

Application du modèle STREAM à l'échelle d'un bassin versant au cours d'un cycle hydrologique

Véronique Souchère¹, Luc Sorel^{2,4}, Alain Couturier², Yves Le Bissonnais^{2,5} et Olivier Cerdan³

¹ INRA, UMR SADAPT, B.P. 1, 78850 Thiverval Grignon – souchere@grignon.inra.fr

² INRA, Science du Sol, B.P. 20619, Ardon, 45166 Olivet cedex

³ BRGM, ARN, 3 avenue Claude-Guillemain, B.P. 6009, 45060 Orléans Cedex 2

⁴ INRA, UMR SAS, 65 rue de Saint-Brieuc, 35042 Rennes cedex (affectation actuelle)

⁵ INRA, UMR LISAH, 2 place Viala, 34060 Montpellier cedex 1 (affectation actuelle)

1.	Le modèle STREAM.....	2
1.1.	Le module « Infiltration ».....	3
1.2.	Le module érosion diffuse.....	5
1.2.1	Analyse et paramétrisation des processus à l'échelle locale.....	5
1.2.2	Intégration des processus à l'échelle du bassin versant.....	6
2.	Acquisition des données.....	7
2.1.	Le choix de la zone et de la période d'étude.....	7
2.2.	MNT et rasters hydrologiques liés à la topographie.....	8
2.3.	Parcellaire et occupation du sol.....	9
2.4.	Données pluviométriques.....	12
2.4.1	Points forts et points faibles des données pluviométriques.....	12
2.4.2	Comparaison des pluviométries amont et aval de l'Austreberthe.....	12
2.4.3	Choix des événements pluvieux donnant lieu à des simulations.....	15
3.	Développements.....	17
3.1.	Lois d'évolution des occupations du sol.....	17
3.1.1	Création d'une base de données.....	17
3.1.2	Utilisation de la base pour déterminer les lois d'évolution des paramètres.....	18
3.1.3	Affectation des paramètres STREAM aux polygones d'occupation du sol.....	20
3.2.	Gradient de pluie.....	22
3.2.1	Principe.....	23
3.2.2	Application au bassin de l'Austreberthe.....	23
4.	Résultats.....	24
5.	Conclusion.....	31
6.	Bibliographie.....	31

L'objectif recherché à travers le développement de STREAM (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management) par les équipes INRA de Science du Sol d'Orléans et de l'UMR SAD APT de Grignon, est l'élaboration d'un modèle de prédiction opérationnel en recherchant le compromis optimal entre la prise en compte des processus élémentaires de l'érosion, le nombre de variables nécessaires et leur disponibilité. Le modèle dont les échelles spatiales et temporelles sont le bassin versant et l'événement pluvieux est structuré en quatre modules interdépendants décrivant respectivement, le réseau d'écoulement (Souchère et al., 1998), le ruissellement (Cerdan et al., 2002c), l'érosion diffuse (Cerdan et al., 2002a) et l'érosion linéaire (Souchère et al., 2003). 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 ¼ de m² jusqu'à l'échelle du bassin versant (Cerdan et al., 2002b).

Ce modèle permet de quantifier le ruissellement et les pertes en terre, tout en localisant les zones où ces phénomènes se produisent. Il peut également être utilisé pour simuler les effets liés à la modification de la localisation des cultures, des façons culturales, de la disposition des parcelles, du

sens de travail du sol ou pour tester l'impact d'aménagements destinés à lutter contre l'érosion (bandes enherbées, mares tampons...). Compte tenu de ces possibilités, nous avons décidé de tester le couplage de STREAM avec l'Applicatif SENEQUE afin d'améliorer la prise en compte des pratiques agricoles ou d'élevage et des aménagements paysagers à l'échelle des têtes de bassin. A terme, le chaînage de ces 2 modèles (SENEQUE et STREAM) dans un Applicatif nommée SENECAM devrait permettre d'améliorer le calcul de l'impact de modifications spatiales des activités agricoles sur la qualité des eaux de surface et sur les flux d'exportation de matières polluantes à l'échelle des bassins versants.

Dans ce rapport, après un exposé rapide des modules de STREAM mobilisés dans le cadre de cette étude, nous présenterons les données utilisées pour test le couplage de SENEQUE et de STREAM. Nous exposerons les développements qui ont été nécessaires pour permettre le fonctionnement de STREAM à une échelle spatio-temporelle compatible avec l'Applicatif SENEQUE. Enfin, nous analyserons brièvement les sorties fournies par STREAM avant de conclure.

1. Le modèle STREAM

Pour disposer d'un modèle adapté à l'évaluation mais aussi à la visualisation des conséquences, vis-à-vis du ruissellement et de l'érosion, des décisions techniques des agriculteurs, nous avons commencé le transfert du modèle STREAM sous ArcView 8.

L'application STREAM version 3.0, a été développée en Visual Basic pour Application. Les différents outils nécessaires sont regroupés à l'intérieur d'un fichier modèle de document d'ArcMap, "stream30.mxt". Cette option de développement permet à un utilisateur qui ne possède aucun droit d'administration sur l'ordinateur, d'utiliser STREAM sans procédure lourde d'installation de type Windows et sans déclaration dans le registre du système.

La philosophie générale qui a été choisie pour modéliser le ruissellement à l'aide de STREAM, consiste à créer un document ArcMap à partir de ce modèle « stream30.mxt ». L'utilisateur hérite ainsi d'une barre d'outils propre à STREAM, de comportements spécifiques ainsi que d'un modèle de mise en page par défaut. La Figure 1 présente l'interface à partir de laquelle s'effectuent toutes les opérations disponibles actuellement avec le modèle.

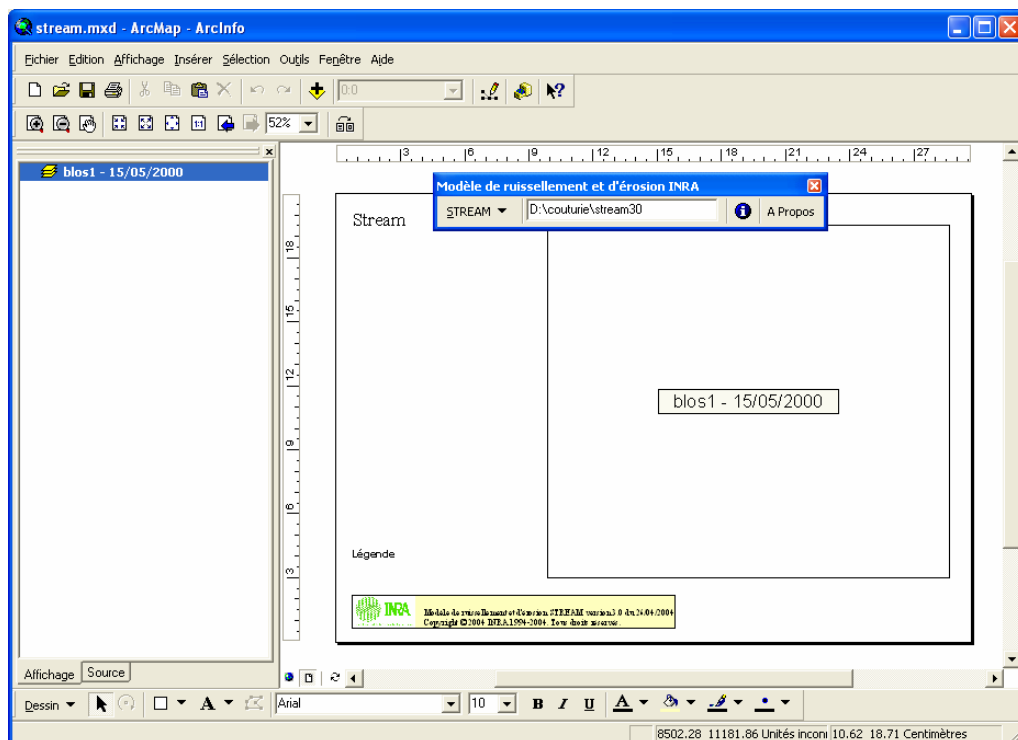


Figure 1 : Mise en page par défaut et barre d'outils STREAM

La philosophie adoptée consiste également en une activation progressive des boutons et onglets au fur et à mesure de l'état d'avancement du traitement. Ainsi, un traitement reste indisponible tant que les traitements dont-il dépend n'ont pas été effectués avec succès. L'application va progressivement permettre à l'utilisateur d'importer les données indispensables à la suite des traitements (Figure 2) c'est à dire une couche de lignes qui correspondent aux contours des parcelles, une autre de polygones qui représentent le parcellaire de votre secteur d'étude, et enfin une troisième sous forme de « raster » (mode maillé), qui modélise le relief (Modèle Numérique de Terrain). Après l'importation, ces données sont contrôlées afin qu'elles soient conformes au dictionnaire des données de STREAM. Les codes non conformes sont alors repérés et localisés sur une carte afin que l'utilisateur puisse les corriger facilement pour poursuivre les étapes du traitement qui conduisent in fine au calcul des écoulements d'eau en tout point du bassin versant.

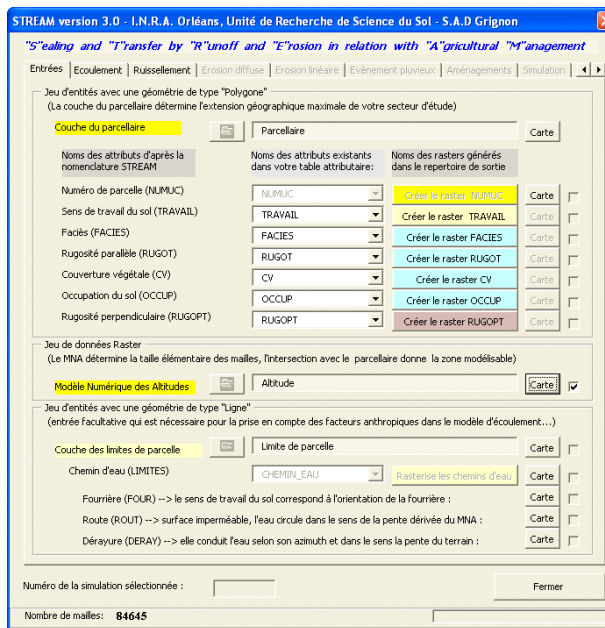


Figure 2 : Boîte de dialogue pour la saisie et le contrôle des données initiales

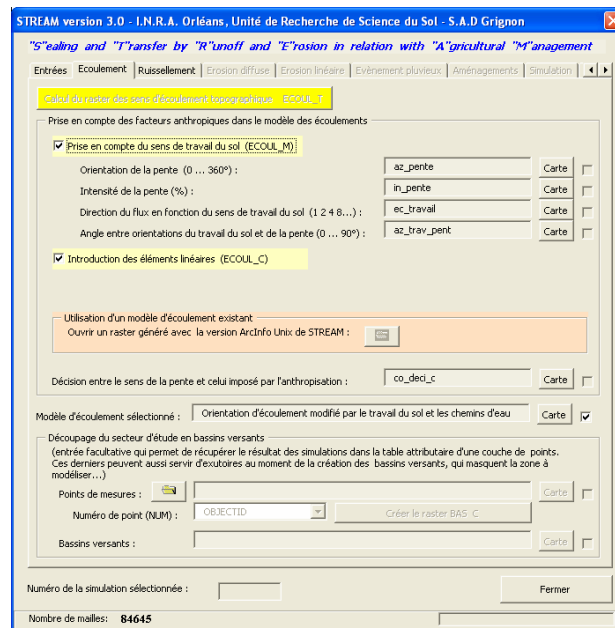


Figure 3 : Boîte de dialogue pour le choix d'un modèle d'écoulement

Dans sa version actuelle, l'application STREAM sous ArcView ne permet pas encore l'implémentation complète de la prise en compte des facteurs anthropiques (facteurs liés à l'activité humaine) dans le calcul du modèle d'écoulement. Seul le modèle d'écoulement topographique (ECOUL_T) peut être calculé. Cependant, lorsqu'on souhaite utiliser STREAM avec des données issues d'un bassin versant où l'influence du sens du travail du sens est importante pour déterminer le sens d'écoulement du ruissellement, il est possible d'utiliser comme modèle d'écoulement un raster élaboré à partir de la version ArcInfo sous Unix de STREAM (Figure 3).

1.1. Le module « Infiltration »

Dans ce module, les processus sont modélisés en ne prenant en compte que les caractères prépondérants (faciès, rugosité et couvert végétal). Ceux-ci sont combinés simplement afin d'établir une règle de décision facilement adaptable en fonction des caractéristiques du terrain étudié. 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 (Tableau 2) est associée à chaque classe de sensibilité en fonction des résultats de nombreux travaux expérimentaux menés en haute Normandie depuis plus de 15 ans (Boiffin et al., 1988 ; Ludwig, 1992 ; Ouvry, 1992 ; King et Le Bissonnais, 1992 ; Gallien et al., 1995).

Tableau 1 : Capacité d'infiltration à saturation (en mm/h) en fonction des paramètres faciès, rugosité et couvert végétal pour un sol limono sableux (Pays de Caux).

Rugosité	Couvert végétal (taux en %)	Faciès			
		F0	F11	F12	F2
>10 cm	>61	50	50	50	10
	31-60	50	50	20	10
	<30	50	20	20	10
5-10 cm	>61	50	50	50	10
	31-60	50	50	20	10
	<30	50	20	10	5
2-5 cm	>61	50	50	20	10
	31-60	50	20	10	5
	<30	50	20	10	5
1-2 cm	>61	50	20	10	5
	31-60	50	20	10	5
	<30	20	10	5	2
<1 cm	>61	50	20	10	5
	31-60	20	10	5	2
	<30	10	10	5	2

Rugosité : écart de côte d'altitude entre le fond des dépressions et leur point de débordement ;

Faciès F0 : état initial conféré par le travail du sol ;

Faciès F11 : croûte structurale ;

Faciès F12 : croûte sédimentaire uniquement dans les dépressions, le restant avec croûte structurale ;

Faciès F2 : croûte sédimentaire généralisée à toute la surface du sol

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 (Le Bissonnais et Singer, 1992). Cette hauteur de pluie d'imbibition est calculée à partir d'une combinaison entre la hauteur de pluie des 10 jours précédant l'événement modélisé et la classe d'aptitude relative au ruissellement (Tableau 1).

Tableau 2 : Hauteurs de pluie d'imbibition (P_i) en fonction de la capacité d'infiltration (Inf) et de la pluie antécédente (IPA) pour le Pays de Caux.

Inf (mm/h)	IPA (mm)			
	0 mm	1-15 mm	16-40 mm	>40 mm
50 mm/h	20	15	12	8
20 mm/h	15	12	8	5
10 mm/h	12	8	5	2
5 mm/h	8	5	2	1
2 mm/h	5	2	1	0

La troisième phase permet de calculer pour un événement donné, la hauteur d'eau infiltrée en tout point de la surface modélisée. Pour cela, on multiplie la capacité d'infiltration par la durée de l'événement. On soustrait ensuite à cette valeur la pluie d'imbibition et on ajoute la hauteur d'eau tombée pendant l'événement. On obtient finalement une valeur bilan Infiltration/Ruissellement qui indique si la parcelle était ruisselante (cas où la valeur est positive) ou au contraire si en plus d'infiltrer la hauteur de pluie tombée, elle a la capacité d'infiltrer une partie ou la totalité d'un éventuel ruissellement amont (cas où la valeur bilan est négative).

Ensuite, pour calculer les volumes ruisselés en tout point du bassin versant, nous avons programmé sous ArcGis un algorithme qui nécessite trois grilles d'entrée dont la taille des pixels varie selon la précision des levées topographiques du bassin versant traité :

- Une grille de direction de flux,
- Une grille d'accumulation des flux,
- Une grille de poids.

Les deux premières grilles sont issues du module utilisé pour élaborer le réseau d'écoulement. Elles servent de référence pour pouvoir respecter l'ordre de déplacement d'une cellule à une autre en tenant compte de la topographie mais aussi des modifications induites par les activités anthropiques lorsque la résolution spatiale des données d'entrée permet de prendre en compte cette composante. La dernière grille contient les valeurs du bilan Infiltration/Ruissellement.

1.2. Le module érosion diffuse

1.2.1 Analyse et paramétrisation des processus à l'échelle locale

Pour une grande partie des sols à texture limoneuse, le ruissellement et l'érosion résultent de la diminution de l'infiltrabilité consécutive à la dégradation structurale de la surface des sols sous l'action des pluies (formation de croûtes de battance par désagrégation des mottes de terre). La capacité d'infiltration peut, dans certains cas, être réduite jusqu'à des valeurs de quelques mm/h. En territoire agricole s'ajoute l'influence de la rugosité (modifiée par les techniques culturales) et du couvert végétal (Le Bissonnais et al., 2002). L'importance de ces facteurs est évaluée en fonction de leur influence sur la concentration potentielle en sédiment du ruissellement. Par rapport, aux facteurs déjà présent dans les autres modules, pour évaluer la concentration potentielle en sédiment, un facteur supplémentaire a été ajouté : l'intensité maximale à 6 min de la pluie. Des classes de concentration potentielle en sédiment, correspondant aux combinaisons des facteurs ont aussi été définies (Tableau 3). Cependant, les résultats expérimentaux montrant plus de variabilité que pour l'infiltration, ce sont des gammes de concentration potentielle en sédiment (et non des valeurs uniques) qui ont été assignées aux différentes situations. Les valeurs s'étalent de 0-1 g/l, pour des sols dégradés avec un couvert végétal développé et pour des pluies d'intensité maximale à 6 min inférieure à 10 mm/h, à 25-35 g/l pour des sols nus motteux soumis à des pluies d'intensité maximale à 6 min supérieure à 40 mm/h (Cerdan et al., 2002a, 2002b).

Tableau 3 : Fourchettes de concentration potentielle en sédiment (g/l) dans le ruissellement. Les valeurs en gras sont directement déterminées sur la base de références expérimentales, les autres sont extrapolées à l'aide d'une méthode basée sur la logique floue.

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

Cette classification de combinaisons de facteurs sous forme de tableaux de décision à entrées multiples a donc permis de caractériser des situations en fonction de leur sensibilité au mécanisme étudié. Ces tableaux représentent la formalisation de résultats expérimentaux pour la plupart obtenus en conditions naturelles. Ils ont l'avantage d'intégrer non seulement des lois bien quantifiées mais aussi des résultats évalués de manière qualitative. Ils permettent, en outre, de tenir compte de manière simple des interactions entre facteurs ; l'effet d'un paramètre pouvant être catalysé ou, au contraire, inhibé en fonction du degré d'expression des autres. Ceci est, par exemple, illustré par l'importance de l'effet de la rugosité sur la concentration potentielle en sédiment qui varie en fonction du degré de développement du couvert végétal (Cerdan et al., 2002b).

1.2.2 Intégration des processus à l'échelle du bassin versant

Les tableaux de décision caractérisent les processus à l'échelle de la parcelle. Ces évaluations sont reprises pour établir la modélisation à l'échelle du bassin versant (Figure 1). Les sédiments sont transportés proportionnellement aux volumes ruisselés.

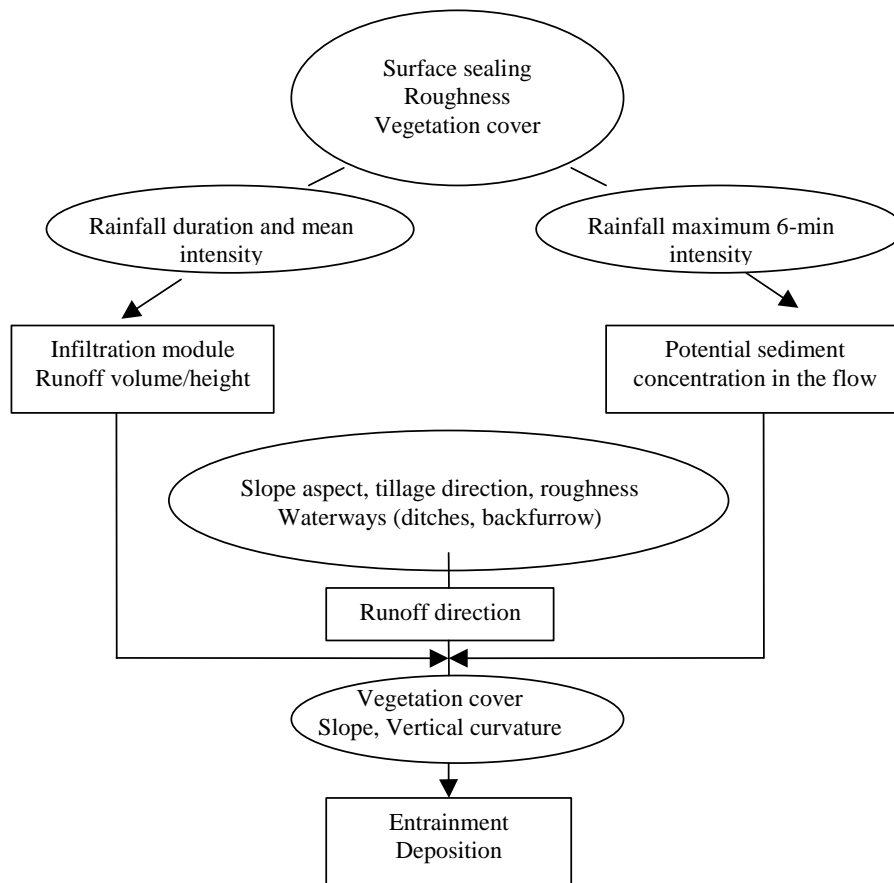


Figure 4 : Flow diagram du module d'érosion diffuse de STREAM

Deux cas sont donc considérés, cas où le pixel simulé correspond, I- à une surface qui a le potentiel d'infiltrer une partie ou la totalité du ruissellement amont, et II- à une surface produisant du ruissellement (Cerdan et al., 2002a) :

I - si $(R - I_{\alpha})a < 0$, pour un pixel α avec i pixels amont alors,

$$md_{\alpha} = \sum mu_i + \frac{(R - I_{\alpha})a \sum mu_i}{\sum V_{u_i}}, \text{ avec } md_{\alpha} = \text{masse de sédiment quittant le pixel } \alpha,$$

mu_i = masse de sédiment provenant des pixel amont, V_{u_i} = volume ruisselé provenant du pixel amont, R = hauteur de la pluie, I_{α} = capacité d'infiltration du pixel α , t = durée de la pluie, a = surface du pixel.

II - si $(R - I_t)a \geq 0$, pour un pixel α ayant i pixels amont, alors

$$md_\alpha = \sum mu_i + (R - I_\alpha t)aSC_\alpha, \text{ avec } SC_\alpha = \text{concentration potentiel en sédiment du pixel } \alpha.$$

Les particules sont déposées en fonction de variations dans la topographie (convexité verticale, intensité de la pente) ou de variations dans le couvert végétal. Des seuils de concentration maximale en sédiment, au-dessus desquels la masse de sédiment correspondant à l'excédent est déposée ont été définis expérimentalement. Pour les dépôts induits par le couvert végétal, une distinction a été établie entre les couvertures pérennes (prairies permanentes) et les plantations à couvert végétal développé (Cerdan et al., 2002a).

Une première évaluation de ce module d'érosion diffuse à l'aide de données provenant d'un bassin versant expérimental, a démontré la capacité de cette approche à reproduire les valeurs observées avec satisfaction (Cerdan et al., 2002a).

2. Acquisition des données

2.1. Le choix de la zone et de la période d'étude

Compte tenu du domaine d'application du modèle STREAM, qui se limite aux zones limoneuses du Nord Ouest de la France, et l'absence de jeux de données expérimentales complémentaires pour adapter le modèle à des types de sols différents, nous avons choisi de tester son couplage avec l'Applicatif SENEQUE avec des données issues d'un bassin versant localisé en Haute Normandie et plus particulièrement dans le Pays de Caux. C'est en effet au sein de cette petite région agricole de Seine Maritime que la plupart des observations nécessaires au calage de STREAM ont été réalisées par l'INRA jusqu'à présent. Par ailleurs, dans le cadre d'un projet de recherche européen (FLOODGEN), nous avons acquis à la fin des années 1990, des informations sur la topographie et des photographies satellitaires qui sont utilisables pour déterminer l'occupation du sol. Pour valoriser l'ensemble de ces données, nous avons donc décidé de faire tourner le modèle STREAM sur la période du 1/09/96 au 31/08/97.

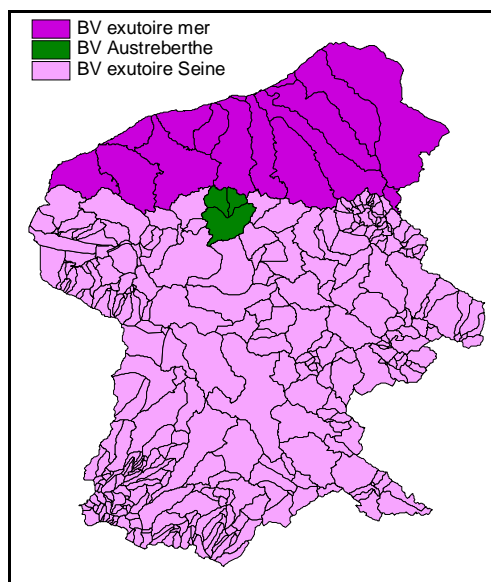


Figure 5 : Localisation du bassin versant de l'Austreberthe

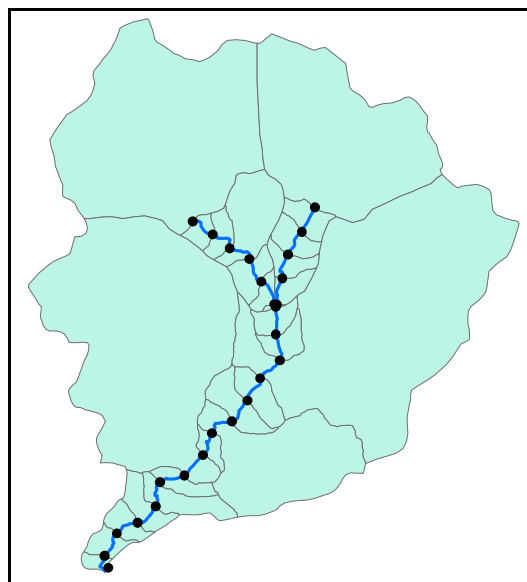


Figure 6 : Découpage du réseau hydrographique de l'Austreberthe en 23 tronçons kilométriques

Parmi les bassins versants alimentant la Seine aval (en rose sur la Figure 5), notre choix s'est orienté vers le bassin versant de l'Austreberthe (en vert sur cette même figure). En effet, ce bassin localisé en Seine Maritime est traversé par une rivière, l'Austreberthe, qui se jette dans la Seine un peu après Rouen. Sa taille est suffisamment importante pour contenir plusieurs sous bassins versants ce qui

a permis à l'équipe développant l'Applicatif SENECAM de nous fournir un découpage du réseau hydrographique de ce bassin versant en tronçons kilométriques. Les 24 points ainsi obtenus ont été utilisés par la suite pour récupérer automatiquement les valeurs de ruissellement et d'érosion calculés par STREAM lors des simulations (Figure 6).

2.2. MNT et rasters hydrologiques liés à la topographie

Le contour du bassin versant de l'Austreberthe, son MNT ainsi que les grilles de direction et d'accumulation des flux sont tous dérivés du MNT IGN au pas de 50 mètres qui avait été utilisé lors de l'étude de l'aléa érosion en Haute-Normandie (Souadi et al., 2000). Les étapes de traitement du MNT ont été :

- clippage grossier du MNT autour du bassin de l'Austreberthe afin de réduire les temps de calcul.
- comblement des puits du MNT grossièrement clippé.
- calcul automatique de la grille de direction des flux à partir du MNT comblé. ArcGis se base sur un algorithme utilisant la pente descendante la plus forte entre une cellule et ses 8 voisines pour déterminer la direction du flux. Il est donc important que le MNT soit comblé pour qu'il n'y ait pas de cellule entourée de voisines toutes plus hautes qu'elle ; sinon cette cellule ne pourrait jamais écouler le flux d'eau qu'elle reçoit vers une cellule plus basse qu'elle.
- calcul automatique de la grille d'accumulation des flux à partir de la grille de direction des flux.
- positionnement de l'exutoire du bassin versant de l'Austreberthe sur le MNT comblé. Ce point a été positionné au plus proche de la confluence avec la Seine tout en restant sur la partie du MNT qui traduit encore une réalité topographique. Si on se rapproche trop de la Seine, tous les pixels du MNT ont la même valeur d'altitude car le terrain est trop plat pour la résolution métrique du MNT. La grille de direction des flux n'étant pas fiable sur un terrain « plat », placer l'exutoire dans un tel terrain donnerait de mauvais résultat sur un plan hydrologique. Etant donné que l'étude s'intéresse à l'érosion des sols, et qu'elle s'effectue majoritairement sur des terrains en pente, la place de l'exutoire final dans la partie plate n'a pas vraiment d'incidence sur le projet.
- délimitation automatique du contour du bassin de l'Austreberthe à partir de l'exutoire et de la grille de direction des flux.
- utilisation du masque du bassin de l'Austreberthe pour clipper de façon précise le MNT comblé, la grille de direction des flux et la grille d'accumulation des flux.

La Figure 7 montre l'emplacement et l'importance du comblement du MNT. La grille a été obtenue par soustraction du MNT comblé par le MNT original. Sa légende indique en mètre la hauteur du comblement. On constate que :

- au maximum 6 mètres de « terrain » ont été rajoutés au MNT et que dans la très grande majorité des cas, les hauteurs de comblement sont inférieures à 3 mètres.
- les régions « comblées » sont par ailleurs essentiellement localisées dans la zone plate près de l'exutoire et aux abords du réseau hydrographique.

Par conséquent, les modifications du MNT ne bouleversent pas la topographie ni l'hydrologie de surface du bassin versant de l'Austreberthe. En ce qui concerne STREAM, la direction des écoulements de surface conserve donc tout son sens, en particulier sur les versants qui n'ont pas été durement affectés par la procédure de comblement des puits.

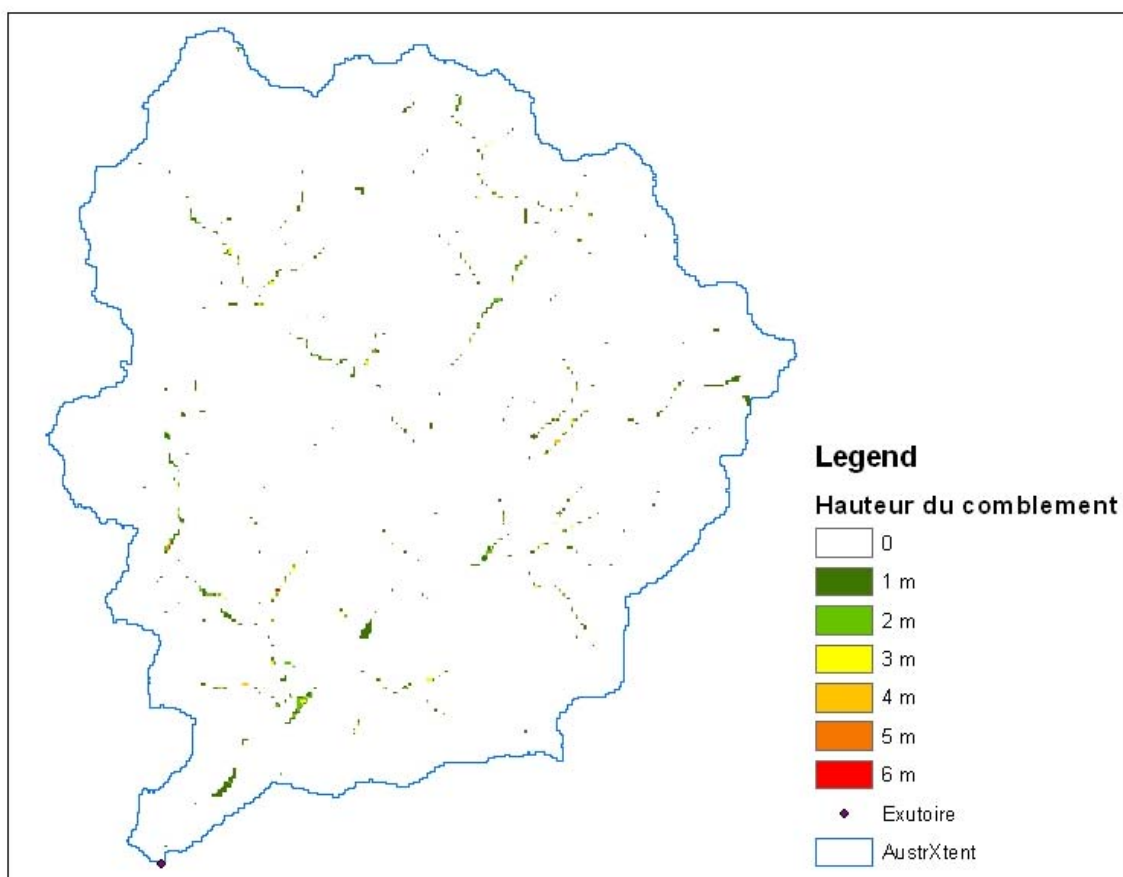


Figure 7 : Emplacement et importance de la hauteur de comblement du MNT du bassin versant de l'Austreberthe

2.3. Parcellaire et occupation du sol

Pour utiliser STREAM, nous avons besoin d'un parcellaire renseigné avec l'occupation du sol. Etant donnée la surface du bassin versant de l'Austreberthe, il n'était pas envisageable de répertorier toutes les parcelles et leur occupation du sol à partir d'un suivi de terrain. Nous avons donc utilisé une classification générée à partir de l'analyse de deux images Spot acquises en 1997 par le BRGM dans le cadre du programme européen FLOODGEN. En effet, en fonction de l'état de développement du couvert végétal des cultures, les signaux radiométriques reçus par les capteurs sont différents (Baghdadi et al., 1999 ; Blanchard et al., 1999) et il est possible en utilisant plusieurs images de déterminer différents types d'occupation du sol (Tableau 4).

Tableau 4 : Etats du couvert végétal selon les types d'occupation du sol¹

Types d'occupation du sol	Image en Mars	Image en septembre
Prairies	Couvrante	Couvrante
Cultures de printemps précoces (lin, pois)	Sols nus	Sols nus
Cultures de printemps tardives (maïs, betterave)	Sols nus	Couvrante
Cultures d'hiver (blé, escourgeon, colza)	Couvrante	Sols nus

¹ Par cultures de printemps précoces, nous entendons les cultures de printemps dont les semis sont réalisés précocement (fin février / mi mars). Les autres cultures de printemps sont caractérisées par des périodes de semis plus tardives s'étalant d'avril à début juin selon les cultures d'où l'appellation cultures de printemps tardives.

La classification bidate spot complétée avec des données extraites de Corine Land Cover a permis d'obtenir in fine les 8 classes d'occupation du sol décrites dans le Tableau 5.

Tableau 5 : classification obtenue après analyse d'un bidate Spot (mars et septembre 97)

Classe	Description
1	Prairies
2	Cultures d'hiver (blé, escourgeon, colza)
3	Cultures de printemps tardives (maïs, betterave)
4	Forêts
5	Eaux (classe non représentée au sein du BV de l'Austreberthe)
6	Zones urbaines (masque extrait de Corine Land Cover)
7	Alluvions
8	Cultures de printemps précoces (lin, pois)

Les images Spot ont une résolution de 20 m par 20 m. Comme le MNT utilisé dans le projet a une résolution de 50 m par 50 m, nous avons du ré-échantillonner la classification à la bonne résolution. Notre classification étant une image classée, le ré-échantillonnage a eu comme conséquence d'attribuer à un nouveau pixel plus grand, la valeur majoritairement rencontrée parmi les anciens pixels plus petits qui le compose. La partie gauche de la Figure 8 est un extrait de la classification d'origine avec une taille de pixel de 400 m². Sur la partie droite de cette même figure, nous voyons à la droite du trait bleu (limite ouest du bassin de l'Austreberthe), la classification ré-échantillonnée avec une taille de pixel de 2500 m². L'analyse de cette figure montre bien qu'il y a une perte d'information susceptible d'avoir des conséquences sur les statistiques d'occupation du sol.

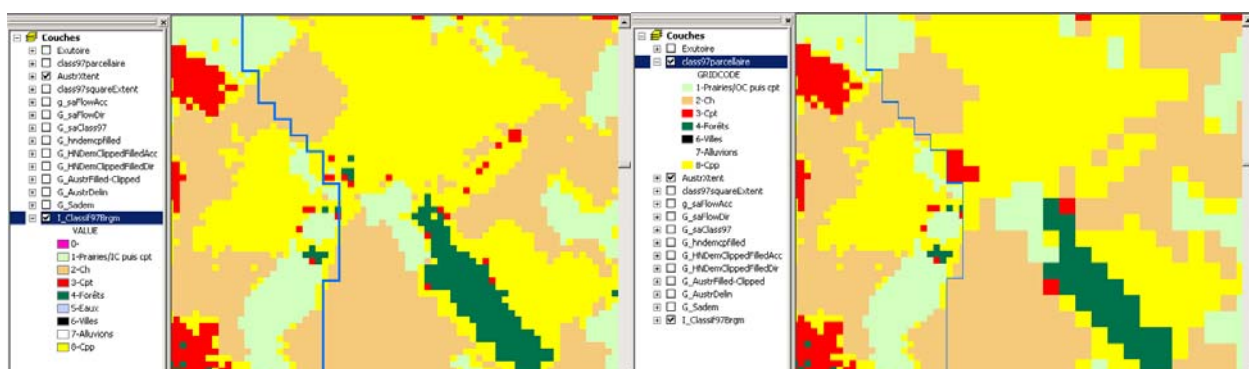


Figure 8 : Perte d'information lors du ré-échantillonnage d'une image classée à une résolution moins fine.

Afin d'estimer les conséquences de cette modification de la résolution des pixels, nous avons calculer la représentativité au sein du bassin versant de chaque classe avant et après ré-échantillonnage. Les résultats du Tableau 6 montre que la composition relative des deux images n'a pas été vraiment bouleversée. Toutes les classes ont gardé quasiment la même représentativité à l'échelle du bassin versant. L'agrégation de pixels a fait essentiellement disparaître des pixels isolés.

Tableau 6 : Effets du ré-échantillonnage sur les statistiques d'occupation du sol.

	Pixels de 400 m ²				Pixels de 2500 m ²			
	Nb de pixels	Surf. (ha)	Surf. (km ²)	% Surf. BV	Nb de pixels	Surf. (ha)	Surf. (km ²)	% Surf. BV
1 - Prairies	131852	5274	53	24,57	21151	5288	53	24,63
2 - Cultures d'hiver	94175	3767	38	17,55	15039	3760	38	17,51
3 - Cultures printemps tardives	47878	1915	19	8,92	7707	1927	19	8,98
4 - Forêts	57089	2284	23	10,64	9116	2279	23	10,62
6 - Zones urbaines	33347	1334	13	6,21	5337	1334	13	6,21
7 - Alluvions	13290	532	5	2,48	2141	535	5	2,49
8 - Cultures printemps précoces	159089	6363	64	29,64	25383	6346	64	29,56
Totaux :	536720	21469	215	100	85874	21469	215	100

Le parcellaire utilisé par STREAM pour décrire l'état et l'utilisation du sol étant de type vectoriel, nous avons dû transformer les pixels de notre classification en polygones. Le logiciel SIG ArcGis dispose d'un algorithme de création de polygones entourant des pixels de classe identique dans un raster donné. Après avoir appliqué cet algorithme sur les deux rasters de la classification (20 m et 50 m), nous avons constaté que le ré-échantillonnage à une résolution moins fine a entraîné une réduction du nombre de polygones de chaque classe (Tableau 7) mais cette réduction n'a pas non plus eu de conséquence sur la représentativité de chaque occupation du sol au sein du bassin.

Tableau 7 : Réduction du nombre de polygones lors du ré-échantillonnage.

	Polyg_20	Polyg_50
1 - Prairies	2380	1415
2 - Cultures d'hiver	3562	1313
3 - Cultures printemps tardives	4321	1560
4 - Forêts	2158	805
6 - Zones urbaines	64	67
7 - Alluvions	1	1
8 - Cultures printemps précoces	9961	3836
Totaux :	22447	8997

La Figure 9 présente la répartition des occupations du sol obtenue après les différents traitements. C'est l'évolution des états de surface de cette couche d'informations que nous avons modélisé pour faire tourner STREAM à un pas de temps journalier au cours de la période du 1/09/96 au 31/08/97. Les développements qui ont été nécessaires pour prendre en compte l'évolution temporelle des états de surface sont expliqués dans le paragraphe 3.1.

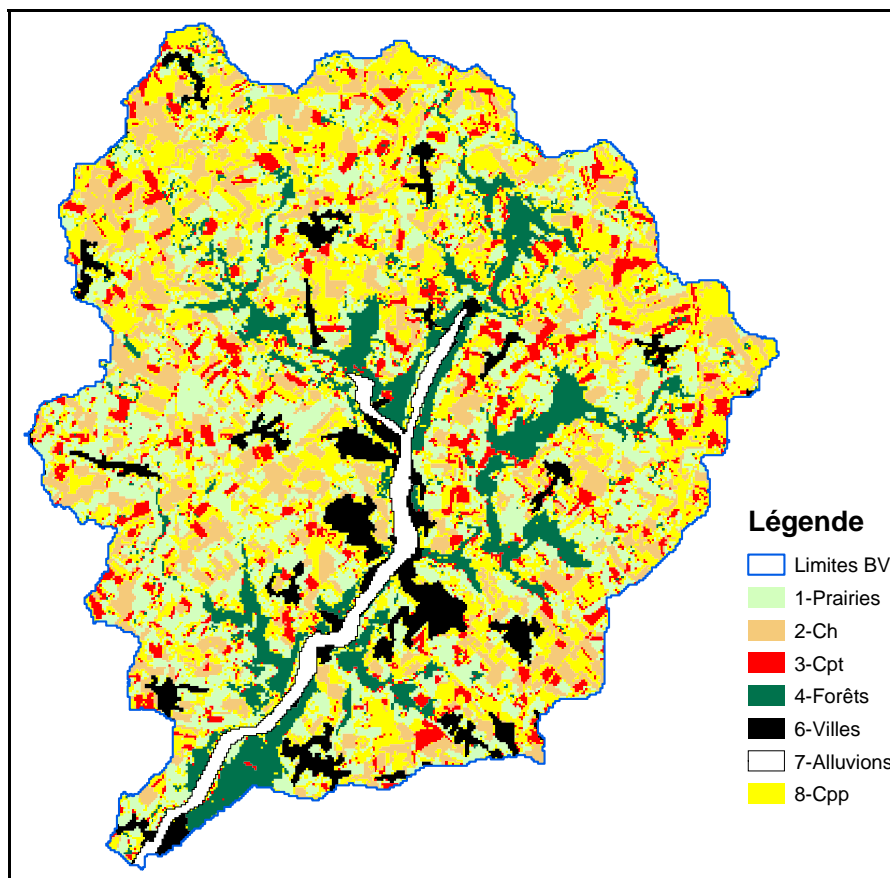


Figure 9 : Occupation du sol du bassin versant de l'Austreberthe

2.4. Données pluviométriques

Sur un bassin versant comme celui de l'Austreberthe, les phénomènes d'érosion ont majoritairement lieu sur les parcelles agricoles au moment où les pluies sont les plus intenses et lorsque les sols sont peu couverts par la végétation. Avant de servir de moyen de transport aux sédiments érodés, l'eau pluviale joue aussi un rôle dans la génération des matériaux érodés. En effet, l'impact des gouttes de pluie apporte l'énergie nécessaire au détachement des particules de sol. Mais, cette énergie cinétique des gouttes de pluie qui caractérise leur érosivité est difficile à estimer. On peut néanmoins évaluer la quantité d'énergie apportée par un événement pluvieux par la connaissance de son intensité maximale (I_{max}) et sa durée efficace ($Deff$).

La résolution spatiale et temporelle des données pluviométriques conditionne également la façon dont on peut estimer l'érosivité des événements d'une chronique de pluies. D'une part, le relief peut augmenter localement les hauteurs de précipitations, et d'autre part, la précision à laquelle on peut déterminer la durée et l'intensité d'une pluie augmente avec la fréquence des relevés pluviométriques. Cette partie s'attache donc à présenter les données pluviométriques que nous avons à disposition et les traitements que nous avons choisis de faire.

Dans le cadre du projet, trois jeux de données pluviométriques ont été acquis :

- les données horaires de la station Rouen-Boos (151 m d'altitude) située assez loin en dehors du bassin versant de l'Austreberthe,
- les données journalières de la station de Jumièges (30 m d'altitude) située à l'aval du bassin versant de l'Austreberthe,
- les données journalières de la station de Goupillières (150 m d'altitude) située à l'amont du bassin versant de l'Austreberthe, juste de l'autre côté de la crête.

2.4.1 Points forts et points faibles des données pluviométriques

Bien que la station de Goupillières soit légèrement en dehors du bassin versant de l'Austreberthe (une dizaine de kilomètres), on peut considérer que sa pluviométrie est très similaire à celle des zones amont de l'Austreberthe. Ainsi, le fait de disposer de 2 stations au sein du bassin versant d'étude permet d'appréhender correctement la pluviométrie locale. Cependant la résolution temporelle journalière est très insuffisante pour estimer la durée efficace et l'intensité maximale d'un événement pluvieux.

Par contre, la résolution horaire des données de la station de Rouen paraissait plus intéressante pour améliorer le fonctionnement de STREAM, d'où leur acquisition. Cependant, nous avons constaté que si les pluviométries des 3 stations semblent bien corrélées (Figure 10), celle de Rouen est moins contrastée et moins brutale que les deux autres, vraisemblablement parce que la station se trouve plus à l'intérieur des terres. En regardant plus en détail les chroniques de pluies, nous nous sommes également aperçus qu'en utilisant les données de Rouen, nous sous-estimerions le nombre d'événements pluvieux d'une part, et leur violence d'autre part. L'intensité des pluies étant un paramètre très sensible de STREAM, nous avons opté pour les solutions suivantes :

- les données de Jumièges et de Goupillières ont été utilisées pour les cumuls journaliers,
- les données de Rouen-Boos n'ont pas été conservées. En remplacement, un jeu de données obtenues avec un pluviomètre basculeur installé dans le bassin versant de Bourville, localisé près de Saint Valéry en Caux a été utilisé pour permettre d'estimer avec une meilleure précision l'intensité et la durée efficace des pluies.

2.4.2 Comparaison des pluviométries amont et aval de l'Austreberthe

La comparaison des pluviogrammes de Goupillières et de Jumièges montre :

- que la topographie du bassin versant induit une pluviométrie plus forte à l'amont qu'à l'aval (Figure 12 et Figure 13),
- qu'il n'y a pas de décalage temporel entre les événements pluvieux à l'amont et à l'aval du bassin versant.

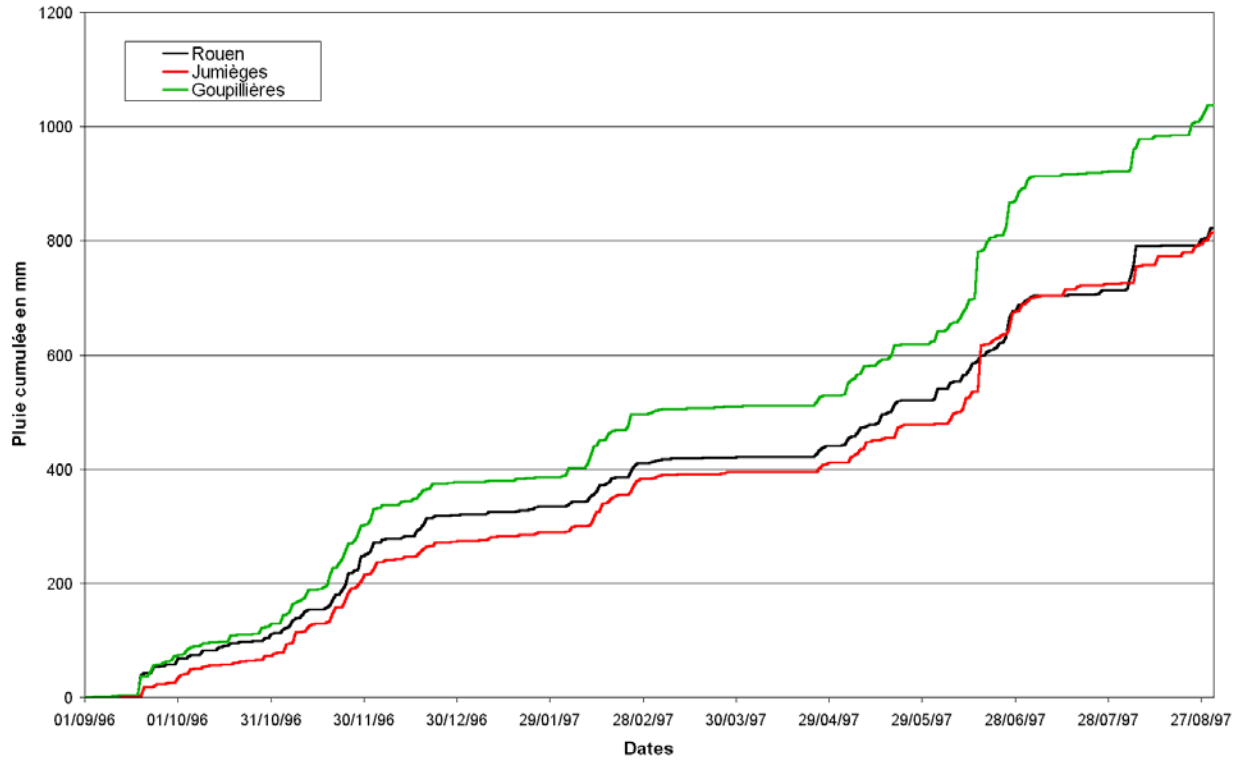


Figure 10 : Cumuls pluviométriques des stations de Rouen-Boos, Jumièges et Goupillières

Afin de tester l'existence et la constance d'un gradient de pluie entre les stations amont et aval, nous avons comparé les cumuls des 2 séries de pluies à partir du 1er septembre 1996. Le très bon alignement des points de la Figure 11 montre que les événements pluvieux de Jumièges et de Goupillières ont lieu en même temps. Le Tableau 8 donne les paramètres de la régression linéaire entre les cumuls de Jumièges et de Goupillières, si on pose l'équation :

CumulGoupillières = aCumulJumièges+b (avec a et b constantes) :

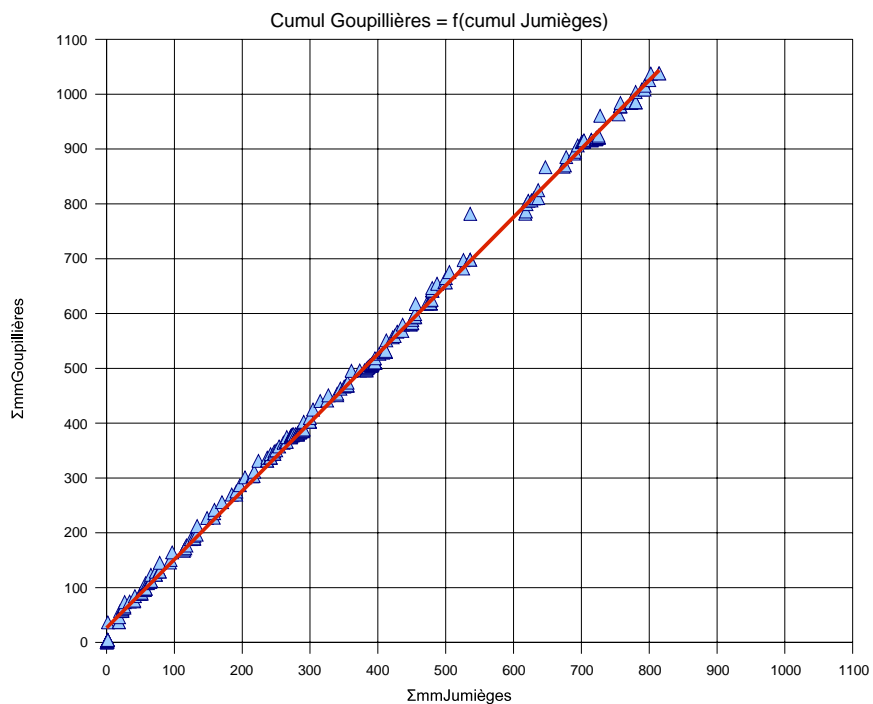


Figure 11 : Comparaison des cumuls de pluie des stations de Jumièges et Goupillières

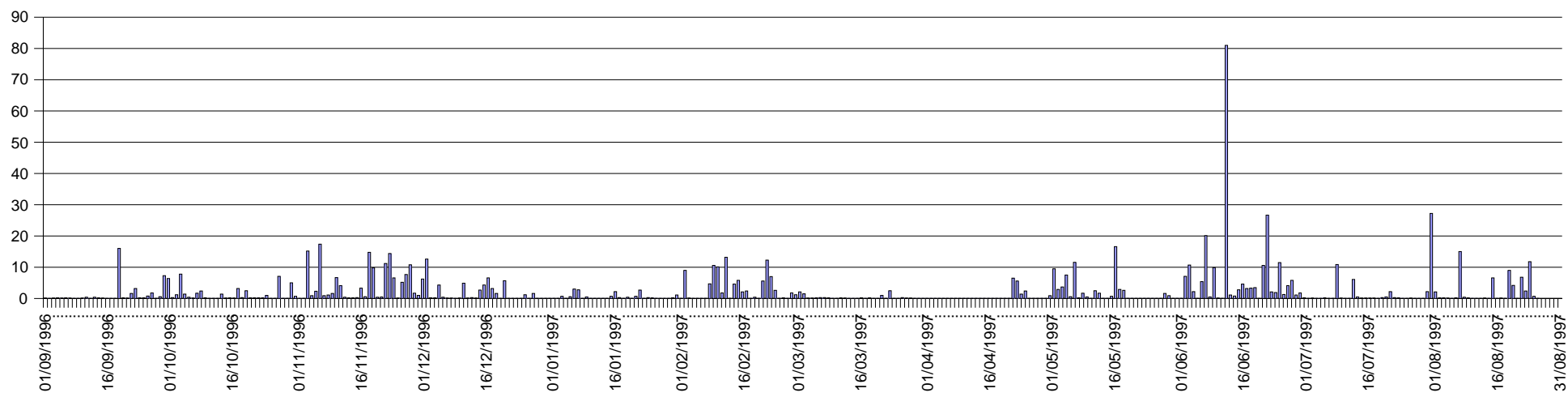


Figure 12 : Pluviogramme journalier Jumiège (Aval, altitude 30 m)

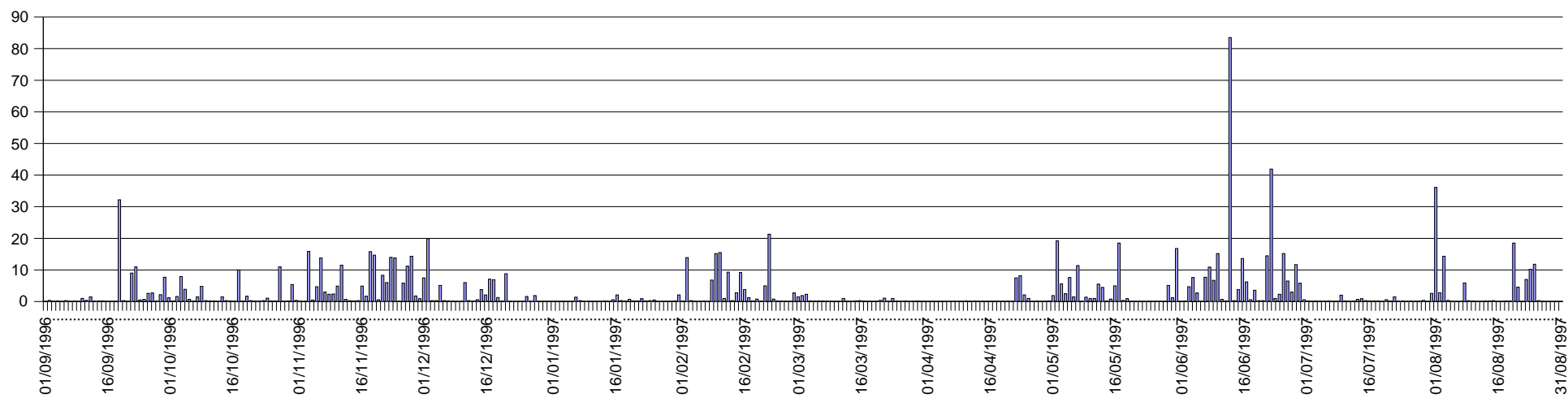


Figure 13 : Pluviogramme journalier Goupillières (Amont, altitude 151 m)

Tableau 8 : Paramètres de la régression linéaire entre les cumuls de pluies de Jumièges et de Goupillières

a	1,2479
Erreur type de la valeur de la pente	0
b	26,715
Erreur d'estimation standard de la section des coordonnées	1,1
Coefficient de détermination	1
Erreur d'estimation standard des valeurs y calculées à partir de la régression	11,26
Valeur F provenant de l'analyse de variance	240434,3
Degrés de liberté provenant de l'analyse de variance	363
Somme des écarts carrés des valeurs Y estimées par rapport à leur moyenne arithmétique	30483039,88
Somme des écarts carrés des valeurs Y estimées par rapport aux valeurs Y indiquées	46022,32

La valeur du coefficient de détermination montre effectivement que les deux pluviométries sont très corrélées. Par ailleurs, la pente de la droite de régression (coefficient a) montre qu'il pleut 25 % de plus à Goupillières qu'à Jumièges. Ces résultats corroborent l'hypothèse d'un gradient pluviométrique altitudinal ce qui nous a obligé à réaliser des développements spécifiques pour introduire dans STREAM, la possibilité de prendre en compte une pluviométrie spatialisée dépendant d'un gradient de ce type. La construction de ces développements est expliquée au paragraphe 3.2.

2.4.3 Choix des événements pluvieux donnant lieu à des simulations

Tous les événements pluvieux ne donnent pas forcément lieu à des phénomènes érosifs. Une première sélection a donc été effectuée sur la base des cumuls journaliers pour ne pas faire tourner STREAM sur des pluies dont on sait, par expérience, qu'elles ne produiront pas de ruissellement et donc pas non plus de sédiment.

Les sols agricoles étant peu couverts par la végétation en hiver, ils sont plus sensibles aux pluies qu'en été. Nous avons donc conservé seulement 128 événements pluvieux selon les seuils de cumuls journaliers suivants :

- du 1^{er} septembre au 1^{er} mars : les pluies journalières sont conservées si leur cumul est supérieur à 1,5 mm,
- du 2 mars au 31 août : les pluies journalières sont conservées si leur cumul est supérieur à 2 mm.

Ce test a été effectué sur les chroniques de Jumièges et de Goupillières et on a conservé l'événement pluvieux dès lors que le test était positif sur au moins une des 2 stations. On a ainsi sélectionné 70 « pluies d'hiver » et 58 « pluies d'été ».

L'intensité maximale et la durée efficace des pluies ont été récupérées des données du bassin de Bourville comme nous l'avons souligné précédemment avant d'être ensuite transférées aux pluies sélectionnées sur le bassin versant de l'Austreberthe. En effet, bien que située plus près des côtes dans le nord ouest du département de la Seine Maritime, la pluviométrie de la station de Bourville est assez

similaire à celle de Jumièges (Figure 4) excepté après le 16 juin où il y a un décalage en raison d'un orage très violent (80 mm en 2 heures) qui a éclaté uniquement dans la région de l'Austreberthe.

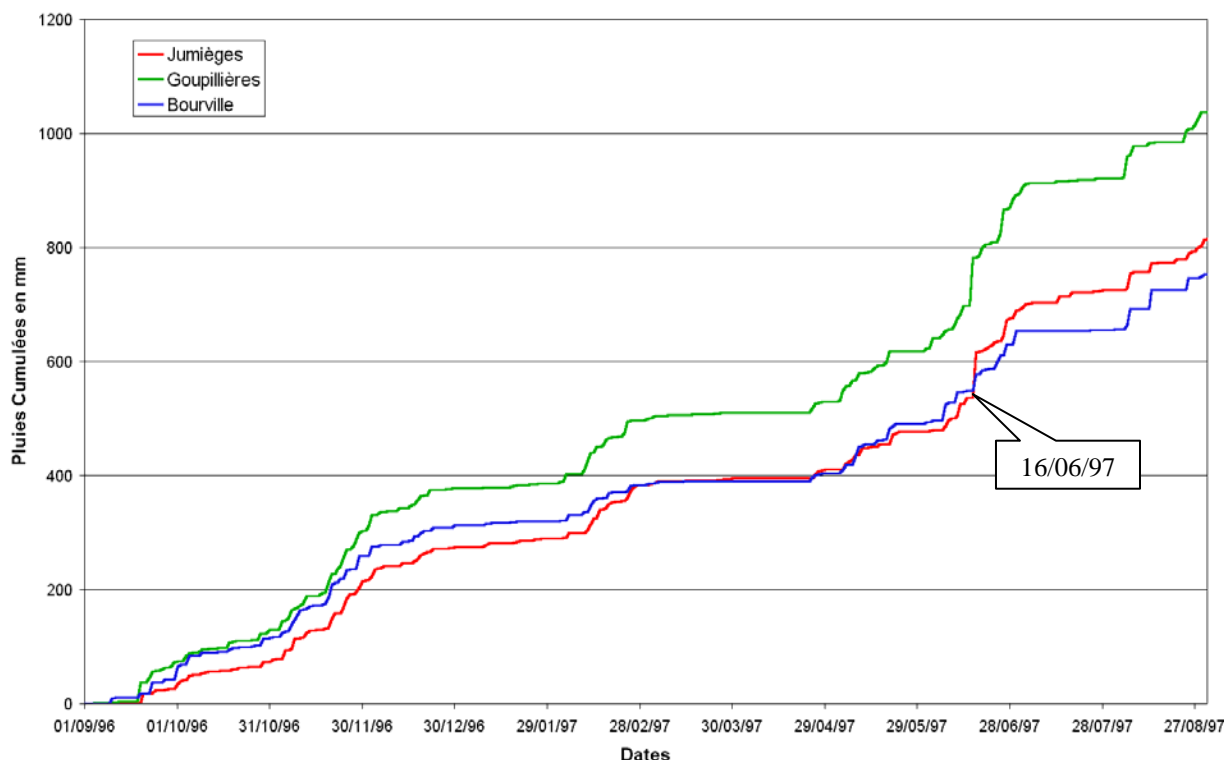


Figure 14 : Cumuls pluviométriques des stations de Blossesville, Jumièges et Goupillières

L'hypothèse la plus forte de la méthode a donc été d'attribuer les caractéristiques des pluies de Bourville aux pluies de l'Austreberthe. Nous nous sommes basés sur les cumuls de pluie pour définir 4 classes de confiance lors de l'attribution des valeurs de paramètres :

- si à la même date, une pluie de Bourville a une hauteur d'eau similaire à celle d'une pluie de l'Austreberthe, alors on estime qu'il s'agit vraisemblablement du même orage dont on peut supposer que les caractéristiques (intensité maximale et durée efficace) n'ont pas trop évolué entre Bourville et l'Austreberthe (classe de confiance 1).
- si à une même date, plusieurs pluies ont lieu sur Bourville, on choisit celle dont le cumul de pluie se rapproche le plus de la pluie de l'Austreberthe.
- si pour une pluie de l'Austreberthe, on ne trouve pas de pluie correspondante sur Bourville, on regarde de préférence :
 - le jour précédent : on a pu changer de jour le temps que l'orage aille de Bourville vers l'Austreberthe (classe de confiance 2),
 - le jour suivant : il est plus rare qu'un orage remonte de l'Austreberthe vers les côtes maritimes c'est-à-dire Bourville (classe de confiance 3),
 - le jour le plus proche où on trouve une pluie ayant un cumul similaire. C'est une méthode très arbitraire car on sait que 2 pluies de hauteur d'eau similaire peuvent avoir des intensités très différentes, et réciproquement (classe de confiance 4).

On peut considérer qu'on a moins de risque de s'être trompé pour les valeurs des paramètres des pluies de classe de confiance 1 et 2. Le Tableau 9 qui donne la répartition des 128 événements en fonction des différentes classes de confiance montre que les classes 1 et 2 représentent 69 % des pluies hivernales, et seulement 60 % des pluies estivales. Néanmoins, ce manque de précision concernant les pluies estivales est à relativiser car en été, l'érosivité des pluies est un facteur dont l'importante est moindre compte tenu du développement des couverts végétaux qui protègent les sols.

Tableau 9 : Répartition des 128 événements pluvieux simulés en fonction des classes de confiance

Classe de confiance	Hiver		Été	
	Nb de pluies	%	Nb de pluies	%
1	45	63%	29	50%
2	4	6%	6	10%
3	6	9%	75	9%
4	15	21%	18	31%
Total	70	100%	58	100%

3. Développements

3.1. Lois d'évolution des occupations du sol

Normalement, STREAM est conçu pour fonctionner à partir d'observations de terrain qui permettent d'obtenir des informations qualitatives sur l'état de dégradation des sols à travers des notations de faciès, rugosité et couvert végétal. Ensuite, ces informations sont combinées selon les règles exposées dans le Tableau 1 et le Tableau 2 afin d'obtenir pour chaque parcelle, une capacité d'infiltration et une concentration potentielle en sédiment. Dans le cadre de ce projet, où nous devons faire tourner STREAM sur une année complète sans aucun suivi de terrain, nous avons été amené à déterminer des lois d'évolution des paramètres faciès, rugosité et couvert végétal. Pour cela, nous avons procédé en plusieurs étapes.

3.1.1 Création d'une base de données

Pendant plusieurs années, l'INRA a effectué, à intervalles plus ou moins réguliers, des suivis de terrain dans plusieurs bassins versants de Haute Normandie pendant lesquels ont été relevés, pour chaque parcelle, les informations nécessaires au fonctionnement de STREAM (faciès, rugosité parallèle ou perpendiculaire au sens du travail et couvert végétal). Une base de données regroupant 1980 observations a pu être constituée à partir de différentes sources :

- Observations SADAPT Grignon : bassin de Blossville et de Fongueusemarre sur les cycles culturaux 92/93, 93, 93/94.
- Observations Science du Sol, Orléans : bassin de Blossville sur les cycles culturaux 95 et 97.
- Observations Science du Sol, Orléans : bassin de Bourville observé en 96/97, 97, 97/98, 98.

Cette base comporte les champs suivants :

- date : date de la visite de terrain.
- idsuiv : n° de suivi créé pour identifier la chronique d'évolution d'une même culture sur une même parcelle.
- tournée : n° de la visite d'un même suivi.
- datesemis : date de semis de la culture en place sur le suivi. La tournée de visites des observations SAD était complétée d'une feuille donnant les dates de semis de certaines cultures (synthèse de formulaires retournés par les exploitants agricoles). Sinon elle est estimée en fonction de l'état de dégradation du sol (en l'occurrence, le faciès), de la chronique de pluie (travaux de semis réalisables uniquement après une suite de jours sans pluie) et des itinéraires techniques communément pratiqués par les agriculteurs. Par exemple, les dates de semis de blé non renseignées ont toutes été affectées au 8 octobre 96.
- semisconnu : vaut 0 si la date de semis était connue (d'après les formulaires), ou 1 si elle a été estimée.
- cumulpluie : cumul de pluie en mm entre la date de semis et la date d'observation.
- occup : occupation du sol d'après le codage de STREAM.
- faciès : faciès du sol (Tableau 10).
- rugot : rugosité parallèle au sens du travail (Tableau 11).

- rugopt : rugosité perpendiculaire au sens du travail (Tableau 11).
- cv : couvert végétal (Tableau 12).
- bv : bassin versant où a été relevé l'observation de terrain.
- cult : type de la culture en place lors de l'observation : ch pour culture d'hiver, cpp pour culture de printemps précoce, cpt pour culture de printemps tardive.
- cycle : période de l'année concernée par la culture en place : de type 93/94 pour les cultures d'hiver, et de type 94 pour les cultures de printemps.

Tableau 10 : Description du paramètre faciès

Faciès	F0	F1		F2			
		F11	F12	F12	F2		
Aspect	Tous fragments parfaitement distincts	Fragments soudés mais contours encore reconnaissables Soudure de terre fine $\varnothing < 2$ mm	Fragments soudés, contours disparus, pas de signe de dispersion Soudure de terre fine et grossière \varnothing de 2 à 10 mm	Continuité totale de terre fine et grossière	Continuité totale de terre fine et grossière	Continuité totale avec signes de "dispersion" Apparition importante de limons et sables très fins	Croûtes de dépôts étendues et épaisses avec des dépôts noirs plus fins
Code STREAM	0	1		12		2	

Tableau 11 : Description du paramètre rugosité dans le sens du travail du sol ou perpendiculairement à ce dernier

Code STREAM	Rugosité
0	Surface très affinée ou très battue
D<1 cm	<i>Ex : semis de blé très battu, chantier de récolte</i>
1	Existence de barrages discontinus et de petits bourrelets entourant de petites dépressions
1<D<2	
2	Fort % _{age} de mottes > 2 cm
2<D<5	<i>Ex : semis de blé motteux, déchaumage à dents battu // au travail du sol</i>
3	Nombreux "massifs" entourant des dépressions
5<D<10	<i>Ex : déchaumage à dents, à socs très altéré en travers ; déchaumage peu altéré en long</i>
4	Etat très motteux, relief serré, forte discontinuité dans le sens du travail du sol
10<D<15	<i>Ex : déchaumage à socs peu altérés</i>
5	Rugosité maximale
D>15 cm	<i>Ex : état initial des labours ou des déchaumages à socs</i>

(NB : D=dénivellation)

Tableau 12 : Description du paramètre couvert végétal

CV : Taux de recouvrement	Code STREAM
0 à 20 %	1
21 à 60 %	2
61 à 100 %	3

3.1.2 Utilisation de la base pour déterminer les lois d'évolution des paramètres

Avec des requêtes SQL, nous avons pu extraire de la base tous les suivis de terrain pour lesquels nous avons, sur une même parcelle, plusieurs observations de l'évolution des états de surface au cours du temps. Sur les 560 parcelles ainsi identifiées, nous avons comptabilisé les suivis par type de culture. Le Tableau 13 montre que l'essentiel des chroniques de suivis présentes dans la base ont été effectuées sur des cultures d'hiver et notamment des blés. Les cultures de printemps précoces (lin

et pois) sont-elles aussi bien représentées mais en ce qui concerne les cultures de printemps tardives les observations sont beaucoup moins nombreuses.

Tableau 13 : Répartition des suivis par type de culture

Type d'occup	Cultures	Nb de suivis
CH	Blé	204
	Escourgeon	44
	Colza	26
CPP	Lin	97
	Pois	97
CPT	Maïs	15
	Betterave	32
	Pomme de terre	4
	Orge de printemps	13
	Avoine	1
	Fève	2
	Ray Grass à ensiler	7
	Gel	18
		Total : 560

A ce stade, nous avons effectué des extractions par cultures afin d'obtenir à partir une analyse statistique des données, les quantités d'eau nécessaires pour faire évoluer les classes des différents paramètres. Le Tableau 14 présente les résultats obtenus en ce qui concerne la culture du blé d'après les suivis réalisés en Pays de Caux. Ces valeurs ne sont donc pas transposables telles quelles à un autre contexte pédo-climatique.

Tableau 14 : Loi d'évolution des paramètres de STREAM dans le cas de la culture du blé

Cas du Blé		
Faciès	F0 → F1	28 mm
	F1 → F12	115 mm
	F12 → F2	225 mm
Rugosité parallèle au sens du travail	R2 → R1	47 mm
	R1 → R0	245 mm
Rugosité perpendiculaire au sens du travail	R3 → R2	38 mm
	R2 → R1	163 mm
	R1 → R0	248 mm

Nous avons ensuite utilisé des calendriers culturaux obtenus à partir d'enquêtes en exploitation (Joannon, 2004), pour déterminer une date de semis plausible compte tenu des chroniques pluviométriques du bassin de l'Austreberthe pendant la campagne 96-97. Ainsi, pour le blé, la date a été fixée au 8 octobre 1996 et les paramètres nécessaires à utilisation de STREAM ont été initialisés à F0R2R3². En réalité, pour des questions d'organisation du travail, les dates de semis sont normalement échelonnées sur plusieurs semaines en fonction des précédents culturaux mais aussi des variétés de blé. Par exemple, les blés implantés derrière une betterave sont généralement plus tardifs que ceux implantés derrière un colza puisque la récolte du colza est plus précoce que celle de la betterave.

² F0 pour le faciès, R2 pour la rugosité parallèle au sens du travail et R3 pour la rugosité perpendiculaire au sens du travail ce qui est une situation classique compte tenu des itinéraires techniques et du matériel des agriculteurs du Pays de Caux.

Cependant, comme nous ne disposons pas d'indication précise sur la nature des précédents cultureux, nous avons préféré fixer une seule date de semis par culture. Une fois la date de semis déterminée, nous avons utilisé les chroniques de pluie pour identifier les dates approximatives de changement de classe des paramètres. Ainsi, pour une culture de blé semée le 8 octobre 96, les données pluviométriques journalières moyennes des deux stations météo du secteur, nous indique que les 28 mm nécessaires pour faire évoluer le faciès de la classe F0 à la classe F1 (Tableau 14) ont été atteints le 27 octobre 96. Avec la même méthode, nous avons trouvé que le faciès est passé en F12, le 20 novembre 96 (après 115 mm de pluie cumulée depuis le semis) puis en F2, le 16 décembre 96 après 225 mm. Cette méthode (Figure 15) a été reproduite pour les principales occupations du sol de la base de donnée, c'est-à-dire la betterave, le maïs, le pois et le lin.

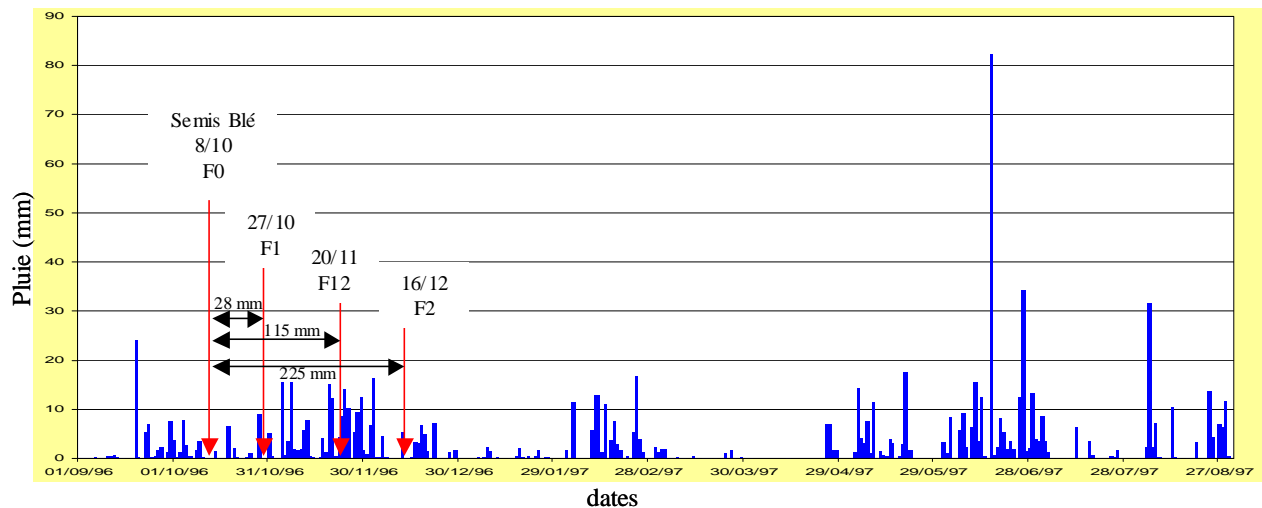


Figure 15 : Méthode pour déterminer les dates de changements du paramètre **FACIES** pour une culture de blé

3.1.3 Affectation des paramètres **STREAM** aux polygones d'occupation du sol

L'information dont nous disposons pour caractériser l'occupation du sol du bassin de l'Austreberthe ne nous permet pas de connaître exactement l'occupation du sol. Nous ne pouvons identifier que la localisation d'un ensemble de cultures (cultures d'hiver, cultures de printemps précoces ou cultures de printemps tardives). Par conséquent, nous avons utilisé les déclarations PAC des agriculteurs³ pour avoir une idée plus précises des occupation du sol cultivées par les agriculteurs exploitant des parcelles sur les communes toutes ou partiellement incluses dans le bassin versant de l'Austreberthe (Figure 16).

³ Les déclarations PAC sont issues des dossiers de demande de paiements compensatoires dans le cadre de la Politique Agricole Commune. Dans sa déclaration, l'agriculteur définit des îlots de culture (ensemble de parcelles regroupées par l'agriculteur dans une même commune). Pour chaque îlot, il déclare les surfaces de chaque culture. L'information disponible correspond à une agrégation par commune des surfaces de chaque culture de l'ensemble des îlots déclarés sur une même commune par les agriculteurs. La nomenclature utilisées détaille les cultures primées (blé, colza, tournesol, maïs, gel, lin, STH...) mais globalise les surfaces des cultures non primées (vergers, betteraves, Pomme de Terre, etc.). Ces données, dont la fréquence de mise à jour est annuelle (les données de l'année n sont disponibles à n+1), sont disponibles auprès de l'ONIC depuis 1995.

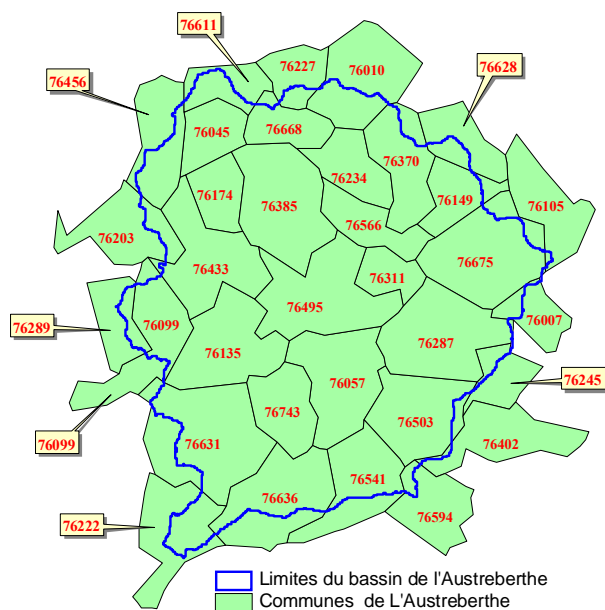


Figure 16 : Localisation des 34 communes de Seine Maritime toutes ou partiellement incluses dans le bassin de l'Austreberthe (le chiffre en rouge indique le code INSEE des communes)

La synthèse des données disponibles (Tableau 15) montre que la classe « cultures d'hiver » (CH) est majoritairement représentée par du blé à un peu plus de 70 %. Nous avons donc choisi d'affecter à tous les polygones de cultures d'hiver, les lois d'évolution des paramètres obtenues avec le blé. En ce qui concerne les cultures de printemps précoces (CPP), c'est le pois qui est le plus cultivé (68%) mais nous avons préféré affecter à tous les polygones de ce type, les lois d'évolution des paramètres obtenues avec le lin. En effet, nous avons eu beaucoup de difficultés pour trouver les lois d'évolution des paramètres sur les pois malgré le nombre assez grand de données. Le pois est une culture qui est fréquemment roulée après le semis ce qui diminue la rugosité du sol et favorise l'apparition de la battance. Or dans la base, les pois roulés et non roulés n'étaient pas distingués ce qui entraînait une variation trop importante des quantités de pluie nécessaire pour changer de classe selon les cas. Pour les cultures de printemps tardive (CPT), nous avons affecté les lois d'évolution des paramètres obtenues avec le maïs aux polygones concernés ce qui est en accord avec les statistiques d'occupation du sol des déclarations PAC où cette culture représente 51% des CPT.

Tableau 15 : Statistique d'occupation du sol d'après les déclarations PAC 1997 des agriculteurs exploitants des terres sur les 34 communes plus ou moins partiellement incluses dans le bassin étudié

Occupations du sol	Surface (ha)	%
Blé	4941	71
Autres Céréales	1476	21
Colza	565	8
Total CH	6983	100
Lin	558	32
Pois	1193	68
Total CPP	1751	100
Maïs Grain et Ensilage	1934	51
Autres Utilisations du sol	1864	49
Total CPT	3798	100

Pour les classes CH, CPP et CPT, le Tableau 16 présente les évolutions des paramètres qui ont été appliquées au cours de l'année aux différentes sortes de polygones de culture. Cependant, pour simuler une année complète entre le 1^{er} septembre 96 et le 31 août 97, nous avons aussi été amené à fixer des modes de gestion des intercultures⁴. Dans un souci de simplification, nous avons limité les possibilités en choisissant une seule interculture par classe d'occupation du sol. Pour le blé caractérisant les polygones CH, nous avons considéré qu'entre le 1^{er} septembre 96 et le 8 octobre 96 (date de semis du blé), les polygones CH étaient occupées par des chantiers de récolte de pois. Après la récolte du blé estimé au 17 août 97, nous avons gardé un chantier de récolte de blé. Pour les cultures de printemps précoces et tardives, nous avons considéré qu'entre le 1^{er} septembre 96 et les dates d'intervention des agriculteurs pour préparer l'implantation des cultures de printemps (lin et maïs), les polygones CPP et CPT étaient occupées par des chantiers de récolte de blé qui ne se distinguent que par le pourcentage de couvert végétal. En effet, en vu d'implanter un lin, les agriculteurs pour éviter des accidents structuraux préfèrent exporter les pailles de blé ce qui se traduit par une note de couvert végétal moins élevée, 2 au lieu de 3, puisqu'il y a moins de résidus de récolte en surface. L'autre différence réside dans la présence d'un labour d'hiver avant implantation du lin alors que pour le maïs, le labour est effectué juste avant le semis. Les évolutions des paramètres pour les différents chantiers et le labour ont été déterminées à dire d'expert.

En ce qui concerne les autres classes d'occupation du sol telles que les prairies, les forêts, les alluvions et les zones urbaines, nous n'avons pas cherché à modéliser l'évolution des paramètres, faciès, rugosité et couvert végétal. Nous avons fixé directement une capacité d'infiltration identique tout au long de la campagne culturale en fonction de notre connaissance du comportement de ces occupations du sol. Les capacités d'infiltration ont été fixées à 50 mmh⁻¹ pour les polygones de prairies et de forêt, à 20 mmh⁻¹ pour le polygone d'alluvions et à 2 mmh⁻¹ pour les polygones des zones urbaines.

Tableau 16 : Evolution des états de surface au cours de l'année

	Culture d'hiver					Culture de printemps précoce					Culture de printemps tardive				
	Occup	Faciès	Rugot	Rugopt	CV	Occup	Faciès	Rugot	Rugopt	CV	Occup	Faciès	Rugot	Rugopt	CV
01/09/96	32	2	0	0	1	30	2	0	0	2	30	2	0	0	3
08/10/96	7	0	2	2	1	30	2	0	0	2	30	2	0	0	3
27/10/96	7	1	1	2	1	30	2	0	0	2	30	2	0	0	3
20/11/96	7	12	1	1	1	30	2	0	0	2	30	2	0	0	3
16/12/96	7	2	0	0	1	30	2	0	0	2	30	2	0	0	3
30/01/97	7	2	0	0	1	24	0	4	4	1	30	2	0	0	3
01/03/97	7	2	0	0	2	24	1	3	3	1	30	2	0	0	3
13/03/97	7	2	0	0	2	3	0	1	2	1	30	2	0	0	3
15/04/97	7	2	0	0	3	3	0	1	2	1	1	0	2	2	1
25/04/97	7	2	0	0	3	3	1	1	1	2	1	0	2	2	1
15/05/97	7	2	0	0	3	3	12	0	1	3	1	0	2	2	1
11/06/97	7	2	0	0	3	3	12	0	1	3	1	1	1	1	1
16/06/97	7	2	0	0	3	3	2	0	0	3	1	2	0	0	2
17/08/97	30	2	0	0	2	3	2	0	0	3	1	2	0	0	3

Les valeurs des colonnes faciès, rugot, rugopt et cv se rapportent aux descriptions des tableaux 10, 11 et 12. Les codes de la colonne Occup sont : 1 maïs, 3 lin, 7 blé, 24 labour, 30 chantier de récolte de blé et 32 chantier de récolte de pois.

3.2. Gradient de pluie

La comparaison des cumuls pluviométriques journaliers de Jumièges et de Goupillières a montré une très forte corrélation des hauteurs de pluie qui tombent à l'aval et à l'amont du bassin versant de l'Austreberthe. STREAM ayant été conçu pour l'utilisation, le traitement et la restitution de données environnementales spatialisées, nous avons construit en continuité avec cette approche un

⁴ L'interculture est la période qui est comprise entre la récolte d'une culture et le semis de la culture suivante sur une même parcelle.

gradient pluviométrique altitudinal pour spatialiser l'information pluviométrique sur l'étendue du bassin versant à partir du MNT.

3.2.1 Principe

On peut exprimer la pluie en fonction de l'altitude z (valeur de l'altitude d'un point du MNT) selon la fonction affine de suivante :

$$\text{Pluie}(z) = \text{PluieGlob} + z \cdot \text{PluieAlt} \quad (\text{équation 1})$$

Où PluieGlob est la partie de la pluie uniformément répartie sur le bassin versant, et PluieAlt la pluie directement proportionnelle à l'altitude.

Pour un événement pluvieux i , l'équation 1 devient donc :

$$\text{Pluie}_i(z) = \text{PluieGlob}_i + z \cdot \text{PluieAlt}_i$$

3.2.2 Application au bassin de l'Austreberthe

Connaissant les altitudes des stations météorologiques de Jumièges ($\text{AltJumièges}=30$ m) et de Goupillières ($\text{AltGoupillières}=150$ m), on peut (pour une pluie i) construire la droite suivante, de laquelle on peut déduire les paramètres PluieGlob_i et PluieAlt_i (Figure 17) :

En effet, on a alors :

$$\text{PluieAlt}_i = (\text{PluieGoupillières}_i - \text{PluieJumièges}_i) / (\text{AltGoupillières} - \text{AltJumièges})$$

(il faut $\text{AltGoupillières} \neq \text{AltJumièges}$)

$$\text{PluieGlob}_i = \text{PluieGoupillières}_i - \text{PluieAlt}_i \cdot \text{AltGoupillières}$$

ou $\text{PluieGlob}_i = \text{PluieJumièges}_i - \text{PluieAlt}_i \cdot \text{AltJumièges}$

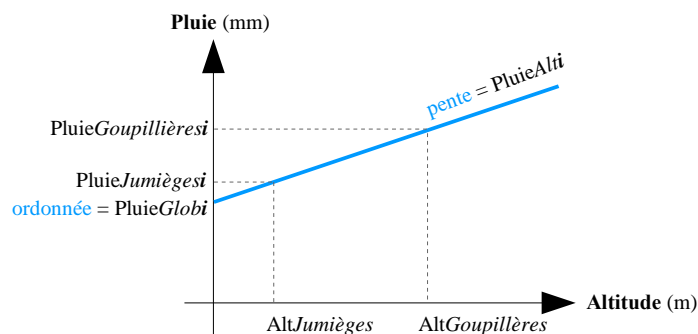


Figure 17 : Détermination des paramètres PluieGlob_i et PluieAlt_i

Étant donné que les points extrêmes du bassin versant de l'Austreberthe sont à 4 m et 180 m d'altitude et que le gradient pluviométrique est construit linéairement à partir des données de stations situées à 30 et 50 m d'altitude, on convertit automatiquement les éventuelles hauteurs de pluie négatives à 0. Cette méthode de calcul du gradient pluviométrique altitudinal rend bien compte de la différence de pluviométrie entre Jumièges et Goupillières. En effet, le rapport n'est pas toujours de 1,25 et parfois il pleut plus à Jumièges qu'à Goupillières.

Afin de faciliter la génération automatique des rasters « pluie distribuée », un module développé sous Visual Basic pour Application a été développé (Figure 18). Ce module permet en plus de structurer automatiquement les informations sur les événements pluvieux dans un format directement compatible avec l'utilisation de STREAM.

Figure 18 : Boite de dialogue du module formPluieDistr

4. Résultats

L'ensemble des résultats obtenus pour les 128 événements pluvieux simulés est rassemblé dans un fichier informatique. Le Tableau 17 est un extrait du fichier complet qui a été communiqué à l'équipe développant SENEQUE afin de prendre en compte les quantités de terre produites et exportées en chaque point du réseau hydrographique. Nous n'y avons fait figurer que les résultats obtenus pour 4 événements pluvieux différents afin de montrer que les quantités de ruissellement et les pertes en terre varient pour un même événement pluvieux selon la position des points de mesures dans le réseau hydrographique.

Par ailleurs, l'analyse de l'ensemble du fichier a montré que sur les 128 événements pluvieux simulés, 30 événements pluvieux n'ont occasionné aucun ruissellement et aucune perte en terre. De plus, 51 événements ayant généré peu de ruissellement n'ont pas non plus occasionné de perte en terre. Au final, nous n'avons que 47 événements pluvieux au cours de l'année culturale 96-97 qui ont généré des pertes en terre sur au moins un des 24 points de mesure.

Pour chaque point de mesure, il est possible de visualiser comme sur la Figure 19, les quantités de ruissellement ayant transité par l'exutoire du sous-bassin versant alimentant ce point. Dans cet exemple, on peut voir que la plupart des événements pluvieux a généré moins de 10000 m³ au point numéro 12. Seul 4 événements ont généré des ruissellements très supérieurs à ce seuil. Il s'agit des événements pluvieux du 19/09/96 ; du 16/06/97, du 26/06/97 et 05/08/97. Les quantités de ruissellement obtenues avec l'événement du 16/06/97 sont nettement plus importantes (70000 m³) que celles obtenues avec les autres événements pluvieux et cela d'ailleurs quelque soit le point de mesure considéré. Ceci s'explique par le caractère exceptionnel de l'événement pluvieux en question non seulement en terme de quantité d'eau tombée (environ 80 mm) mais aussi en terme d'intensité et de durée de l'événement. Cet orage très violent a d'ailleurs été à l'origine d'une coulée boueuse meurtrière.

Au cours du processus de simulation, le modèle STREAM génère automatiquement un certain nombre de cartes qui permettent de visualiser pour chaque événement pluvieux, l'accumulation des flux et la masse de terre accumulée par érosion diffuse en tout point du bassin versant. Nous avons inséré dans ce rapport deux séries de cartes afin de montrer que la répartition spatiale de l'accumulation des flux (Figure 20 et Figure 21) et celle de la masse de terre accumulée par érosion diffuse (Figure 22 et Figure 23) diffère en fonction des événements pluvieux simulés.

*Tableau 17 : Extrait des données fournies pour l'Applicatif SENECA
en chaque point de mesure et pour chaque jour de la période de simulation*

ID_BV	RU_23	ED_23	RU_34	ED_34	RU_339	ED_339	RU_346	ED_346
1	41693	121.22	383	0.13	312737	1504.02	674	0.02
2	41067	120.28	0	0.00	317244	1511.14	176	0.02
3	39799	117.03	0	0.00	318366	1516.91	0	0.00
4	38761	114.09	0	0.00	318060	1515.37	0	0.00
5	37821	111.43	0	0.00	317517	1512.66	0	0.00
7	61761	191.92	9209	31.41	379058	1757.43	9	0.04
8	60795	188.52	8113	27.37	380878	1766.83	12	0.06
9	59665	184.83	6847	23.01	384089	1773.28	84	0.42
10	57772	178.87	4738	15.86	403191	1869.60	0	0.00
11	57273	176.80	4369	13.53	408728	1878.86	1236	1.41
12	60493	178.72	7076	14.96	430581	1898.66	5130	2.00
13	98112	289.33	7218	14.99	749102	3410.97	5483	2.19
14	96388	283.97	5360	11.07	754200	3418.02	4848	1.87
15	95515	281.70	4314	9.35	760170	3428.80	4807	1.70
16	128470	364.32	8039	9.72	1235927	5401.45	14119	4.26
17	127242	363.44	6816	8.90	1237785	5405.55	13787	4.16
18	126005	362.55	5714	7.95	1250199	5443.37	14201	4.71
19	125080	361.61	5368	7.23	1359941	5836.73	15336	5.93
20	123817	357.89	4143	4.70	1359027	5834.59	14803	5.56
21	122622	354.37	2995	2.33	1640833	7073.44	14585	4.83
22	121303	350.49	1626	0.82	1645991	7072.63	14496	4.72
23	120223	347.30	637	0.08	1645424	7070.17	14219	5.14
24	119238	344.40	0	0.00	1648887	7087.53	13909	4.47
25	117735	339.97	10	0.02	1650900	7088.77	14395	4.17
26	116518	336.39	0	0.00	1657040	7090.77	17439	4.39
27	116029	334.95	0	0.00	1656933	7090.62	17339	4.24

*Avec RU : ruissellement en m3, ED : érosion diffuse en tonne,
le chiffre indique le numéro d'événement pluvieux.*

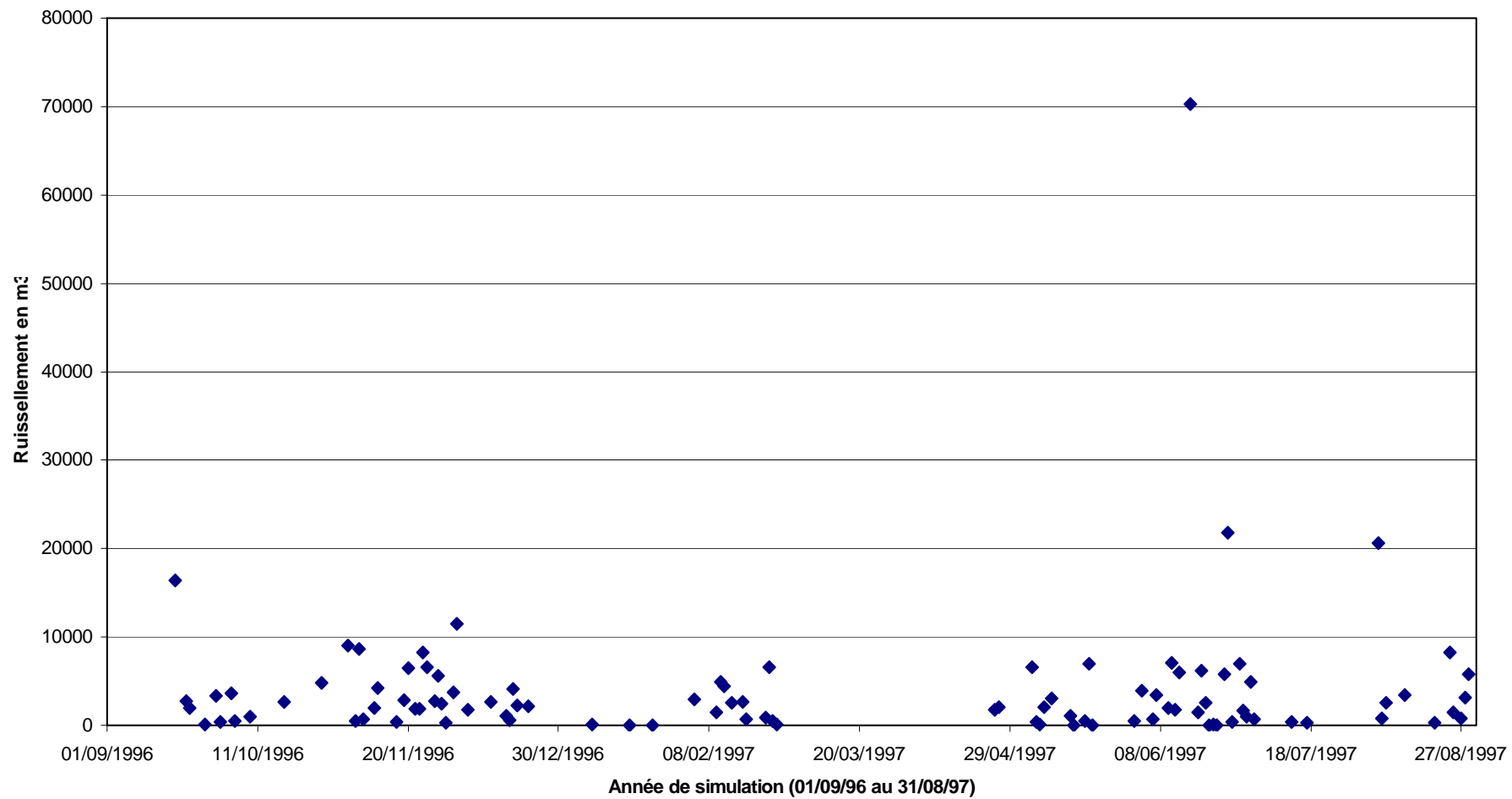


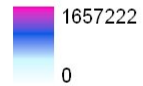
Figure 19 : Evolution au cours du temps du ruissellement (en m³) transitant par le point n°12

Stream

Légende

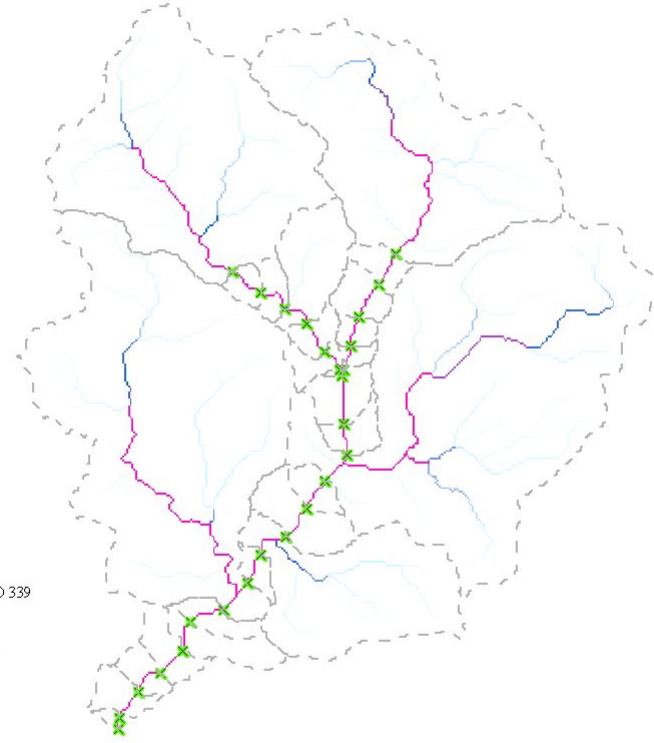
- limite de bassin versant
- ✕ point de mesure

Volume d'eau accumulé en mètres cube (339)



Bassin versant de l'Autreberthe

Relevé du 16/06/1997



PARAMETRES DE LA SIMULATION NUMERO 339

Evènement pluvieux du 05/08/1997
Hauteur de la pluie comprise entre 25.3 et 38.3 mm
Durée efficace de l'évènement de 1.88 heure(s)
Hauteur de la pluie antécédente de 2.77 mm
Intensité maximale de la pluie de 79 mm/h

Orientation d'écoulement topographique
Règles de ruissellement I.N.R.A. validées pour les sols limoneux du Pays de Caux
Règles d'érosion diffuse I.N.R.A. validées pour les sols limoneux du Pays de Caux



Modèle de ruissellement et d'érosion STREAM version 3.0 du 26/04/2004
Copyright © 2004 INRA 1994-2004. Tous droits réservés.

©INRA Orléans, Unité de Science du Sol - Date: 12/01/2005 10:05:03 - Utilisateur: couturie - Logiciel: ESRI® ArcGIS/ArcMap

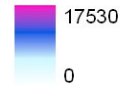
Figure 20 : Accumulation des flux d'eau calculée pour l'évènement pluvieux du 5 août 1997

Stream

Légende

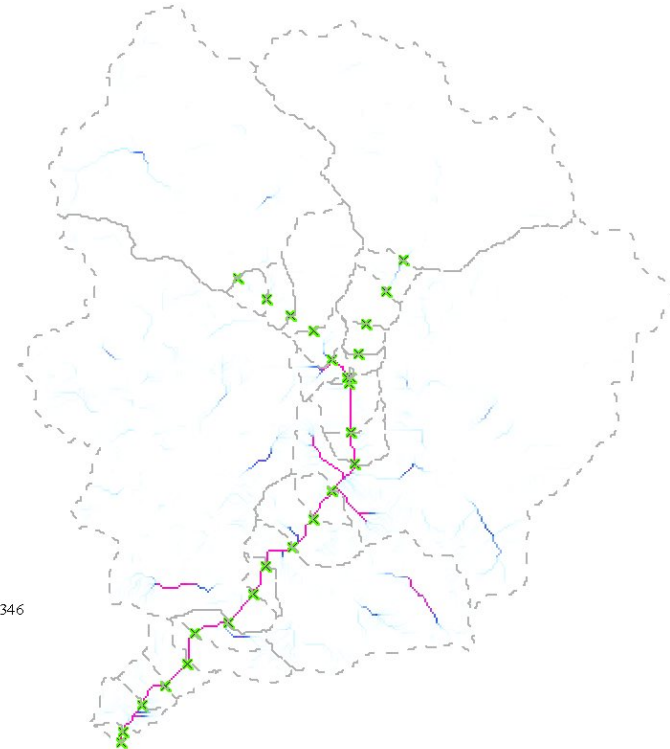
- limite de bassin versant
- ✕ point de mesure

Volume d'eau accumulé en mètres cube (346)



Bassin versant de l'Autreberthe

Relevé du 16/06/1997



PARAMETRES DE LA SIMULATION NUMERO 346

Evènement pluvieux du 12/08/1997
Hauteur de la pluie comprise entre 3.6 et 17 mm
Durée efficace de l'évènement de 0.85 heure(s)
Hauteur de la pluie antécédente de 6.93 mm
Intensité maximale de la pluie de 68 mm/h

Orientation d'écoulement topographique
Règles de ruissellement I.N.R.A. validées pour les sols limoneux du Pays de Caux
Règles d'érosion diffuse I.N.R.A. validées pour les sols limoneux du Pays de Caux



Modèle de ruissellement et d'érosion STREAM version 3.0 du 26/04/2004
Copyright © 2004 INRA 1994-2004. Tous droits réservés.

©INRA Orléans, Unité de Science du Sol - Date: 12/01/2005 10:05:03 - Utilisateur: couture - Logiciel: ESRI® ArcGIS/ArcMap

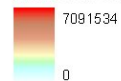
Figure 21 : Accumulation des flux d'eau calculée pour l'évènement pluvieux du 12 août 1997

Stream

Légende

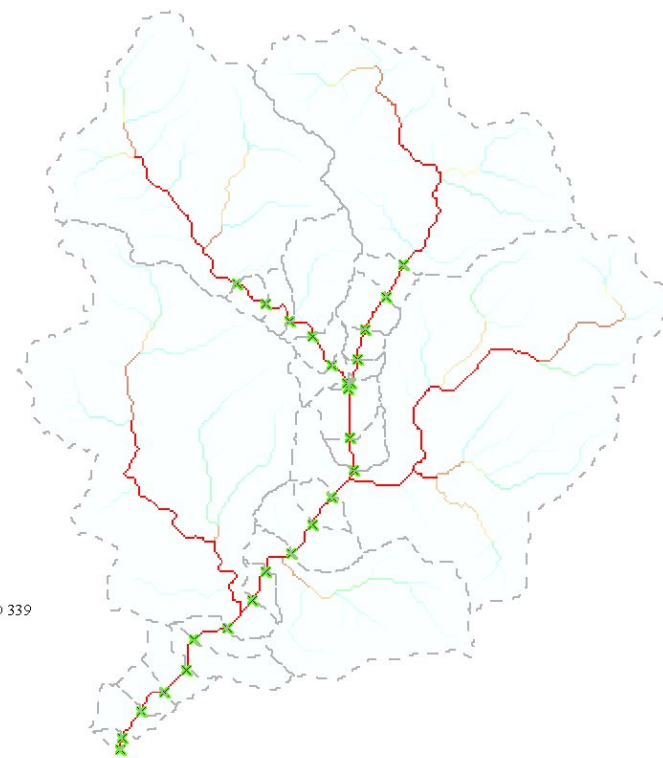
- limite de bassin versant
- ✕ point de mesure

Masse de terre accumulée par érosion diffuse en kg (339)



Bassin versant de l'Autreberthe

Relevé du 16/06/1997



PARAMETRES DE LA SIMULATION NUMERO 339

Evènement pluvieux du 05/08/1997
Hauteur de la pluie comprise entre 25.3 et 38.3 mm
Durée efficace de l'évènement de 1.88 heure(s)
Hauteur de la pluie antécédente de 2.77 mm
Intensité maximale de la pluie de 79 mm/h

Orientation d'écoulement topographique
Règles de ruissellement I.N.R.A. validées pour les sols limoneux du Pays de Caux
Règles d'érosion diffuse I.N.R.A. validées pour les sols limoneux du Pays de Caux



Modèle de ruissellement et d'érosion STREAM version 3.0 du 26/04/2004
Copyright © 2004 INRA 1994-2004. Tous droits réservés.

©INRA Orléans, Unité de Science du Sol - Date: 19/11/2004 16:34:30 - Utilisateur: couturie - Logiciel: ESRI® ArcGIS/ArcMap

Figure 22 : Masse de terre accumulée par érosion diffuse calculée pour l'évènement pluvieux du 5 août 1997

Stream

Légende

— limite de bassin versant

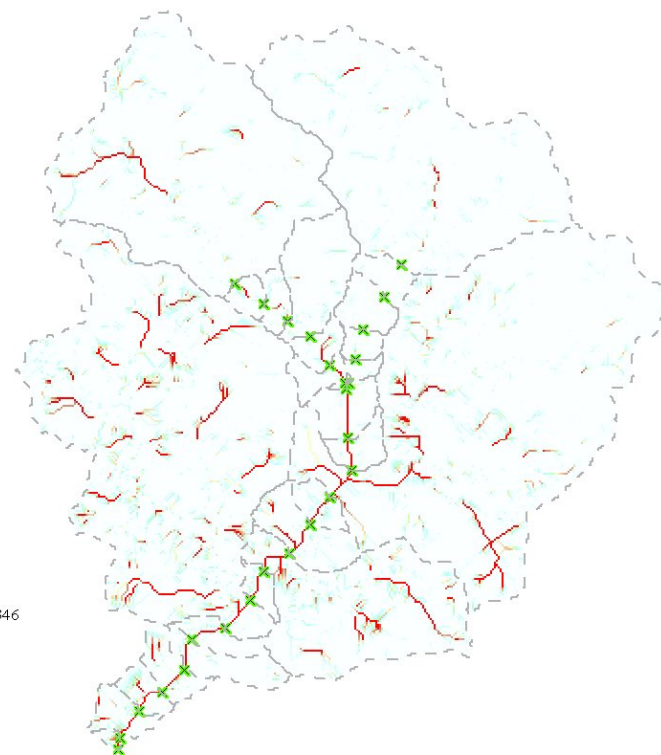
✕ point de mesure

Masse de terre accumulée par érosion diffuse en kg (346)



Bassin versant de l'Autreberthe

Relevé du 16/06/1997



PARAMETRES DE LA SIMULATION NUMERO 346

Evènement pluvieux du 12/08/1997
Hauteur de la pluie comprise entre 3.6 et 17 mm
Durée efficace de l'évènement de 0.85 heure(s)
Hauteur de la pluie antécédente de 6.93 mm
Intensité maximale de la pluie de 66 mm/h

Orientation d'écoulement topographique
Règles de ruissellement I.N.R.A. validées pour les sols limoneux du Pays de Caux
Règles d'érosion diffuse I.N.R.A. validées pour les sols limoneux du Pays de Caux



Modèle de ruissellement et d'érosion STREAM version 3.0 du 26/04/2004
Copyright © 2004 INRA 1994-2004. Tous droits réservés.

©INRA Orléans, Unité de Science du Sol - Date: 19/11/2004 16:34:30 - Utilisateur: couturie - Logiciel: ESRI® ArcGIS/ArcMap

Figure 23 : Masse de terre accumulée par érosion diffuse calculée pour l'évènement pluvieux du 12 août 1997

5. Conclusion

Le passage d'une modélisation du ruissellement et de l'érosion pour des événements pluvieux à l'échelle de petits bassins versants amonts à une modélisation du fonctionnement érosif sur une année culturale pour un bassin versant de 215 km² a été effectué de manière opérationnelle sur un cas réel.

Les principaux blocages et enjeux scientifiques soulevés par cette modification tournent autour de la disponibilité des données d'entrée qui permettent de caractériser l'hétérogénéité spatiale parcellaire et intra parcellaire à l'échelle de grand bassin versant ainsi que la détermination des dynamiques temporelles d'évolution des états de surface au sein d'une saison culturale.

Pour déterminer les conditions initiales au début de la saison culturale, nous nous sommes basés sur plusieurs bases de données existantes :

- Classification bidate spot complétée avec des données extraites de Corine Land Cover,
- Une base de données INRA regroupant 1980 observations d'état de surface du sol acquises sur plusieurs sites du Pays de Caux entre 92 et 98.
- Les déclarations PAC des agriculteurs pour l'année 1997.

Nous avons ensuite modélisé l'évolution des paramètres d'état de surface du sol à partir des références expérimentales acquises dans le cadre de campagne de terrain, d'expériences au laboratoire et d'enquêtes auprès des agriculteurs.

La partie la plus délicate a concerné l'obtention des données pluviométriques, étant donné que nous avons travaillé sur une campagne culturale historique (96-97). Il n'a pas été possible de commander des données météorologiques à un pas de temps plus fin que celui de la journée ce qui a entraîné un certain degré d'incertitude.

Néanmoins, la campagne culturale 96-97 a pu être modélisée de manière effective sur tout le bassin versant de l'Austreberthe et les données de volume ruisselé et de concentration en matière solide ont été fournies à l'Applicatif SENECAM. Les prochains travaux envisagés consisteront en une étude de sensibilité de l'apport de ce couplage entre STREAM et SENEQUE à l'aide de données de validation qui seraient éventuellement disponibles sur l'Austreberthe. La méthode mise au point dans le cadre de cette action peut évidemment être appliquée sur d'autres bassins versants de la zone loessique du nord ouest de l'Europe et pour une autre année culturale. En ce qui concerne son utilisation dans d'autres contextes, elle ne peut être utilisée qu'à condition de disposer de données permettant de décrire la variabilité spatiale et les propriétés hydraulique de la couverture pédologique.

6. Bibliographie

- Baghdadi N, King C, Bourguignon A. 1999. Potential of ERS and Radarsat images for assessing surface roughness of bare soils. *GEOFAN Symposium on geophysics of surficial formations*, September 1999, 177-184.
- Blanchard, E., King, C., Le Bissonnais, Y., Bourguignon, A., Desprats, J-F., Maurizot, P. and Souchère, V., 1999. Paramétrisation du potentiel de ruissellement des bassins versants au moyen de la Télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques : Application à des bassins versants du Pays de Caux. *Etude et Gestion des Sols*, **6** (3), 181-199.
- Boiffin J., Papy F., Eimberck M., 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I - Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, **8**, 663-673.
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., Saby N., 2002a. Modelling interrill erosion in small cultivated catchments. *Hydrological Processes*, **16** (16), 3215-3226.
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Souchère V., Martin P., Lecomte V., 2002b. Sediment concentration in interrill flow: interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*, **27** (2), 193-205.

- Cerdan O., Souchère V., Lecomte V., Couturier A., Le Bissonnais Y., 2002c. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model : STREAM (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management). *Catena*, **46**, 189-205.
- Gallien E., Le Bissonnais Y., Eimberck M., Benkhadra H., Ligneau L., Ouvry J.F., Martin P., 1995. Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol limoneux cultivé. *Cahiers Agricultures*, **4**, 171-83.
- King, D. et Le Bissonnais, Y., 1992. Rôle des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **78** (6): 91-105.
- Le Bissonnais, Y., Cerdan, O., Lecomte, V., Benkhadra, H., Souchère, V., Martin, P., accepter. Variability of soil surface characteristics influencing interrill erosion processes in cultivated catchments. *Catena*, pp. 10.
- Le Bissonnais, Y., Singer, M.J., 1992. Crusting, runoff and erosion response to soil water content and successive rainfalls. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **56**, 1898-1903.
- Ludwig, B., Auzet, A.V., Boiffin, J., Papy, F., King, D. et 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.
- Ouvry, J.F., 1992. L'évolution de la grande culture et l'érosion des terres dans le Pays de Caux. *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, **2**, 107-113.
- Souadi T, King C, Le Bissonnais Y, Bourguignon A, Souchère V, Denis L, Lecour A, Maurizot R. 2000. Atlas régional de l'Aléa érosion en Haute Normandie. BRGM Report RP50454-FR.
- Souchère V., Cerdan O., Ludwig B., Le Bissonnais Y., Couturier A., Papy F., 2003. Modelling ephemeral gully erosion in small cultivated catchments. *Catena*, **50** (2-4), 489-505.
- Souchere V., King D., Daroussin J., Papy F., Capillon A., 1998. Effect of tillage on runoff directions : consequences on runoff contributing area within agricultural catchments. *Journal of Hydrology*, **206**, 256-267.