

STREAM

Présentation générale

Le modèle **STREAM** (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management), développé par les équipes INRA de Science du Sol d'Orléans et de l'UMR SAD APT de Grignon, permet de quantifier le ruissellement et les pertes en terre, tout en localisant les zones où ces phénomènes se produisent.

STREAM, qui utilise comme échelles spatiales et temporelles le bassin versant (prise en compte des interactions amont aval) et l'événement pluvieux, est structuré en quatre modules interdépendants décrivant respectivement le réseau d'écoulement, le ruissellement, l'érosion diffuse et l'érosion linéaire.

La démarche suivie pour l'élaboration de ces modules est identique : l'identification et la paramétrisation des facteurs dominants à l'échelle locale sur la base de résultats expérimentaux, puis à l'échelle du bassin versant en prenant en compte les paramètres propres à ce niveau d'investigation. Une telle démarche a été possible grâce à l'existence d'une importante base de données de références regroupant des expérimentations au laboratoire et au champ depuis l'échelle du $\frac{1}{4}$ de m² jusqu'à au bassin versant ([7] Cerdan et al. 2002a).

Le modèle nécessite 5 grands types de données d'entrée :

- ☞ modèle numérique de terrain (MNT) : permettant de déterminer les pentes et les directions naturelles d'écoulement suivant le relief ;
- ☞ occupation du sol : renseignant sur l'état de surface du sol type (en fonction des cultures, travaux culturales effectuées et l'histoire climatique) et la réponse du sol en termes de ruissellement et d'érosion ;
- ☞ texture du sol : modulant de la sensibilité à la battance et à l'érosion définie par l'état de surface du sol type ;
- ☞ éléments linéaires anthropiques : ces éléments, influençant la direction des écoulements, sont tant permanent comme les chemins, fossés, routes que temporaires au sein des parcelles cultivées (fourrières, dérayures, traces de roue) orientés suivant le sens de travail du sol ;
- ☞ événement pluvieux : défini par quatre paramètres, durée efficace, hauteur total, intensité maximale à 6 minutes et antécédent hydrique (hauteur des précipitations cumulées des 48 heures qui précèdent).

Etat de surface du sol

Le paramètre clé du modèle STREAM est l'état de surface des parcelles cultivées, caractérisé par le faciès (état de dégradation de la surface du sol suivant leur sensibilité à la battance) et la rugosité du sol travail. Cet état de surface combiné à la couverture du sol est déterminant dans la modélisation de l'infiltration, l'érosion et le ruissellement.

Faciès (état de dégradation de la surface du sol)

Le faciès correspond à une notation morphologique traduisant le stade de développement des croûtes de battance, donc l'état de dégradation du sol. La classification mise en place par l'INRA a été retenue, résultant de nombreuses années de recherche.

Tableau 1 : Description des faciès de dégradation de l'état de la surface du sol utilisés par STREAM

CLASSE DE FACIES	DESCRIPTION
F0	Etat fragmentaire initial : chaque particule de terre visible en surface appartient à un agglomérat plus ou moins important mais parfaitement délimité et séparé de ses voisins.
F11	Faciès fragmentaire altéré : certains fragments sont bien distincts et leur forme est très peu modifiée par rapport à F0, alors que d'autres sont soudés, leurs contours restant reconnaissable.
F12	Faciès continu sans dispersion : les fragments sont intégrés dans des zones d'aspect continu, leurs contours ne sont plus reconnaissables mais il n'y a pas de signe de dispersion.
F2	Faciès continu avec croûte sédimentaire : on distingue alors des signes de départ de terre, et les micros dépressions sont recouvertes d'un manteau très lisse, plus ou moins épais.

SOURCE : INRA

Rugosités orientés (parallèle et perpendiculaire au sens du travail du sol)

La surface du sol d'une parcelle agricole est caractérisée par une rugosité à l'échelle centimétrique résultant du travail du sol et de la dégradation sous l'action des agents climatiques. La rugosité du sol permet de définir la capacité de stockage d'eau (sous forme de flaque) et la direction des écoulements (souvent le sens du travail du sol ou souvent la plus grande pente). Cette rugosité est évaluée suivant deux directions : la rugosité parallèle au sens du travail du sol (rôle dans le stockage d'eau, flaques) et la rugosité perpendiculaire (rôle d'orientation du ruissellement). Etroitement corrélée au type de travail du sol, les cinq classes de rugosité du modèle sont reportées dans le tableau ci-après avec des exemples de travail du sol.

Le croisement des deux rugosités orientées (parallèle et perpendiculaire) avec la pente locale du terrain permet d'estimer la capacité de stockage d'eau et de définir la direction des écoulements.

Tableau 2 : Classe de rugosité de la surface du sol et exemples (STREAM)

Note	Exemples
0 D < 1 cm	Semis très battus, chantiers de récolte très tassés
1 1 < D < 2 cm	Semis battus ou roulés
2 2 < D < 5 cm	Semis de blé très motteux
3 5 < D < 15 cm	Déchaumages à socs peu altérés, déchaumage à dents
4 D > 15 cm	Etat initial des labours et déchaumages à socs

SOURCE : INRA

Taux de couverture végétale

Le pourcentage de végétation recouvrant le sol est estimé visuellement et noté en trois classes et traduit la protection du sol sous l'impact des gouttes de pluies (effet splash). Cette donnée introduite dans le modèle, qui varie dans l'année et en fonction du type de culture, est également issue des nombreuses observations faites par l'INRA.

Tableau 3 : Notes de taux de couverture végétal retenus pour STREAM

Note	Taux de recouvrement du couvert végétal
1	0 à 20%
2	21 à 60%
3	61 à 100%

SOURCE : INRA

Modules simulés par STREAM

Infiltration et volume d'eau ruisselée

Pour chaque pixel du bassin modélisé, une pluie d'imbibition (P_i en mm) et une capacité d'infiltration (Inf en mm/h) stationnaire sur toute la durée de l'évènement sont déterminées. Ces deux valeurs sont issues d'un tableau de correspondance avec les paramètres faciès, rugosité et pourcentage de couvert végétal définis pour chaque parcelle culturale. Pour réaliser l'intégration de ces paramètres dans la règle de décision, on procède en trois phases.

La première phase consiste à affecter à chaque combinaison de ces trois paramètres et en fonction de leur influence respective une note de sensibilité au ruissellement allant de 1 à 4. La classe 4 représente la combinaison la plus apte à produire un ruissellement (faciès battu, faible rugosité et taux de couvert végétal réduit). Ensuite, une capacité d'infiltration est associée à chaque classe de sensibilité en fonction des résultats de nombreux travaux expérimentaux menés depuis plus de 15 ans ([4] Boiffin et al. 1988 ; [21] Ludwig, 1992 ; [25] Ouvry, 1992 ; [17] King et Le Bissonnais, 1992 ; [12] Gallien et al. 1995).

Tableau 4 : Attribution d'une valeur d'infiltration en fonction de la rugosité, du couvert végétal et du faciès ([11] Dubreuil et al, 2002)

Rugosité	Couvert végétal (%)	Classe de Faciès				
		F0	F11	F12	F2	
> 15 cm (classe 4)	> 61 (note = 3)	50	50	50	10	
	21 – 60 (note = 2)			20		
	< 21 (note = 1)			50		
5 – 15 cm (classe 3)	> 61 (3)		50	50	50	5
	21 – 60 (2)				20	
	< 21 (1)				20	
2 – 5 cm (classe 2)	> 61 (3)	50		50	20	10
	21 – 60 (2)				20	
	< 21 (1)				20	
1 – 2 cm (classe 1)	> 61 (3)		50	20	10	5
	21 – 60 (2)				10	
	< 21 (1)				10	
< 1 cm (classe 0)	> 61 (3)	10		10	5	2
	21 – 60 (2)				5	
	< 21 (1)				5	

SOURCE : INRA

La deuxième phase consiste à caractériser l'état hydrique initial afin de déterminer la pluie d'imbibition, c'est-à-dire la hauteur d'eau infiltrée avant d'atteindre le régime d'infiltration stationnaire ([18] Le Bissonnais et Singer, 1992). Cette hauteur de pluie d'imbibition est calculée à partir d'une combinaison entre la hauteur de pluie des 48 heures précédant l'événement modélisé et la classe d'aptitude relative au ruissellement.

Tableau 5 : Détermination de la pluie d'imbibition en fonction de la capacité d'infiltration et de la pluie antécédente ([11] Dubreuil et al, 2002)

		Pluie des 48 heures précédente (mm)			
		0	1 à 15	16 à 40	> 40
Inf. (mm/h)	50	20	15	12	8
	20	15	12	8	5
	10	12	8	5	2
	5	8	5	2	1
	2	5	2	1	0

SOURCE : INRA

Enfin, le modèle utilise les caractéristiques de l'évènement pluvieux (hauteur et durée de pluie) pour les combiner avec la capacité d'infiltration de chaque pixel afin de déterminer si celui-ci génère du ruissellement.

Réseau du cheminement du ruissellement

Une fois l'infiltration et le volume ruisselé déterminés, l'étape suivante consiste à calculer l'accumulation des flux hydriques amont aval pour chaque pixel du bassin versant et définir le réseau de circulation des eaux de ruissellement. Pour ce faire, la fonction « Flow direction » de Spatial Analyst (module de Arcgis) est utilisée pour définir la direction d'écoulement sur les 8 possibles (mailles voisines).

Le travail du sol crée une rugosité à la surface (micro topographie), pouvant forcer les directions des écoulements dans un sens différent de celui déterminé par la seule topographie (macro topographie). D'autres éléments linéaires constituant la méso topographie tels les dérayures, les fossés ou encore des éléments d'infrastructure (routes, chemins) constituent des collecteurs du ruissellement. Tous ces éléments (rugosité, collecteurs) peuvent être pris en compte dans le modèle et modifier ainsi le chemin des eaux de ruissellement pour rendre compte au mieux de la réalité de terrain.

Du fait de la grande taille du bassin versant de la Lézarde, les éléments linéaires constituant la méso topographie, ne sont pas introduits dans la simulation à l'échelle du bassin versant (données non disponibles). En revanche, pour les sites pilotes, le sens du travail du sol est introduit pour chaque parcelle susceptible de modifier le sens des écoulements.

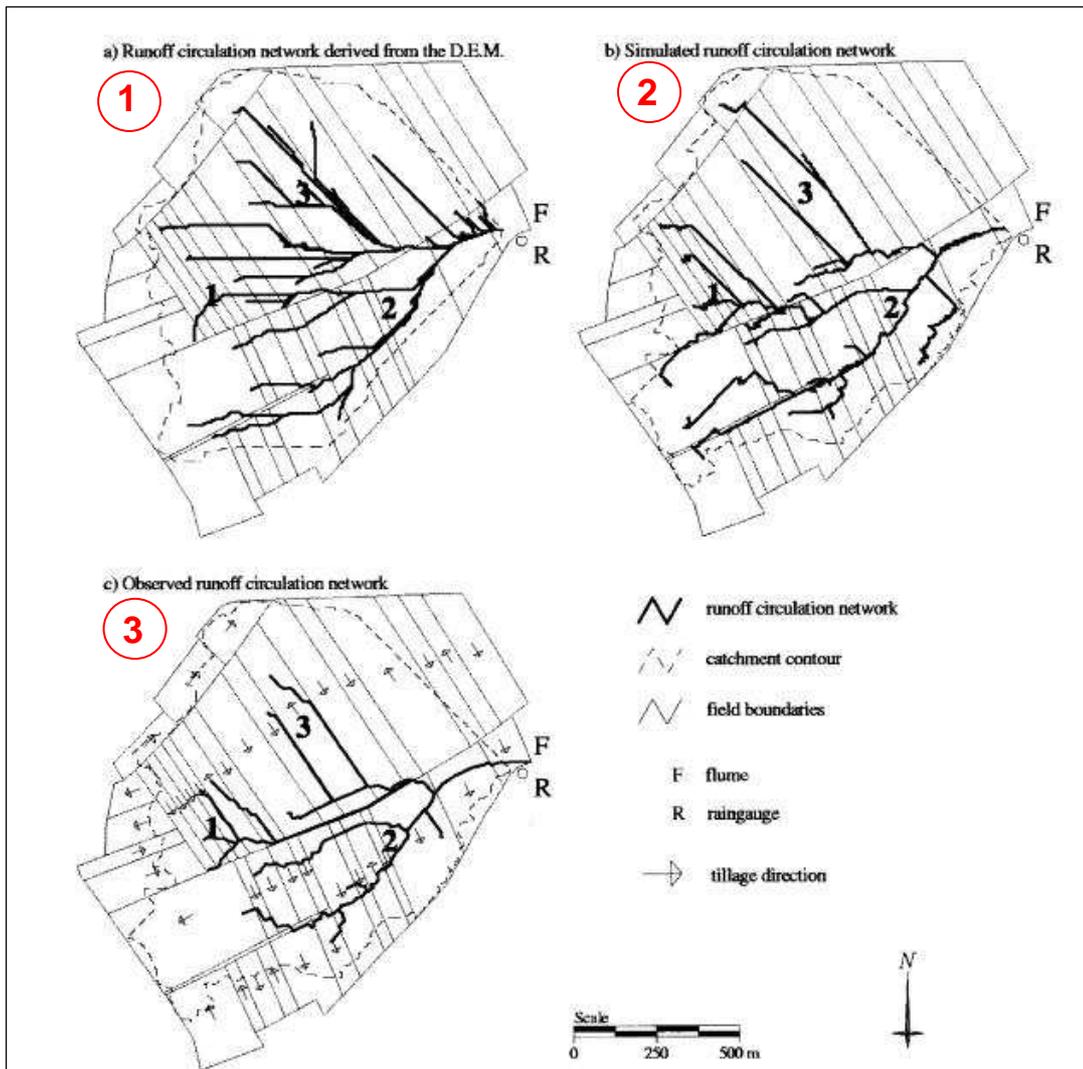


Figure 1 : rôle des éléments linéaires dans la simulation du cheminement des écoulements dans le modèle STREAM ([7] Cerdan 2002a)
Schéma avec prise en compte des éléments linéaires dans la simulation des écoulements (2), comparé à la réalité de terrain (3) et à une simulation sans prise en compte des éléments linéaires (1). Le réseau d'écoulement est beaucoup plus pertinent et se rapproche le plus de la réalité observée.

Erosion diffuse

La charge en sédiment potentielle dans les eaux de ruissellement est déterminée en fonction du taux de couverture végétale, de la rugosité orientée (parallèle ou perpendiculaire à la pente), de l'état de dégradation du sol (faciès) et de l'intensité maximum sur 6 minutes de l'évènement pluvieux. Ces valeurs sont comprises entre 0 et 1 g/l, pour des sols motteux avec un couvert végétal développé et pour des pluies d'intensité maximale à 6 minutes inférieures à 10 mm/h, pour atteindre des valeurs entre 25 et 35 g/l avec des sols dégradés nus soumis à des pluies d'intensité maximales à 6 minutes supérieure à 40 mm/h. A l'échelle du bassin versant, les sédiments sont incorporés aux flux ruisselants et le dépôt des particules est pris en compte lors d'un changement de topographie favorable à la sédimentation et/ou lors d'un passage au travers un espace à couverture végétale plus dense (zone enherbée par exemple).

Tableau 6 : Détermination de la concentration potentielle en sédiment dans l'eau de ruissellement ([29] Souchère & al., 2004)

Rugosité (cm)	Taux de couvert végétal	Intensité maximale à 6 min	F0	F11	F12	F2
0-1	0-20%	0-10 mm/h	0-1	1-5	0-1	1-5
		10-40 mm/h	0-1	5-10	1-5	5-10
		>40 mm/h	1-5	10-15	5-10	10-15
	21-100%	0-10 mm/h	0-1	0-1	0-1	0-1
		10-40 mm/h	0-1	1-5	0-1	1-5
		>40 mm/h	1-5	5-10	1-5	5-10
2-5	0-20%	0-10 mm/h	0-1	0-1	0-1	0-1
		10-40 mm/h	1-5	10-15	5-10	10-15
		>40 mm/h	5-10	15-25	10-15	15-25
	21-100%	0-10 mm/h	0-1	1-5	0-1	1-5
		10-40 mm/h	0-1	5-10	1-5	5-10
		>40 mm/h	1-5	10-15	5-10	10-15
5-10	0-20%	0-10 mm/h	1-5	5-10	5-10	10-15
		10-40 mm/h	5-10	10-15	10-15	15-25
		>40 mm/h	10-15	25-35	15-25	25-35
	21-100%	0-10 mm/h	0-1	5-10	1-5	5-10
		10-40 mm/h	1-5	10-15	5-10	10-15
		>40 mm/h	5-10	15-25	10-15	15-25
> 10	0-20%	0-10 mm/h	1-5	10-15	5-10	10-15
		10-40 mm/h	5-10	15-25	10-15	15-25
		>40 mm/h	10-15	25-35	25-35	25-35
	21-100%	0-10 mm/h	1-5	5-10	5-10	10-15
		10-40 mm/h	5-10	10-15	10-15	15-25
		>40 mm/h	10-15	25-35	15-25	25-35

Erosion linéaire

La première étape du modèle consiste à caractériser l'intensité du ruissellement et la résistance du sol au cisaillement. Les facteurs pris en compte sont l'intensité de la pente et l'influence de la surface du sol sur la vitesse d'écoulement des eaux de ruissellement et sa résistance à l'incision. Pour chaque pixel, la sensibilité à l'érosion linéaire est évaluée selon l'équation suivante :

$$\text{Sensibilité à l'érosion linéaire} = \text{Volume ruisselé} \times \text{Intensité de la pente} \times \text{Coefficient de friction} \times \text{Facteur de cohésion du sol}$$

Le volume ruisselé est déterminé selon la méthode décrite plus haut.

L'influence de la surface du sol sur la vitesse d'écoulement des eaux de ruissellement et sa résistance à l'incision sont estimées selon la combinaison de l'occupation du sol (type de culture, travail du sol), du taux de couverture végétale, des rugosités perpendiculaires et parallèles au sens du travail du sol, de l'armature racinaire de la culture (suivant la densité et le type de racines) et de la cohésion du sol.

Le modèle permet de localiser les pixels sensibles à l'érosion linéaire, par une indication de la section de la ravine et par la quantité de terre érodée cumulée en amont du pixel considéré.

Paramètres retenus

Dans le cadre de l'étude, STREAM est utilisé afin de définir et localiser la sensibilité à l'érosion des parcelles cultivées et cultivables, toute chose égale par ailleurs, sans besoin d'une exactitude sur les volumes d'érosion. De ce fait, les paramètres retenus concernant les parcelles cultivées ou cultivables en termes de couverture, de faciès et de rugosité sont homogènes sur l'ensemble du territoire. La modélisation est réalisée à l'échelle du pixel élémentaire de 10 x 10 m², soit 100 m² ou 100 pixels par hectare.

Modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain retenu est le BD Topo de l'IGN au pas de 25 mètres (MNT Pays), permettant de définir la pente locale et la direction des écoulements.

Occupation du sol

L'occupation du sol est simplifiée en 5 grands types : les parcelles cultivées, les prairies, les forêts et bois, les zones urbaines (lâches et denses), les zones industrielles et artisanales.

Ne disposant d'aucune information exhaustive sur les cultures implantées dans les parcelles, et d'autre part ne pouvant préjuger de l'occupation du sol futur, une occupation du sol homogène est attribuée à l'ensemble des terres cultivées. La culture type retenue est « betterave de début mai », avec un état de surface dégradé (présence d'une croûte structurale et rugosité faible) et un couvert végétal inférieur à 20%. Ce choix place ces terrains dans la situation la plus aggravante en termes de couverture végétale, rugosité et état de dégradation du sol vis-à-vis des périodes pluvieuses les plus érosives (orages de printemps). Elle permet d'uniformiser la réponse du bassin à partir de la situation la plus contraignante. Les résultats devront être analysés et interprétés en relatif et non comme valeurs réelles attendues.

Les autres occupations du sol sont standard par rapport à la base de données de STREAM en ce qui concerne leur état de surface. Les bois sont caractérisés comme non ruisselants et les zones urbaines (au sens large) comme présentant pas d'érosion des sols, pas d'infiltration et un ruissellement guidé par la direction de la plus grande pente.

Éléments linéaire anthropiques

Les éléments linéaires pouvant dévier les flux ruisselants (route, fossés) sont pris en compte pour la simulation sur l'ensemble du site d'étude. Seuls les motifs agraires de type fourrières, dérayures et le sens de travail du sol ne sont pas pris en compte.

Évènement pluvieux

Le modèle STREAM impose de disposer à la fois la hauteur totale cumulée sur toute la durée de l'averse et l'intensité maximale en 6 mn pour cette averse. Les données pluviométriques disponibles sont celles du poste de Météo France de Strasbourg-Entzheim, donnant pour une pluie d'une heure centennale : une hauteur d'eau de 37.92 mm et une intensité maximale en 6 min de 161 mm/h.

Evènement pluvieux	Valeur
Durée	1 heure
Hauteur totale	37.92 mm
Intensité maximum à 6 minutes	161 mm/h
Pluie antécédente	0 mm
MNT	Résolution
BD Alti® IGN & interpolation	25 m
Caractéristique du parcellaire agricole	Type
Caractérisation des parcelles cultivées	Type Betteraves, début mai
Faciès	fragmentaire altéré
Rugosité (perpendiculaire et parallèle)	semis battus ou roulés (1 à 2 cm)
Couverture végétale	< 20 %
Options	Utilisation / Type
Parcellaire agricole	oui
Eléments linéaires anthropiques (routes, fossés)	oui
Eléments linéaires agraires	non
Prise en compte des pâtures	oui
Zones urbaines	Imperméable, pas d'érosion
Bois	Non ruissellant, pas d'érosion