

ANNEXE 4 : Paramétrisation de la modélisation WATERSED

Cette étape préliminaire a pour objectif de reproduire numériquement la topographie, les sols et l'occupation des sols du territoire d'étude. Le croisement du sol et de l'occupation des sols permet d'en déduire des unités pédo-culturelles avec des propriétés physiques (capacité d'infiltration, érodibilité, etc.) nécessaire à la simulation du ruissellement et l'érosion des sols suivant différents événements climatiques.

Topographie

La topographie a été obtenue à partir du modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN (BD ALTI) avec une maille de 25 m où pour chaque maille une altitude est exprimée en m NGF. Ce maillage a été rééchantillonné à 5 m de façon à pouvoir intégrer les éléments du paysage dont les dimensions sont inférieures à 25 m (les routes, le bâti, etc.).

Le réseau de circulation du ruissellement brut (dérivé de la topographie) a été modifié de façon à ce que les écoulements circulent selon le réseau de circulation décrit sur le terrain. Sur le territoire d'étude, un calcul de l'aire drainée pour chaque pixel permet de visualiser la bonne prise en compte de ce réseau et de constater d'importantes différences par rapport au réseau de circulation brut (Figure 10).

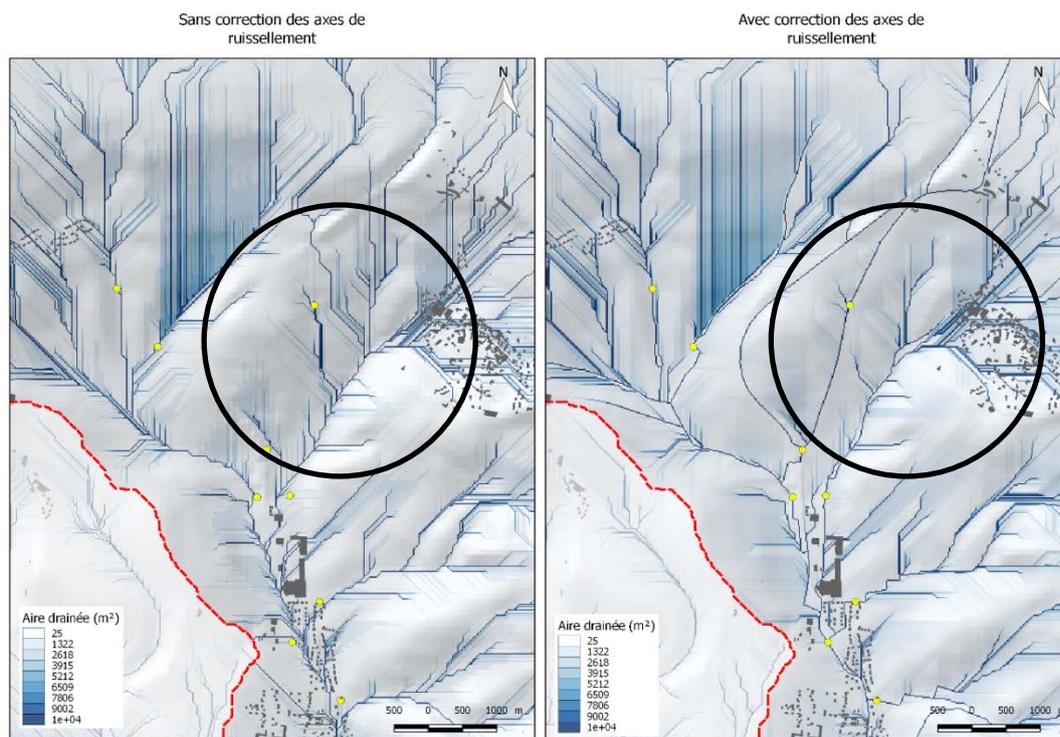


Figure 1: exemple de correction d'un réseau de circulation du ruissellement brut extrait de la topographie par intégration du réseau de circulation anthropique. Le cercle noir montre sans et avec la prise en compte de deux routes modifiant les écoulements.

Occupation des sols

La cartographie de l'occupation des sols a été réalisée sur le territoire d'étude par combinaison de différents types de bases de données fournies par le BRGM : Registre Parcellaire Graphique, THEAI et BD TOPO (Figure 11).

L'occupation des sols proposée correspond à l'année 2011, année où l'ensemble des données étaient disponibles.

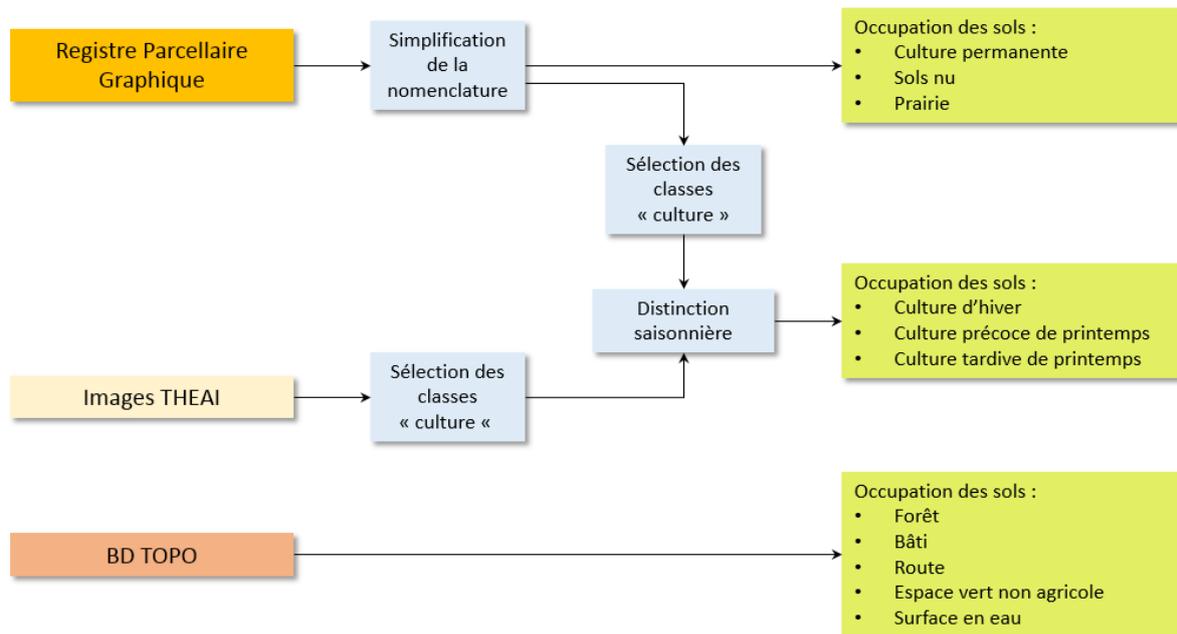


Figure 2 : procédure de construction de la cartographie de l'occupation des sols en 11 classes.

Le Registre Parcellaire Graphique (RPG) est une base de données géographiques détaillant à une échelle 1/5000^{ème} l'emprise des îlots de culture ainsi que le type de culture majoritaire pratiquée suivant une nomenclature en 28 classes. Toutefois, aucune distinction n'est faite sur la date de semis des cultures pratiquées. Par exemple, un blé tendre correspond à une classe 1 mais il est impossible de savoir s'il s'agit d'un blé tendre d'hiver ou d'un blé tendre de printemps. Cette information est déterminante car la sensibilité au ruissellement et à l'érosion des sols est différente suivant la date de semis.

Pour cette raison, les classes de culture du RPG pouvant être semées en hiver ou au printemps (blé tendre, orge, colza, etc.) ont été croisées aux classes « culture » de la cartographie de l'occupation des sols THEAI produite par le laboratoire CESBIO (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère) dans le but d'établir cette distinction saisonnière. Cette cartographie est produite à une résolution de 30 m à partir des images prises tous les 16 jours par le satellite Landsat-8. Cette fréquence d'acquisition permet ainsi de proposer une cartographie de l'occupation des sols où les cultures d'hiver et de printemps sont distinguées.

A l'issue de cette étape de croisement des deux cartographies, la saisonnalité de ces classes de culture est déterminée : culture d'hiver ou culture précoce de printemps. Les cultures tardives de printemps (maïs, tournesol, etc.) sont directement déterminées à partir du RPG où il n'existe pas d'ambiguïté sur les dates de semis.

Les classes prairie, sol nu et culture permanente sont également obtenues auprès du RPG par reclassification des classes autre que « culture ». Les autres classes d'occupation des sols (bâti, forêt, surface en eau, espace vert non agricole) sont déterminées à partir des données surfaciques de la BD TOPO de l'IGN. Les routes et chemins sont également cartographiés en tant que données surfaciques à partir des données linéaires de la BD TOPO. Une largeur de 4 m est affectée aux chemins et de 6 max routes par d'observations sur les orthophotos de la zone et des observations sur le terrain.

Au final, une cartographie de l'occupation des sols en 11 classes et à une précision cadastrale aura été établie pour le secteur d'étude, illustrée lors de la présentation du secteur d'étude.

Texture des sols

La cartographie des sols sur le périmètre d'étude a été obtenue auprès de la Chambre d'agriculture de la Somme. Les formations pédologiques y sont cartographiés au 1/250 000^{ème} au sein d'unités cartographiques de sols (UCS) ou pédopaysages combinant d'autres informations comme la lithologie, le relief ou encore l'occupation des sols. L'information texturale associée à chaque UCS a ensuite été utilisée pour établir une cartographie de la texture dominante de l'horizon de surface, illustrée lors de la présentation du secteur d'étude.

Définition des unités pédo-cultureles et propriétés physiques

La cartographie des unités pédo-cultureles correspond au croisement de la cartographie de l'occupation des sols et de la cartographie de la texture de l'horizon de surface des sols. Une procédure automatisée (Figure 12) permet de déterminer pour chaque unité pédo-culturele, l'évolution mensuelle de ses propriétés physiques : la capacité d'infiltration du sol (mm/h), le coefficient de manning et l'érodibilité du sol (-).

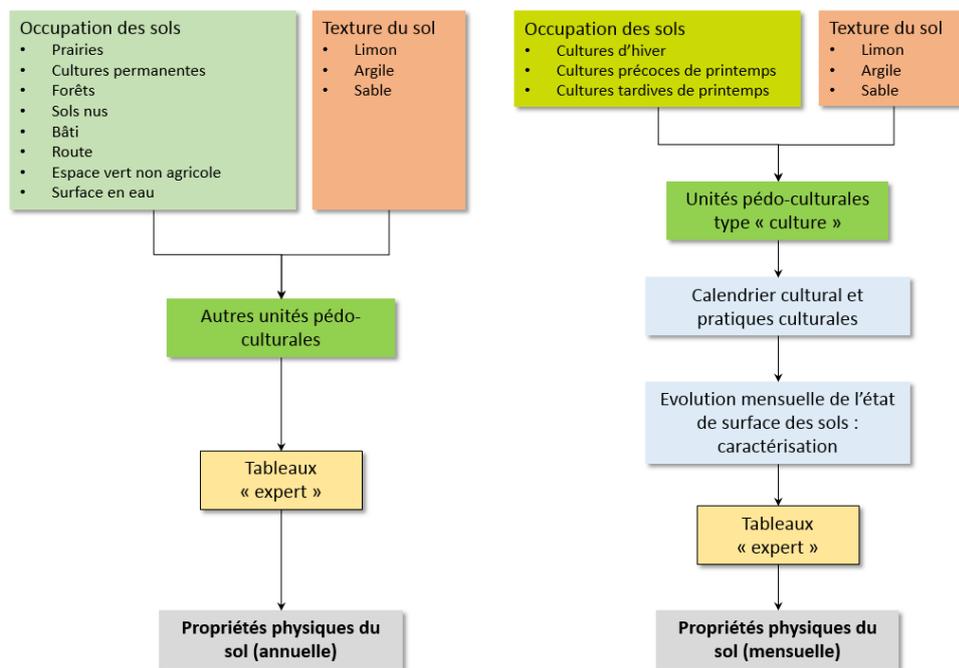


Figure 3: procédure de détermination des propriétés physiques de chaque unité pédo-culturele.

Propriétés physiques des unités pédo-cultureles

La détermination des propriétés physiques des sols est différente entre les unités pédo-culturele type « culture » et les autres types d'unités. Dans le premier cas, le travail du sol induit un changement des états de surface du sol et par conséquent une évolution mensuelle des propriétés physiques du sol. Dans le second cas, l'absence de travail du sol autorise l'hypothèse de propriétés physiques constantes au cours de l'année.

Pour chaque unité pédo-culturele de type « culture », les date de semis et de récoltes, ainsi que les pratiques culturelles ont été obtenues à partir d'observations sur le terrain et d'échanges avec les élus et quelques agriculteurs du territoire d'étude. A partir de ces informations et de l'expérience de LIOSE et du BRGM, l'état de surface des sols au travers de la texture du sol, du couvert végétal, du faciès sédimentaire et de la rugosité du sol (Figure 13) a été défini pour les deux mois de l'année où les simulations ont été réalisées : le mois de décembre et le mois d'avril. Durant ces deux périodes, deux types d'aléa climatiques, détaillées au point 1.1.1. Sont susceptibles de se produire.

Evolution mensuelle des états de surface des sols de chaque unité pédo-culturelle caractérisée par le **couvert végétal (C)**, le **faciès sédimentaire (F)** et la **rugosité du sol (R)**

C1	Faible couverture [0% -20%]	F0	Stade fragmentaire	R0	[0cm - 1cm]
C2	Couverture moyenne [20% - 60%]	F1/F11	1 ^{er} stade de fragmentation	R1	[1cm - 2cm]
C3	Forte couverture [60% - 100%]	F1/F12	2 ^{ème} stade de fragmentation	R2	[2cm - 5 cm]
		F2	Stade sédimentaire	R3	[5cm - 10cm]
				R4	[>10cm]

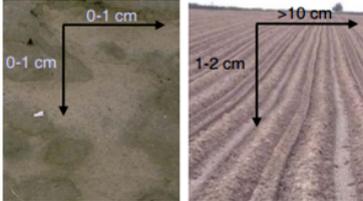
 <p><i>Couvert végétal</i></p>	 <p><i>Faciès sédimentaire</i></p>	 <p><i>Rugosité</i></p>
---	--	--

Figure 4 : caractérisation de l'état de surface du sol suivant le couvert végétal, le faciès sédimentaire et la rugosité du sol.

Des tables de conversion sont ensuite utilisées pour convertir l'état de surface du sol en propriétés physiques du sol. Cette table de conversion a été adaptée au contexte de l'étude, en tenant compte des différentes textures dominantes de l'horizon de surface rencontrées sur le territoire d'étude : limono-argileux, limon pur et limon moyen. Les propriétés physiques issues de ces tables de conversion sont (**Figure 14**) :

- ✓ une table pour transformer l'état de surface des sols (texture - couvert végétal – faciès – rugosité) en capacité d'infiltration et en aptitude au ruissellement,
- ✓ une table pour transformer l'état de surface des sols (couvert végétal – rugosité) en coefficient de rugosité de Manning,
- ✓ une table pour transformer la texture du sol et le couvert végétal en érodibilité du sol.

L'état de surface du sol ne peut être caractérisé pour les classes d'occupation des sols autre que « culture ». Les propriétés physiques des unités pédo-culturelles associées sont directement déterminées à partir de valeurs issues de la littérature scientifique et des études antérieures menées par le BRGM et le bureau d'études LIOSE. Les valeurs utilisées sont détaillées sur la **Figure 14**.

Code Texture	Texture	Occupation des sols	Code Occ. Sol	Code Unité PC*	Etat de surface du sol		Capacité d'infiltration (mm/h)		Concentration potentielle en MES dans les eaux de ruissellement (g/l) pour les classes d'intensité de pluie (mm/h)						Erodibilité (-)		Coefficient de Manning	
					Décembre	Avril	Décembre			Avril			Décembre	Avril	Décembre	Avril		
							[0 - 10]	[10 - 40]	[> 40]	[0 - 10]	[10 - 40]	[> 40]						
1	LM	Culture hiver	1	11	C1-F12-R1	C3-F2-R0	5	5	0.5	3.5	7.5	0.5	3.5	7.5	0.68	0.05	0.043	0.151
1	LM	Culture printemps précoce	2	21	C1-F1-R3	C2-F2-R1	20	2	7.5	12.5	30	0.5	3.5	7.5	0.68	0.22	0.056	0.099
1	LM	Culture printemps tardive	3	31	C1-F1-R3	C1-F0-R2	20	40	7.5	12.5	30	0.5	3.5	7.5	0.68	0.68	0.056	0.047
1	LM	Prairie	4	41			40	40	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.00	0.00	0.300	0.300
1	LM	Culture permanente	5	51			40	40	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.00	0.00	0.150	0.150
1	LM	Bati	6	61			0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.012	0.012
1	LM	Sol nu	7	71			2	2	12.5	20	30	12.5	20	30	1.00	1.00	0.015	0.015
1	LM	Forêt	8	81			50	50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.00	0.00	0.150	0.150
1	LM	Surface en eau	9	91			0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.040	0.040
1	LM	Route	10	101			0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.015	0.015
1	LM	Chemin	11	111			0.5	0.5	0.5	3.5	7.5	0.5	3.5	7.5	0.20	0.20	0.020	0.020
1	LM	Espace vert	12	121			20	20	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.00	0.00	0.150	0.150
2	LA	Culture hiver	1	12	C1-F1-R1	C3-F12-R1	10	10	0.5	3.5	7.5	0.5	0.5	0.5	0.56	0.01	0.043	0.155
2	LA	Culture printemps précoce	2	22	C1-F0-R3	C2-F12-R2	40	10	0.5	3.5	7.5	0.5	0.5	3.5	0.56	0.10	0.056	0.103
2	LA	Culture printemps tardive	3	32	C1-F0-R3	C1-F0-R2	40	40	0.5	3.5	7.5	0.5	0.5	3.5	0.56	0.56	0.056	0.047
2	LA	Prairie	4	42			50	50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.00	0.00	0.300	0.300
2	LA	Culture permanente	5	52			50	50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.00	0.00	0.150	0.150
2	LA	Bati	6	62			0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.012	0.012
2	LA	Sol nu	7	72			2	2	7.5	12.5	20	7.5	12.5	20	1.00	1.00	0.015	0.015
2	LA	Forêt	8	82			60	60	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.00	0.00	0.150	0.150
2	LA	Surface en eau	9	92			0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.040	0.040
2	LA	Route	10	102			0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.015	0.015
2	LA	Chemin	11	112			0.5	0.5	0.5	0.5	3.5	0.5	0.5	3.5	0.20	0.20	0.020	0.020
2	LA	Espace vert	12	122			30	30	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.00	0.00	0.150	0.150
3	LL	Culture hiver	1	13	C1-F0-R2	C3-F1-R2	40	40	0.5	0.5	3.5	0.5	3.5	7.5	0.56	0.01	0.047	0.159
3	LL	Culture printemps précoce	2	23	C1-F0-R3	C2-F1-R2	40	20	0.5	3.5	7.5	0.5	3.5	7.5	0.56	0.10	0.056	0.103
3	LL	Culture printemps tardive	3	33	C1-F0-R3	C1-F0-R2	40	40	0.5	3.5	7.5	0.5	0.5	3.5	0.56	0.56	0.056	0.047
3	LL	Prairie	4	43			50	50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.00	0.00	0.300	0.300
3	LL	Culture permanente	5	53			50	50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.00	0.00	0.150	0.150
3	LL	Bati	6	63			0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.012	0.012
3	LL	Sol nu	7	73			2	2	7.5	12.5	20	7.5	12.5	20	1.00	1.00	0.015	0.015
3	LL	Forêt	8	83			60	60	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.00	0.00	0.150	0.150
3	LL	Surface en eau	9	93			0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.040	0.040
3	LL	Route	10	103			0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.015	0.015
3	LL	Chemin	11	113			0.5	0.5	0.5	0.5	3.5	0.5	0.5	3.5	0.20	0.20	0.020	0.020
3	LL	Espace vert	12	123			30	30	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.00	0.00	0.150	0.150

Figure 5 : table de conversion pour dériver les propriétés physiques des unités pédo-culturelles.

Etat de saturation du sol

Dans le modèle WaterSeD, l'état de saturation initial du sol et les pertes initiales associées sont définies pour chaque unité pédo-culturelle suivant une table experte croisant l'antécédent pluvieux à 48h et la capacité d'infiltration de l'unité considéré (Figure 15).

Capacité d'infiltration (mm/h)	Antécédent pluvieux à 48h (mm)			
	0	1-15	16-40	>40
80	22	17	14	10
60	21	16	13	9
50	20	15	12	8
40	19	14	11	7
30	17	13	10	6
20	15	12	8	5
15	14	10	7	4
10	12	8	5	3
5	8	5	3	1
2	5	2	1	0
1	0	0	0	0

Imbibition (mm)

22
15
10
5
0

Figure 6 : table de détermination des pertes initiales (imbibition) au début d'un évènement pluvieux par croisement de la capacité d'infiltration mensuelle et de la hauteur de pluie antécédente à 48h.

Par exemple, dans le cas d'un sol saturé (antécédent pluvieux à 48h supérieur à 40 mm) pour une unité pédo-culturelle avec une capacité d'infiltration de 20 mm/h, les pertes initiales de pluie seront faibles avec 4 mm. A l'inverse dans le cas d'un sol non saturé (antécédent pluvieux à 48h de 0 mm), les pertes initiales seront de 40 mm toujours pour cette même unité. Le degré exact de saturation du sol (choix de l'antécédent pluvieux) sera étudié et discuté lors du CoTech.

L'intensité de la pluie

Dans le modèle WaterSed, une table de conversion est utilisée pour transformer l'état de surface des sols (texture - couvert végétal - faciès - rugosité) et l'intensité de pluie maximum à 6 min en concentration en matières en suspension dans les eaux de ruissellement (Figure 16). Cette concentration en MES correspond à l'érosion du sol provoquée par l'impact des gouttes de pluie. Indépendamment de l'état de surface du sol, plus cette intensité est élevée, plus l'érosion est élevée. Pour un évènement de pluie orageux, cette intensité de pluie maximum à 6 min se situe généralement au-delà de 40 mm/h. Pour une pluie hivernale, cette intensité maximum peut soit se situer par exemple dans l'intervalle]0 mm/h -10 mm/h].

Paramétrisation des axes d'écoulements

Les propriétés physiques des axes de ruissellement sont également renseignées, suivant le type d'axe de ruissellement. Le Tableau 3 résume les valeurs affectées à chaque type. L'érosion diffuse affecte seulement les chemins et les talwegs. L'érosion concentrée affecte les cavées, les ravines, les chemins agricoles et les talwegs. Pour les autres types d'axes, aucune forme d'érosion n'a été considérée. Hormis pour les talwegs, les propriétés physiques des axes d'écoulement se surimpose à celles des unités pédo-culturelles.

Tableau 1 : propriétés physiques des différents types d'axe d'écoulement.

Type d'axe	Largeur (m)	Capacité d'infiltration (mm/h)	Coefficient de Manning	Erodibilité	Concentration potentielle en MES dans les eaux de ruissellement (g/l) pour les classes d'intensité de pluie (mm/h)		
					[0 – 10]	[10 – 40]	[>40]
buse	0.8	0	0.012	0	0	0	0
cavée	3	5	0.050	0.2	0	0	0
chemin	4	2	0.020	0.2	3.5	7.5	12.5
cours d'eau intermittent	4	5	0.050	0	0	0	0
cours d'eau permanent	8	0	0.030	0	0	0	0
fosse	1.5	5	0.070	0	0	0	0
fosse béton	1.5	0	0.015	0	0	0	0
noue	1.5	5	0.070	0	0	0	0
ravine	3	5	0.050	0.2	0	0	0
talweg	10	5	0.060	*	*	*	*
voierie	6	0	0.015	0	0	0	0

* : valeur obtenue à partir de l'unité pédo-culturale sous-jacente

Paramétrisation des propositions d'aménagements

Les propriétés physiques des propositions d'aménagements sont également renseignées (Tableau 4). La réduction des vitesses provoquées par ces mesures est soit calculée par la formulation de Manning soit par des formulations empiriques issues de la littérature scientifique. Les abattements sur la charge sédimentaire sont également déterminés à partir d'essais en plein champ (Ouvry, 2012) ou de travaux scientifiques.

Tableau 2: propriétés physiques des différents types d'aménagement.

Type	Largeur (m)	Capacité d'infiltration (mm/h)	Coefficient de Manning	Facteur de réduction de la vitesse
Haie	1	400		3
Bande enherbée	5	50	0.3	
Seuil	3			5
Fascine	0.5	200		5
Fossé	1.5	50	0.15	
Noue à redents	1.5	100	0.3	
Noue	1.5	50	0.15	
Fossé à redents	1.5	100	0.3	
Haie sur merlon	1	400		3

Météo

L'aléa climatique est caractérisé suivant trois événements pluvieux de différentes périodes de retour (10 ans, 20 ans, 100 ans), intervenant en été et en hiver. Deux types de pluies de projet ont donc été considérés :

- Pluie de courte durée à cumul pluviométrique moyen (orage printanier ou estival) intervenant sur sol non saturé
- Pluie de longue durée à fort cumul pluviométrique (pluie hivernale) intervenant sur sol saturé

Au total, 6 pluies de projets sont considérées. Les caractéristiques de ces pluies sont détaillées dans le [Tableau 5](#).

Tableau 3 : caractéristiques des pluies de projet

Mois	Hauteur de pluie (mm)	Antécédent pluvieux (mm)	Intensité maximum à 15 min (mm/h)	Durée (min)	Période de retour (an)
Décembre	36	40	24.8	360	10
Décembre	39.7	40	28.6	360	20
Décembre	47.5	40	37.7	360	100
Avril	24.6	0	129.7	60	10
Avril	28.4	0	157.8	60	20
Avril	37.3	0	230.6	60	100

Présentation du modèle WATERSED

WaterSed est un modèle non-dynamique distribué simulant le ruissellement et l'érosion des sols depuis l'échelle de la parcelle à celle du bassin versant pour un événement de pluie donné. Le BRGM assure le développement du modèle WATERSED, reprenant l'intégralité du modèle STREAM (INRA) en conservant l'approche « expert » du modèle initial.

L'hypothèse de base du modèle STREAM vient du constat selon lequel, sur la plupart des sols à texture limoneuse, le ruissellement et l'érosion résultent de la diminution de l'infiltrabilité en lien avec la dégradation structurale de la surface des sols, sous l'action des précipitations (croûte de battance), l'influence de la rugosité (pratiques culturales) et le couvert végétal. A partir des très nombreuses observations (plus de 5000) menées sur le Pays de Caux en Seine-Maritime, des règles de décisions furent élaborées pour déduire, à partir des états de surfaces des sols, les propriétés physiques des sols (aptitude au ruissellement, capacité d'infiltration, concentration potentielle en matières en suspension dans les eaux de ruissellement, ou encore érodibilité des sols). Ces règles de décisions constituent l'approche « expert » du modèle STREAM (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management) développé par l'INRA.

Toutefois, le modèle STREAM présente de nombreuses limitations avec comme principale limite le domaine de validité spatiale du modèle, limité à 100-1000 ha. En effet, les calculs hydrologiques sont réalisés pour la durée effective de la pluie et non pour la durée du ruissellement. En conséquence, l'application du modèle STREAM sur des bassins versant d'une centaine de kilomètres carrés est un vrai problème car la durée du ruissellement est largement supérieure à la durée de la pluie. Son application sur des bassins de cette superficie implique systématiquement de très fortes surestimations des volumes d'eau ruisselée et des flux sédimentaires sans possibilité de corrections. D'un point de vue opérationnel, le modèle est également en incapacité de simuler explicitement des aménagements d'hydrauliques douces hormis des bandes enherbées.

Pour cette raison, le BRGM a migré vers le modèle WaterSed pour pallier aux nombreuses limites du modèle STREAM. Les nouvelles améliorations sont les suivantes :

- ✓ Extension du domaine de validité de 100 ha à 1000 km² par l'intégration d'un nouveau moteur hydrologique fonctionnant non plus pour la durée de la pluie mais pour la durée du ruissellement,
- ✓ Amélioration du moteur sédimentaire avec une modélisation explicite de l'érosion diffuse et de l'érosion concentrée ; nouvelle formulation du module de dépôts de sédiments,
- ✓ Routage des volumes d'eau ruisselé par une méthode de convolution – translation permettant de déterminer les hydrogrammes de crues et les débits de pointe en tout point du bassin versant,
- ✓ Intégration d'un module « réseau de circulation » permettant de forcer les écoulements selon des axes de ruissellement privilégié décrit sur le terrain (fossé, route, etc.),
- ✓ Création d'un module « aménagement » avec la possibilité de simuler des aménagements d'hydrauliques douces (fascines, haies, bandes enherbées) avec une paramétrisation mécaniste fondée sur les mesures in-situ de l'AREAS en Seine-Maritime ; possibilités de simuler des marres tampons ou des bassins de rétention ; possibilité de simuler des scénarios d'occupation des sols et de pratiques culturales.

WATERSED est un modèle de prédiction opérationnel recherchant le compromis optimal entre la prise en compte des processus élémentaires de l'érosion et le nombre de variables nécessaires et leur disponibilité. Ainsi pour effectuer une modélisation pour un évènement de pluie donné, le modèle ne nécessite que 8 rasters en entrée (Figure 16).

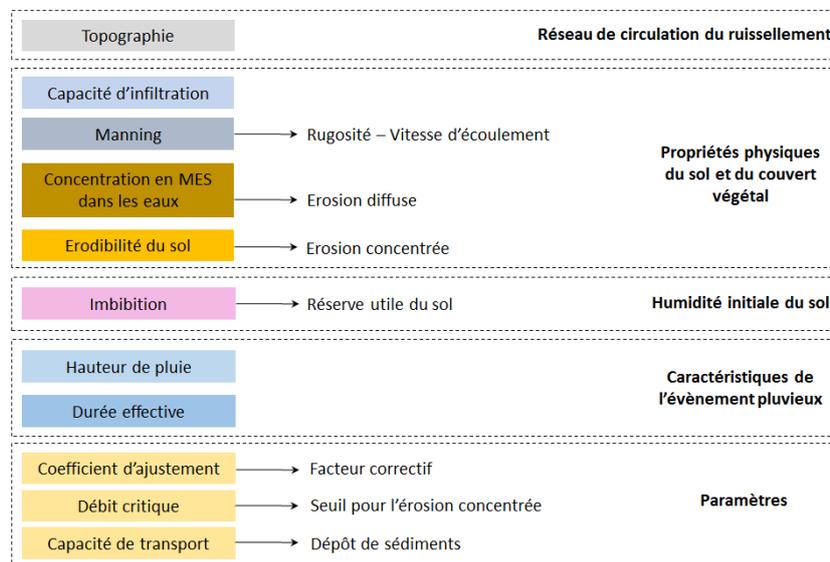


Figure 7 : données nécessaires à la modélisation du ruissellement et de l'érosion des sols pour un évènement de pluie donné à partir du modèle WaterSed.