que celui initialement employé dans le modèle a aussi été testé :

- Pas de temps d'une minute
 - Précipitations d'intensité maximale $> 4 \text{ mm.h}^{-1}$ et de hauteur $> 1,8 \text{ mm}$ (pluies intenses estivales).
 - Précipitations de hauteur $> 4 \text{ mm}$ (pluies peu intenses hivernales).
 - Précipitations de pluie antécédente $> 7\text{mm}$ et de hauteur $> 1.3\text{mm}$ (pluies avec une forte antécédence).
- Pas de temps de six minutes
 - Précipitations d'intensité maximale $> 2 \text{ mm.h}^{-1}$ et de hauteur $> 1,8 \text{ mm}$ (pluies intenses estivales).
 - Précipitations de hauteur $> 4 \text{ mm}$ (pluies peu intenses hivernales).
 - Précipitations de pluie antécédente $> 7\text{mm}$ et de hauteur $> 1.3\text{mm}$ (pluies avec une forte antécédence).

Outre la sélection de tous les évènements où une crue avait été observée, les évènements sélectionnés reprennent 89% et 93% de l'érosivité des différents évènements précipités durant la période de mesure (respectivement pour les pas de temps d'une et de six minutes).

On constate aussi à l'annexe 1 (exemple pour le pas de temps de 6minutes initialement établi dans le modèle) qu'avec ces règles, beaucoup d'autres évènements sont également sélectionnés ce qui va par conséquent, augmenter les itérations de modélisation.

Les résultats de cette étude montrent une très grande sensibilité du modèle au pas de temps utilisé. Plus particulièrement, le modèle semble être très sensible même à de très faibles changements de la durée efficace qui entraîne de fortes variations dans les volumes ruisselés et donc dans les quantités de terre érodées.

2 Résultats du modèle

Après chaque événement (pluvieux ou aratoire), les sorties du modèle LandSoil sont les suivantes pour toute maille élémentaire :

- altitude actualisée(m)
- profondeur du sol actualisée (m).

Le modèle présente aussi toute une série de cartes correspondant aux résultats intermédiaires générés de manière préliminaire au MNT de terrain actualisé (présentées à l'annexe 2).

3 Données de calibration/ validation

Une fois les résultats obtenus, le bassin versant expérimental de GISER à Chastre et les différentes mesures qui y sont réalisées serviront à la calibration et à la validation de ce modèle.

Le Tableau 5 rappelle les différentes méthodes de validation du modèle envisagée sur le bassin versant ainsi que les échelles temporelles associées. Le drone, la révision de la carte pédologique et la mesure en continu du débit et des exportations du bassin sont décrites en détail dans d'autres stand alone Giser. Outre ces mesures, pour obtenir des mesures directes de la redéposition, des treillis et jalons gradués ont été apposés au sein de zones visuellement identifiés comme des zones de dépôt de sédiments, mais le modèle a aussi été utilisé en appliquant un événement pluvieux sommant toutes les précipitations d'une année pour localiser plus finement les zones préférentielles de dépôt et d'érosion.

Tableau 5. Approches d'acquisition des données de terrain

		Echelle temporelle		
		Événement	Année	Long terme
Echelle spatiale	BV	Mesure en continu du débit et prélèvement de sédiments	Drone	Révision de la carte pédologique
	Toposéquence	Jalons gradués	Drone Mini fosses et treillis	
	Ponctuel		Drone	

4 Stratégie de mise en œuvre et d'analyse du modèle - Pistes à suivre pour la suite

✓ Identifier les unités de travail auxquelles associer les états de surface (le parcellaire, les plages pédologiques ou une combinaison des deux) en analysant le coût en temps de modélisation par rapport

aux apports significatifs de l'influence de la pédologie (dont la combinaison avec les plages augmente conséquemment le nombre d'unités de travail à modéliser).

✓ Une autre solution pour prendre la pédologie en compte serait d'identifier les éventuelles particularités locales qui peuvent être prises en compte via l'onglet « aménagements » de Landsoil. Celui-ci permet d'attribuer à des zones surimposées au parcellaire, des capacités d'infiltration différentes. Cette option permettrait de considérer les zones de colluvion comme des zones avec des valeurs d'infiltration différentes (Figure 8). Cette option sera aussi testée.

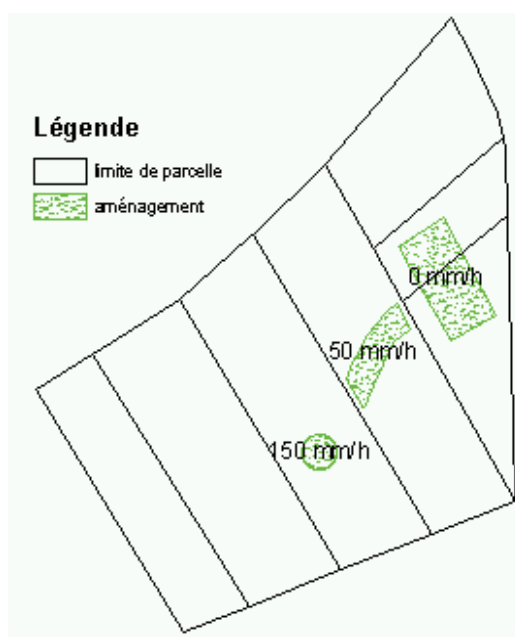


Figure 8. Option aménagement pour les plages pédologiques

✓ Dans un second temps, une analyse de long terme sera menée pour quantifier l'effet de l'usage du sol. Les résultats pourront être confrontés aux données historiques (cartographies, photographies, relevés pédologiques, etc.)

Bibliographie

Abu-Zreig, M., Rudra, R. P. , Whiteley, H. R., 2001. Validation of a vegetated filter strip model (VFSSMOD). *Hydrological processes* 15, 729–742.

Aksoy H.&Kavvas, L., 2005. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models, *Catena* 64, 247–271.

ANH, L., 2009. Regional Scale Soil Erosion Modeling for Onservation Planning Using Remote Sensing and GIS Techniques - A Case Study in The Centre of Himalayan Ranges. *7th FIG Regional Conference Spatial Data Serving People: Land Governance and the Environment – Building the Capacity*, Hanoi, Vietnam.

Bosch, D., Theurer,F., Bingner, R., Felton, G., Chaubey, I., 2001. Evaluation of the AnnAGNPS Water Quality Model . *Agricultural non-point source water quality models: their use and application*, Southern Cooperative Series Bulletin #398, USA.

Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Couturier, A. et Saby, N., 2002a. Modelling interrill erosion in small cultivated catchments. *Hydrological Processes* 16, 3215–3226.

Cerdan, O., Souchere, V., Lecomte, V., Couturier, A. et Le Bissonnais, Y., 2002b. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management. *Catena* 46, 189–205.

Ciampalini, R., Follain, S., Le Bissonnais, Y., 2012. LandSoil: A model for analysing the impact of erosion on agricultural landscape evolution, *Geomorphology*, ref 4036.

Coulthard, T., Macklin, M., 2003. Modeling long-term contamination in river systems from historical metal mining. *Geology* 31 (5), 451–454.

Coulthard, T.J., and Van De Wiel, M.J. 2006 'The Cellular Automaton Evolutionary Slope And River model (CAESAR)' in *Accounting for Sediment in Rivers*. Research Report UR-9, ed N. Wallerstein (Flood Risk Management Research Consortium, Bristol, UK) 101–119.

Coulthard, T.J., Hancock, G.R., Lowry, J.B.C., 2012. Modelling soil erosion with a downscaled landscape evolution model. *Earth Surface Processes and Landforms* 37, 1046–1055.

Coulthard, T.J., Hicks, M.D. and Van De Wiel, M.J. 2007 'Cellular modelling of river catchments and reaches: Advantages, limitations and prospects' *Geomorphology* 90, 192–207.

Coulthard, T.J., Macklin, M.G., Kirkby, M.J., 2002. A cellular model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 269–288.

Coulthard, T.J., 2001, Landscape evolution models: a software review. *Hydrological processes* 15, 165–173.

De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G., Cremers, N.H.D.T., Offermans, R.J.E., 1994. LISEM: a new physically-based hydrological and soil erosion model in a GIS-environment, theory and implementation. Variability in Stream Erosion and Sediment Transport. Proceedings of the Canberra Symposium, IAHS Publ. no. 224, 1994, Canberra, 439–448.

De Roo, A.P.J. and Jetten, V.G., 1999. Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. *Catena* 37, 477–493.

Ding, J., Richards, K., 2009. Preliminary modelling of sediment production and delivery in the Xihanshui River basin, Gansu, China. *Catena* 79, 277–287.

Diodato, N., 2006. Modelling net erosion responses to enviroclimatic changes recorded upon multisecular timescales. *Geomorphology* 80, 164–177.

Evrard, O., 2008. *Muddy floods in the Belgian loess belt: problems and solutions*. Thèse de doctorat. UCL, Louvain-la-Neuve, Belgique.

Evrard, O., Cerdan, O., van Wesemael, B., Chauvet, M., Le Bissonnais, Y., Raclot, D., Vandaele, K., Andrieux, P., Biélers, C., 2009. Reliability of an expert-based runoff and erosion model: Application of STREAM to different environments. *CATENA* 78(2), 129–141.

Ewen, J., Parkin, G., O'Connell P., 2000. Shetran: distributed river basin flow and transport modeling system. *Journal of hydrologic engineering*, 250-258.

Flanagan, D. C., Gilley, J. E., Franti, T. G., 2007. Water erosion prediction project (wepp): development history, model capabilities, and future enhancements. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(5), 1603-1612.

Hancock, G.R. , Coulthard, T., Martinez, C., Kalma, J., 2011. An evaluation of landscape evolution models to simulate decadal and centennial scale soil erosion in grassland catchments. *Journal of Hydrology* 398, 171–183.

Hancock, G.R., 2012. Modelling stream sediment concentration: an assessment of enhanced rainfall and storm frequency, *Journal of Hydrology* 430-431, 1-12.

Hancock, G.R., Lowry, J.B., Coulthard, T.J., Evans, K.G., Molire, D.R. , 2010. A catchment scale evaluation of the SIBERIA and CAESAR landscape evolution models. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 863–875.

Jetten, V., Govers, G., Hessel, R., 2003. Erosion models: quality of spatial predictions. *Hydrological processes* 17, 887–900.

Kinnell, P.I.A., 2010. Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. *Journal of Hydrology* 385, 384–397.

Lacoste, M., 2012. *Evolution des sols à l'échelle du paysage sous des conditions de changements climatique et de structure du paysage*. Thèse U.M.R. Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, Université Européenne de Bretagne, France.

Le Bissonnais, Y., Benkhadra, H., Chaplot, V., Fox, D., King, D., Daroussin, J., 1998. Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m² to small catchments. *Soil and Tillage Research* 46, 69-80.

Le Bissonnais, Y., Cerdan, O., Lecomte, V., Benkhadra, H., Souchere, V., Martin, P., 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena* 62, 111-124.

Ludwig, B., Auzet, V., Boiffin, J., Papy, F., King, D., Chadoeuf, J., 1996. Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigole de bassins versants cultivés du Nord de la France. *Etude et Gestion des Sols* 3(1), 53–70.

Merritt, W.S., Letcher, R.A. & Jakeman, J., 2003. A review of erosion and sediment transport models, *Environmental Modelling & Software* 18, 761–799.

Mitasova, H., Mitas, L., Brown, W., 2001. Multiscale Simulation of Land Use Impact on Soil Erosion and Deposition Patterns, In: D.E. Stott, R.H. Mohtar and G.C. Steinhardt *Sustaining the Global Farm. Selected*

papers from the 10th International Soil. Conservation Organization Meeting held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. 1163-1169.

Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., Iverson, L., 1996. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS, *International Journal of Geographical Information Systems*, 10:5, 629-641.

Morgan, R. P. C. and Duzant, J. H., 2008. Modified MMF (Morgan–Morgan–Finney) model for evaluating effects of crops and vegetation cover on soil erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, 90–106.

Morgan, R., Quinton, J., Smith, R., Govers, Gg., Poesen, J., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D, Styczen, M., 1998. The european soil erosion model (eurosem): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 527–544.

Mullana, D., Favis-Mortlockb, D., Fealyc, R., 2012. Addressing key limitations associated with modelling soil erosion under the impacts of future climate change, *Agricultural and Forest Meteorology* 156, 18– 30.

Muñoz-Carpena, R., 2011. Vfsmod-w: vegetative filter strips modelling system model documentation&user's manual version 6.x. Agricultural & Biological Engineering University of Florida.

Munoz-Carpena, R., Parsons, J., Gilliam W., 1999. Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips. *Journal of Hydrology* 214, 111–129.

Newham, L.T.H., Norton, J.P., Prosser I.P., Croke, B.F.W., Jakeman, A.J, 2003. Sensitivity analysis for assessing the behaviour of a landscapebased sediment source and transport model. *Environmental Modelling & Software* 18, 741–751.

Notebaert, B., Vaes, B., Verstraeten, G. and Govers, G., 2006. WaTEM / SEDEM version 2006, *Manual K.U. Leuven, Physical and Regional Geography Research Group*.

Prosser, I.P., Young, B., Rustomji, P., Moran, C., Hughes, A.O., 2001. Constructing river basin sediment budgets. The National Land and Water Resources Audit. Tech. Rep. 15/01, CSIRO Land and Water, Canberra.

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*. Thèse, Land and Water Development, Wageningen University, The Netherlands.

Schmidt, J. , Werner, M.v., Michael, A., 1999. Application of the EROSION 3D model to the CATSOP watershed, The Netherlands. *Catena* 37, 449–456.

Sharma, K., Singh, S.,1995. Satellite remote sensing for soil erosion modelling using the ANSWERS model. *Hydrological Sciences Journal* 40 (2), 259-272.

Shirmohammadi, A. , Knisel, W.G. , Bergström, L.F. , Bengtson, R. , Ward, A., Reyes, M., Manguerra, H., King,, K., 2001. Gleams Model. Agricultural non-point source water quality models: their use and application, Southern Cooperative Series Bulletin #398, USA.

Souchere, V. et al., 2003. Modelling ephemeral gully erosion in small cultivated catchments. *Catena* 50, 489-505.

Souchère, V., King, D., Daroussin, J., Papy, F. and Capillon, A., 1998. Effects of tillage on runoff directions: consequences on runoff contributing area within agricultural catchments. *Journal of Hydrology* 206, 256-267.

Souchère, V., Sorel, L., Couturier, A., Le Bissonnais, Y., Cerdan, O., 2005. Application du modèle STREAM à l'échelle d'un bassin versant au cours d'un cycle hydrologique. *INRA, Sciences du sol, Orléans (France)*, 1–32.

Suwandono, L., Parsons, J., Muñoz-Carpena, R., 1999. Design Guide for Vegetative Filter Strips Using VFSMOD. ASAE/CSAE-SCGR Annual International Meeting Toronto, Ontario, Canada.

USDA-Agricultural Research Service Washington, D.C., 2008. Science Documentation Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2).

Van de Wiel, MJ., Coulthard, TJ., Macklin, MG., Lewin, J., 2007. Embedding reach-scale fluvial dynamics within the CAESAR cellular automaton landscape evolution model. *Geomorphology* 90(3–4), 283–301.

Vineya, N.R., Sivapalana, M., Deeley, D., 2000. A conceptual model of nutrient mobilisation and transport applicable at large catchment scales. *Journal of Hydrology* 240, 23-44.

Yoder, D.C., Foster, G.R., Weesies, G.A., Renard, K.G., McCool, D.K., Lown, J.B., 2001. Evaluation of the RUSLE Soil Erosion Model. *Agricultural non-point source water quality models: their use and application*, Southern Cooperative Series Bulletin #398, USA.

Annexes

1 Evènements sélectionnés comme efficaces par la règle adaptée (surligné jaune = crue observée au point 4)

Date de début de la pluie	Durée	Durée efficace	I_{\max} [mm.h ⁻¹]	Somme des précipitations [mm]	Somme des pluies antécédentes de 48h [mm]
15-05-2012 02:35	228	10	5.11	4.10	0.00
20-07-2012 12:53	133	3	41.09	4.09	2.52
27-07-2012 22:11	168	34	23.62	14.33	0.31
30-07-2012 16:23	5	3	19.28	1.92	0.91
3-08-2012 19:41	43	5	13.45	1.87	0.05
5-08-2012 16:05	61	6	8.49	2.83	1.87
6-08-2012 12:23	41	6	22.88	3.66	2.83
24-08-2012 18:11	106	10	5.35	3.30	1.51
25-08-2012 21:35	161	15	13.04	7.24	4.93
31-08-2012 01:11	124	18	12.91	7.39	1.42
11-09-2012 10:11	60	23	19.61	8.36	0.63
12-09-2012 23:05	48	12	18.04	6.71	9.10
24-09-2012 01:05	69	7	10.07	2.39	0.06
24-09-2012 11:17	49	7	18.32	3.75	2.45
24-09-2012 20:35	71	7	9.83	2.73	6.20
25-09-2012 11:17	23	4	9.36	1.48	8.93
25-09-2012 23:59	30	6	10.44	2.56	10.35
27-09-2012 04:17	141	14	7.01	4.21	4.55
2-10-2012 06:41	71	4	5.06	2.39	0.06
3-10-2012 10:11	242	51	22.06	22.52	2.79
5-10-2012 03:11	79	12	5.98	3.41	22.69
5-10-2012 14:59	91	27	35.96	21.44	22.86
6-10-2012 09:47	85	22	25.16	9.33	25.19
6-10-2012 22:11	29	5	4.10	1.88	34.17
11-10-2012 20:05	15	4	7.57	1.82	0.00
12-10-2012 01:17	61	17	18.32	6.82	1.82
13-10-2012 11:23	73	25	11.25	6.97	9.61
15-10-2012 02:29	55	5	6.26	1.43	7.03
16-10-2012 06:35	52	8	6.16	3.27	2.05
25-10-2012 19:53	258	77	10.71	23.59	0.01
29-10-2012 15:05	177	8	5.47	4.67	0.81
1-11-2012 08:53	53	6	4.57	1.80	0.63
2-11-2012 14:17	58	18	7.90	4.91	2.97
3-11-2012 08:05	64	9	13.56	4.04	8.33
4-11-2012 00:35	3	2	24.99	1.76	9.77
4-11-2012 13:29	14	9	4.74	2.33	11.16

5-11-2012 12:59	35	11	6.05	3.01	5.17
6-11-2012 21:59	62	1	2.21	1.82	3.01
23-11-2012 10:53	238	22	4.13	9.37	0.10
1-12-2012 19:41	52	10	11.62	4.82	0.00
2-12-2012 04:23	62	27	69.81	26.62	4.82
4-12-2012 14:11	63	9	9.08	2.96	0.00
5-12-2012 15:59	145	15	33.60	7.92	2.96
7-12-2012 02:17	54	10	18.29	4.28	8.13
14-12-2012 14:23	75	20	6.35	6.81	0.32
15-12-2012 18:35	50	6	7.40	2.14	7.11
16-12-2012 02:47	160	6	4.30	2.36	9.00
16-12-2012 23:05	169	7	3.91	2.45	4.50
20-12-2012 08:41	229	41	5.28	14.04	0.78
22-12-2012 10:53	406	111	19.61	33.94	11.59
25-12-2012 03:11	80	21	5.45	6.25	10.66
25-12-2012 15:47	104	9	4.90	2.96	12.96
26-12-2012 05:17	58	17	8.98	4.55	9.21
26-12-2012 21:23	39	17	7.79	4.44	14.90
27-12-2012 07:35	191	31	12.59	10.35	15.86
28-12-2012 12:23	62	2	3.90	1.71	15.92
29-12-2012 21:59	29	8	6.94	3.24	3.70
9-01-2013 11:53	55	14	4.03	3.51	0.00
12-01-2013 15:53	101	15	8.17	5.99	0.54
13-01-2013 06:05	73	6	5.54	2.49	6.53
14-01-2013 22:23	31	19	17.89	9.07	3.66
15-01-2013 21:47	36	2	2.17	2.22	9.26
20-01-2013 04:53	145	62	19.13	28.32	0.01
27-01-2013 07:35	63	16	5.95	4.33	1.10
28-01-2013 21:05	257	54	10.37	16.13	4.88
30-01-2013 02:29	104	10	19.47	6.26	16.68
31-01-2013 11:41	25	9	7.21	2.38	10.82
1-02-2013 06:35	117	44	4.49	10.25	8.55
2-02-2013 00:05	87	9	4.70	2.02	12.63
2-02-2013 14:11	30	2	35.79	2.68	12.27
5-02-2013 04:29	28	13	86.79	13.46	2.29
7-02-2013 09:41	259	45	37.16	24.50	0.00
11-02-2013 00:23	81	40	8.78	10.76	0.00
9-04-2013 11:05	81	6	13.31	7.21	0.00
10-04-2013 21:53	32	0	0.82	1.82	7.41
11-04-2013 17:41	26	2	3.74	1.98	3.15
12-04-2013 10:29	76	3	4.73	3.11	3.98
15-04-2013 10:23	28	2	2.31	2.22	1.14
19-04-2013 12:47	72	2	5.01	2.69	0.21
7-05-2013 15:41	53	17	26.90	19.17	0.47
8-05-2013 12:17	91	7	23.00	12.59	19.64

11-05-2013 09:05	205	19	11.67	19.10	0.43
12-05-2013 22:05	22	0	0.77	1.66	19.86
15-05-2013 06:35	39	1	3.54	3.48	1.68
16-05-2013 06:11	106	0	1.39	9.21	4.53
17-05-2013 07:11	101	10	3.64	10.73	12.23
21-05-2013 06:53	128	0	1.98	10.99	4.66
22-05-2013 19:41	84	2	3.43	4.64	11.00
23-05-2013 07:23	97	2	3.43	4.27	15.56
24-05-2013 13:35	25	0	1.91	1.69	8.92
26-05-2013 00:59	67	0	0.77	4.31	1.70
28-05-2013 15:23	15	2	21.97	4.84	0.00
28-05-2013 20:05	65	9	4.74	6.75	4.84
29-05-2013 13:41	90	7	3.56	14.38	11.59
13-06-2013 13:47	47	8	3.37	8.08	2.00
17-06-2013 13:17	13	1	2.23	2.90	0.17
19-06-2013 05:53	25	5	4.21	3.23	4.84
20-06-2013 12:05	23	3	3.58	2.51	4.83
20-06-2013 23:41	140	2	3.67	7.79	7.36
22-06-2013 12:53	112	3	3.35	3.91	9.79
27-06-2013 00:29	15	6	5.46	4.37	0.99
28-06-2013 02:11	15	2	3.17	3.37	4.54
28-06-2013 19:47	30	0	1.10	1.71	7.92
3-07-2013 00:35	114	10	5.86	7.84	0.00
24-07-2013 03:59	22	1	2.34	2.54	0.19
26-07-2013 07:41	47	2	3.45	2.14	0.16
27-07-2013 08:59	23	12	73.18	28.98	2.14
27-07-2013 22:59	7	6	65.39	15.73	31.13
29-07-2013 21:41	5	5	23.10	6.13	15.73
30-07-2013 12:11	110	1	3.10	3.58	6.13
7-08-2013 08:41	79	4	2.66	8.58	0.02
18-08-2013 07:59	70	5	3.95	5.63	0.18
18-08-2013 18:05	20	3	29.56	9.80	5.81
19-08-2013 13:11	2	2	34.35	6.61	15.60
24-08-2013 09:23	118	17	17.06	22.18	0.18
6-09-2013 13:17	9	3	15.41	5.02	0.00
9-09-2013 00:59	13	6	4.68	4.08	1.06
9-09-2013 14:35	83	0	1.64	4.16	5.15
10-09-2013 12:59	153	5	6.88	6.83	8.76
11-09-2013 22:59	8	0	0.41	2.57	7.52
14-09-2013 03:29	154	6	5.24	8.82	2.84
15-09-2013 18:29	90	5	4.02	7.79	8.82
16-09-2013 18:35	22	4	4.22	2.45	8.61
17-09-2013 11:41	114	3	6.05	7.15	10.24
18-09-2013 02:47	141	0	0.98	2.87	9.78
18-09-2013 22:17	5	1	3.86	1.47	10.02

3-10-2013 21:11	24	4	5.35	4.11	0.02
4-10-2013 05:05	11	5	9.03	4.70	4.12
9-10-2013 22:41	29	7	9.41	8.12	1.93
10-10-2013 08:05	74	0	1.99	1.32	10.05
11-10-2013 12:17	108	0	1.20	2.40	9.81
13-10-2013 15:05	102	0	1.05	4.62	2.90
14-10-2013 04:29	189	7	9.81	8.20	5.29
16-10-2013 16:29	60	0	1.65	1.80	8.17
22-10-2013 18:41	91	8	9.88	9.73	0.78
27-10-2013 06:53	51	3	5.15	3.29	1.86
27-10-2013 21:17	176	4	3.46	9.00	4.09
29-10-2013 13:05	48	4	3.05	3.83	9.80
1-11-2013 22:29	104	6	2.58	10.92	0.96
2-11-2013 21:35	17	1	2.79	1.58	12.01
3-11-2013 11:17	57	6	4.38	4.54	14.54
3-11-2013 23:47	77	11	4.75	9.10	17.43
4-11-2013 10:59	32	6	8.61	5.63	16.45
5-11-2013 10:59	101	1	2.93	6.37	19.27
6-11-2013 10:29	95	2	2.80	4.98	11.99
19-12-2013 00:59	117	15	6.58	12.10	0.00
21-12-2013 19:17	123	1	2.21	3.64	0.01
22-12-2013 11:41	102	6	15.53	9.02	3.64
23-12-2013 20:41	303	23	20.73	32.17	12.43
27-12-2013 12:59	186	28	4.56	20.18	0.20
29-12-2013 05:41	36	0	1.64	1.77	20.29
2-01-2014 03:17	83	2	3.95	2.45	2.41
3-01-2014 17:17	4	3	31.16	5.44	3.75
15-01-2014 06:23	142	0	1.37	5.10	2.12
20-01-2014 03:05	237	2	2.35	13.67	0.06
23-01-2014 16:41	33	1	2.47	2.95	0.99
25-01-2014 19:53	42	4	5.69	2.37	0.27
26-01-2014 15:41	67	3	2.99	5.80	2.37
27-01-2014 05:59	126	13	3.88	6.41	8.17
31-01-2014 23:41	118	0	1.59	9.03	0.29
6-02-2014 14:41	36	9	6.77	6.80	3.33
6-02-2014 23:23	36	0	1.68	1.38	10.13
7-02-2014 06:59	74	11	3.03	6.15	10.27
8-02-2014 03:29	107	0	1.51	4.35	14.38
11-02-2014 15:53	70	2	2.50	5.29	0.12
12-02-2014 18:41	53	2	2.73	2.94	5.30
13-02-2014 09:17	74	1	2.50	2.74	8.24
14-02-2014 12:11	61	1	2.06	3.63	5.71
19-02-2014 10:53	60	3	6.68	1.94	0.00
20-02-2014 16:11	61	3	2.83	3.13	2.10
22-02-2014 05:53	21	5	2.80	2.02	5.70

24-02-2014 05:53	21	5	2.80	2.02	2.02
21-03-2014 07:42	50	4	3.07	4.91	0.00
22-03-2014 20:00	23	1	5.06	3.24	8.12
24-03-2014 14:00	28	1	7.33	2.82	5.58
7-04-2014 19:18	13	7	11.39	4.79	0.01
8-04-2014 07:24	25	3	8.54	1.80	5.90
22-04-2014 13:25	58	6	5.52	3.77	2.10
24-04-2014 07:49	42	1	2.89	2.42	3.77
1-05-2014 12:49	56	8	11.17	5.40	0.00
6-05-2014 15:37	95	9	8.14	7.60	0.20
7-05-2014 08:01	51	3	6.45	2.06	7.80
8-05-2014 08:37	305	10	6.10	8.31	9.86
10-05-2014 06:19	108	3	2.86	3.24	8.31
12-05-2014 07:43	101	8	13.51	7.43	3.80
14-05-2014 12:37	38	3	8.21	2.70	5.58
20-05-2014 21:07	23	5	109.73	15.95	0.00
21-05-2014 18:49	45	7	23.87	7.27	16.06
3-06-2014 15:43	17	8	17.72	5.17	0.01
4-06-2014 06:25	146	6	4.63	7.86	5.18
9-06-2014 10:07	7	5	5.37	2.10	1.00
10-06-2014 01:19	16	5	34.71	11.62	3.87
10-06-2014 13:13	17	3	20.80	4.09	14.61

2 Exemple des cartes brutes de sorties avant calibration pour la pluie cumulée de l'année 2013

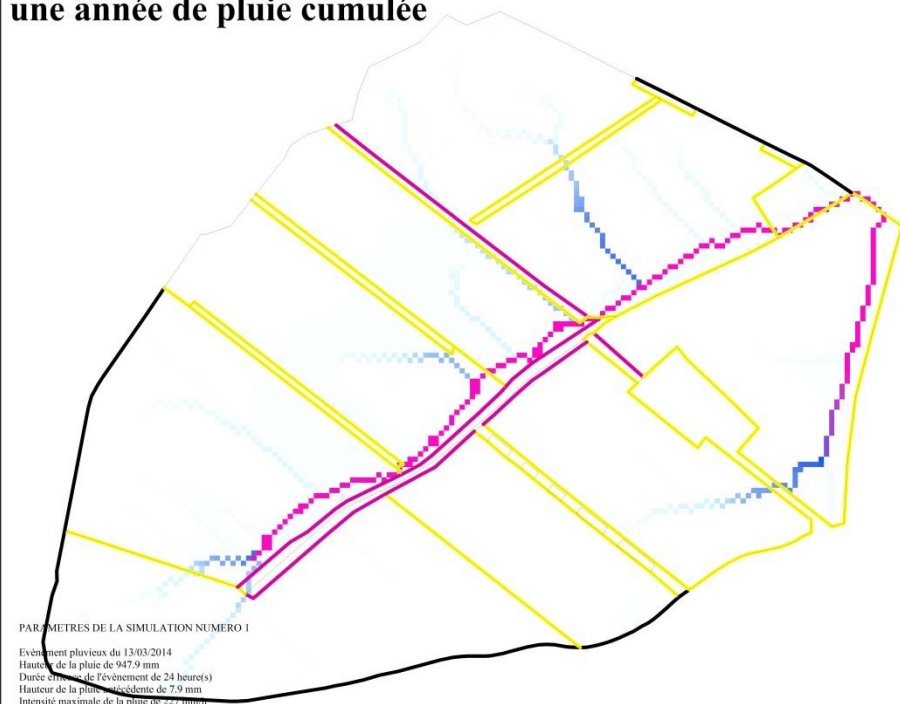
2.1 Ruissellement



Paysage et conservation des sols



Effet du ruissellement sur le bassin entre 2012 et 2013 sur une année de pluie cumulée



PARAMETRES DE LA SIMULATION NUMERO 1

Evénement pluvieux du 13/03/2014
Hauteur de la pluie de 947.9 mm
Durée effective de l'événement de 24 heures(s)
Hauteur de la pluie résiduelle de 7.9 mm
Intensité maximale de la pluie de 22.7 mm/h

Ecoulements modifiés par le travail du sol et les chemins d'eau sans dérive (0)
Règles d'érosion par ruissellement concentré valides sur les néoluvissols pauvres en argile de la ceinture loessique du Nord-Ouest de l'Europe

Légende

limite de parcelle

Limite de parcelle

route

dérayure

limite de parcelle

fourrière

Volume d'eau accumulé en m3 (1)

High : 1.2516e+006

Low : 0

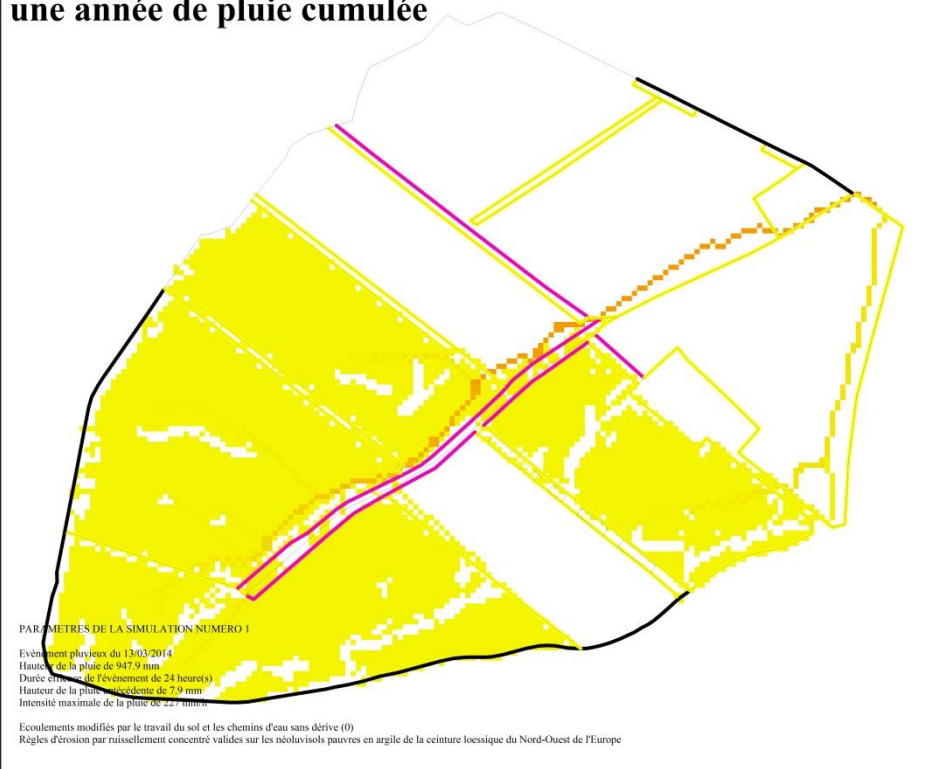
2.2 Érosion diffuse et linéaire



Paysage et conservation des sols



Effet de l'érosion diffuse sur le bassin entre 2012 et 2013 sur une année de pluie cumulée



Légende

limite de parcelle

Limite de parcelle

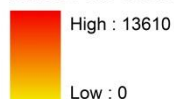
route

dérayure

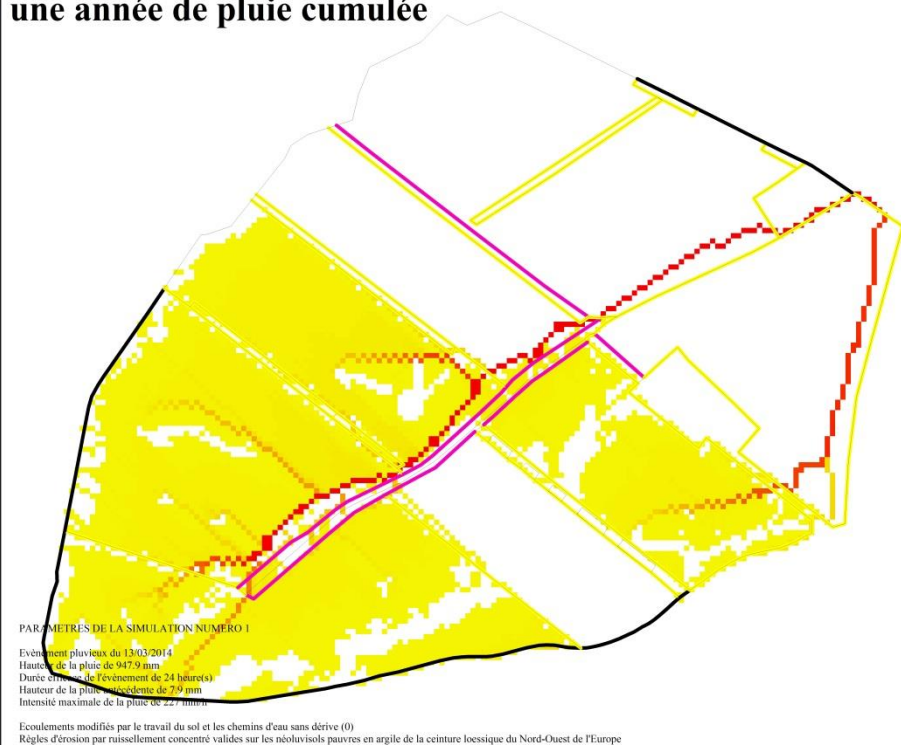
limite de parcelle

fourrière

Masse de terre accumulée par érosion diffuse (T) (1)



Effet de l'érosion linéaire sur le bassin entre 2012 et 2013 sur une année de pluie cumulée



Légende

limite de parcelle

Limite de parcelle

route

dérayure

limite de parcelle

fourrière

Masse de terre accumulée par érosion linéaire (T) (1)

High : 13610

Low : 0

2.3 Dépôt



Paysage et conservation des sols



Masse de terre déposée par érosion diffuse sur le bassin entre 2012 et 2013 sur une année de pluie cumulée



PARAMETRES DE LA SIMULATION NUMERO 1

Evénement pluvieux du 13/03/2014
Hauteur de la pluie de 947.9 mm
Durée d'écoulement de l'événement de 24 heures(s)
Hauteur de la pluie précédente de 7.9 mm
Intensité maximale de la pluie de 22.7 mm/h

Écoulements modifiés par le travail du sol et les chemins d'eau sans dérive (0)

Règles d'érosion par ruissellement concentré validées sur les néoluvissols pauvres en argile de la ceinture loessique du Nord-Ouest de l'Europe

Légende

limite de parcelle

Limite de parcelle

route

dérayure

limite de parcelle

fourrière

Masse de terre déposée par l'érosion diffuse (T)

High : 3.25

Low : 0

Masse de terre déposée par érosion linéaire sur le bassin entre 2012 et 2013 sur une année de pluie cumulée



Légende

limite de parcelle

Limite de parcelle

route

dérayure

limite de parcelle

fourrière

Masse de terre déposée par l'érosion linéaire (T)

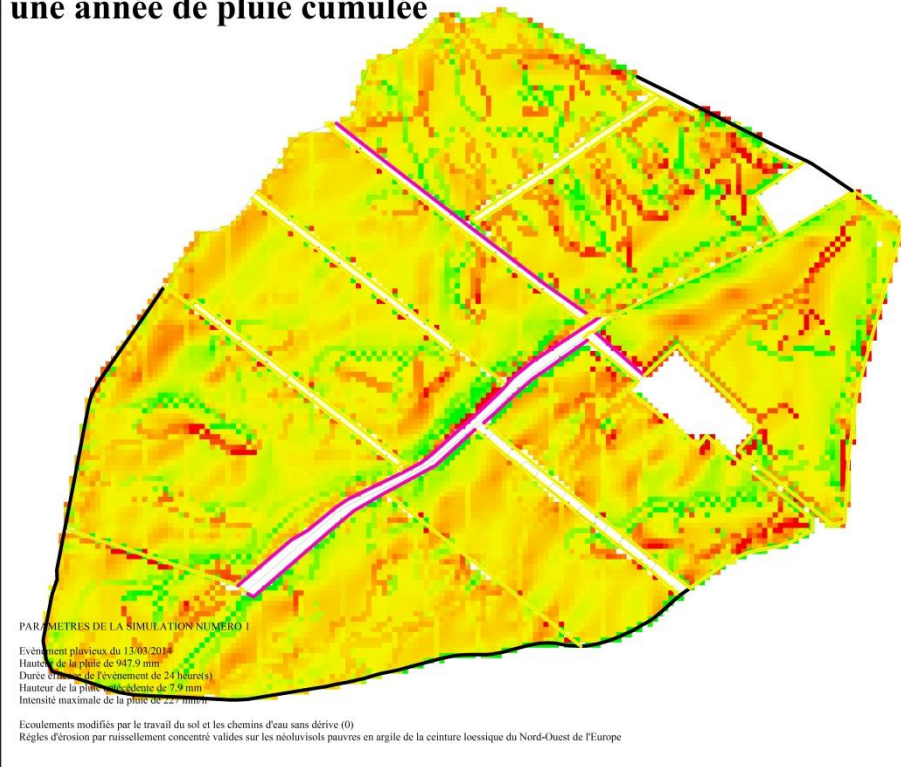
High : 3.25

Low : 0

2.4 Érosion aratoire



Effet de l'érosion aratoire sur le bassin entre 2012 et 2013 sur une année de pluie cumulée



Légende

limite de parcelle

Limite de parcelle

route

dérayure

limite de parcelle

fourrière

Aratoire (kg)

High : 450

Low : -550

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