



**VALORISATION D'UN MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN HAUTE RESOLUTION
POUR LA MODELISATION DES TRANSFERTS DANS UN PETIT BASSIN VERSANT**

ANNE JACOD

Rapport de stage soutenu le 16 septembre 2008 en vue de l'obtention du

**Master 2
Mention Géosciences, Environnement, Risques
Spécialité « Risques Technologiques et Naturels »
Parcours « Risques Naturels »
ULP – UHA – ENGEES**

Structure d'accueil : Conseil Général du Haut-Rhin / ARAA

Correspondant universitaire : Prof. Dr. A.-V. AUZET (ULP)

Maître de stage : Dr. N. KREIS (CG 68)

Dr. P. VAN DIJK (ARAA)

Membres du jury : Prof. Dr. M. GRANET (EOST)

Prof. Dr. A.-V. AUZET (ULP)



**VALORISATION D'UN MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN HAUTE RESOLUTION
POUR LA MODELISATION DES TRANSFERTS DANS UN PETIT BASSIN VERSANT**

ANNE JACOD

Rapport de stage soutenu le 16 septembre 2008 en vue de l'obtention du

**Master 2
Mention Géosciences, Environnement, Risques
Spécialité « Risques Technologiques et Naturels »
Parcours « Risques Naturels »
ULP – UHA – ENGEES**

Structure d'accueil : Conseil Général du Haut-Rhin / ARAA

Correspondant universitaire : Prof. Dr. A.-V. AUZET (ULP)

Maître de stage : Dr. N. KREIS (CG 68)

Dr. P. VAN DIJK (ARAA)

Membres du jury : Prof. Dr. M. GRANET (EOST)

Prof. Dr. A.-V. AUZET (ULP)

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ici, les contributions de chacun, d'ordre administratif, d'encadrement ou d'encouragement à mener jusqu'au bout ce projet fou d'obtention d'un master de front avec une vie active déjà bien remplie et une vie privée à géographie fortement contrainte.

Mon engagement dans ce parcours a été entier, sans quoi je n'aurais pu faire face à la mobilisation d'énergie physique et morale que cela m'a demandé.

Je remercie mon chef de service Nicolas KREIS pour avoir validé ma demande de formation continue, et pour ses conseils techniques avisés lors de ce parcours.

Je tiens à remercier Anne-Véronique AUZET, qui a dès le début eu confiance en mes capacités à mener à bien ce parcours diplômant malgré mes contraintes professionnelles fortes. Ses conseils, le suivi pédagogique et les contacts dont elle m'a fait profiter, m'ont grandement aidée tout au long de ce parcours.

Je tiens à saluer ici Paul VAN DIJK, dont l'optimisme et l'énergie joyeuse à trouver une solution rigoureuse à toute question, sans jamais se départir de son humour, sont admirables. J'ai beaucoup apprécié sa capacité à entendre et à discuter objectivement des points de vue différents.

L'appréciation des paramètres « sol » n'aurait pu se faire sans la contribution pédagogique dynamique de Joëlle SAUTER.

Enfin, je remercie également ma moitié, qui a accepté de ne pas me voir de nombreux week-ends en plus de la semaine afin de me laisser travailler sereinement. Ce parcours a été une dépense d'énergie considérable pendant deux ans, mais répond à une attente ancienne et essentielle de ma part afin d'ouvrir mes compétences à d'autres métiers.

"Il faut toujours viser la lune, car même en cas d'échec, on atterrit dans les étoiles."

O. Wilde

Sommaire

SOMMAIRE	6
LISTE DES FIGURES	8
LISTE DES TABLEAUX.....	8
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES :.....	9
1. CONTEXTE, PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS.....	12
1.1 L'érosion hydrique, un contexte multi-acteur.....	12
1.2 Problématique :.....	13
1.3 Objectifs.....	13
2. RUISSELLEMENT ET EROSION : PROCESSUS, MODELES, ET MESURES PREVENTIVES.....	14
2.1 Processus de formation et de transfert du ruissellement de surface dans un bassin versant.....	14
2.1.1 La formation du ruissellement sur les versants	14
2.1.2 Le transfert de surface : les chemins de l'eau	15
2.2 Modélisation des processus :.....	16
2.2.1 La modélisation des chemins de l'eau suivant la topographie	16
2.2.2 La modélisation des chemins de l'eau en tenant compte des motifs agraires et de la topographie (Tillage Controlled Runoff Pattern).....	16
2.2.3 Délimitation du bassin versant et calcul des surfaces contributives.....	18
2.3 Les mesures contre l'érosion hydrique dans un bassin versant.....	19
2.3.1 Les mesures sur les surfaces	19
2.3.2 Les mesures sur les chemins de l'eau.....	19
3. DONNEES ET METHODOLOGIE	20
3.1 Données disponibles.....	20
3.1.1 Site d'étude :.....	20
3.1.2 Données disponibles	21
3.1.3 Outils.....	22
3.2 Méthodologie développée pour la détermination des chemins de l'eau	23
3.2.1 Création d'un jeu de données topographiques	23
3.2.2 Réalisation du parcellaire.....	24
3.2.3 Modélisation des chemins de l'eau	24
3.3 Méthodologie de modélisation de l'érosion hydrique : le modèle LISEM	25
4. RESULTATS ET DISCUSSION	27

4.1	Validation et analyse de sensibilité.....	27
4.1.1	Validation spatiale des chemins de l'eau	27
4.1.2	Analyse de la sensibilité du modèle TCRP au paramètre rugosité orientée	33
4.1.3	Analyse de l'impact de la résolution sur la quantification des volumes de stockage dans les dépressions du terrain naturel	35
4.2	Exemple d'application de la modélisation hydraulique des transferts	36
4.2.1	Incidence de la résolution sur les volumes produits et transférés à l'aval.....	36
4.2.2	Incidence de la méthode de calcul des chemins de l'eau sur l'hydrogramme.....	38
4.3	Conclusion sur la résolution à utiliser en fonction des applications.....	38
4.3.1	Pour les mesures d'aménagement préventif en amont :	38
4.3.2	Pour les mesure curatives :	39
CONCLUSION ET PERSPECTIVES		39
RESUME.....		40
SUMMARY.....		40
BIBLIOGRAPHIE :		42
LISTE DES ANNEXES		44
RESUME.....		52
SUMMARY.....		52

Liste des figures

Figure 1 : Principaux processus d'écoulement superficiels et souterrains.	14
Figure 2 : Illustration de la dégradation de l'état de surface de sols limoneux	15
Figure 3 : Illustration du rôle de collecteur des motifs agraires.	15
Figure 4 : Grille de codage des directions d'écoulement.	16
Figure 5 : Schéma de parcelle pour le modèle TCRP.	17
Figure 6 : Directions d'écoulement possible et sens de travail du sol.	17
Figure 7 : Illustration de la rugosité orientée.	18
Figure 8 : Plan de situation du bassin versant de l'Ibenbach (68).	20
Figure 9 : Organigramme de l'articulation données – modèles.	22
Figure 10 : Aperçu global de la méthodologie de détermination des chemins de l'eau.	23
Figure 11 : Actualisation du parcellaire d'après l'ombrage du MNT.	24
Figure 12 : Illustration des LDD.	25
Figure 13 : Organigramme du modèle LISEM.	26
Figure 14 : Hyetogrammes d'après la méthode SHYPRE.	27
Figure 15 : Schéma de principe de réalisation du semis de points d'échantillonnage.	28
Figure 16 : Graphe des surfaces contributives par rapport à la référence.	29
Figure 17 : Distribution des écarts à la référence.	30
Figure 18 : écarts supérieurs à 2 ha en fonction des résolutions et du modèle chemins de l'eau.	31
Figure 19 : Plages de fonctionnement des mesures contre l'érosion hydrique.	32
Figure 20 : Ecart de surface amont selon les résolutions de MNT (algorithme D8).	32
Figure 21 : Ecart de surface amont selon les résolutions de MNT (algorithme TCRP).	32
Figure 22 : écarts et MNT ré-échantillonnés (gauche : suivant la topo – droite : avec TCRP).	33
Figure 23 : Chemins de l'eau en fonction de la rugosité orientée R0.	34
Figure 24 : Stockage dans les dépressions du terrain.	35
Figure 25 : Incidence de la résolution sur l'hydrogramme.	36
Figure 26 : Distribution des pentes pour les MNT de 5 m et 20 m.	37
Figure 27 : Comparaison hydrogrammes de projet et calculés.	37
Figure 28 : Impact des chemins de l'eau sur l'hydrogramme.	38

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification spatiale des mesures de prévention contre l'érosion hydrique.	19
Tableau 2 : Surfaces et capacités de stockage du bassin versant.	36

Liste des abréviations et acronymes :

ARAA :	Association Régionale pour la relance Agronomique en Alsace
CG :	Conseil Général
DDAF :	Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt
DIREN :	Direction Régionale de l'Environnement
GERPLAN :	Plan de Gestion de l'Espace Rural et Périurbain
GPS :	Geopositionning System
IGN :	Institut Géographique National
IMFS - ULP :	Institut de Mécanique des Fluides de Strasbourg - Université Louis Pasteur
LDD :	Local Drain Direction
LISEM :	Limbourg Soil Erosion Model
MNS :	Modèle Numérique de Surface
MNT :	Modèle Numérique de Terrain
PPR :	Plan de Prévention des Risques
SHYPRE :	Simulation d'Hydrogrammes pour la Prédétermination des crues

Introduction :

Le risque « coulée boueuse » souvent confondu ou assimilé au risque inondation commence depuis quelques années à faire l'objet de recherches particulières et ciblées. Ces recherches se sont heurtées dans un premier temps à la complexité des processus mis en jeu (détachement des particules de sol, transport, dépôt) dans les phénomènes de coulées boueuses. La spatialisation de ces processus successifs à travers des modèles (à base physique notamment) est un des axes de recherche actuel. Les outils de modélisation qui en découleront sont attendus par les acteurs de développement du territoire afin de juger de l'efficacité des actions entreprises ou projetées pour limiter les risques liés à l'érosion hydrique.

La spatialisation fine des chemins de l'eau dans un bassin versant relève de cette exigence opérationnelle. Car, si le type de mesure à mettre en œuvre est actuellement bien connu, leur efficacité se heurte au manque de précision avec lesquels les chemins de l'eau sont déterminés en fonction de la résolution des données topographiques rentrées dans les modèles.

La prise en compte des motifs linéaires induits par les pratiques culturelles dans la modélisation des écoulements de surface est assez récente et conduit à des chemins d'eau bien différents de ceux calculés selon la topographie des versants uniquement. Le degré de précision en terme de détermination spatiale des chemins de l'eau est donc un point crucial qui fera l'objet du développement d'une méthodologie d'analyse dans cette étude.

Cette étude s'articulera en quatre parties. Dans un premier temps, le contexte de recherche opérationnel sur la thématique érosion hydrique sera présenté ainsi que la problématique qui en découle. Les objectifs de ce stage étant d'apporter des réponses claires en terme de précision de données requise en entrée des modèles de détermination des chemins de l'eau et de quantification des volumes produits et transférés à l'aval par le ruissellement. Après un rappel dans la deuxième partie sur les processus et le type de mesure préventives et curatives proposées actuellement par les experts, nous développerons dans la troisième partie la méthodologie appliquée pour répondre aux objectifs. Les résultats, enfin, seront exposés et analysés afin de conclure sur des recommandations adaptées en fonction des mesures de prévention à mettre en œuvre.

1. Contexte, problématique et objectifs

1.1 L'érosion hydrique, un contexte multi-acteur

Ce stage s'inscrit dans une démarche de projet multi-acteur visant à mettre en œuvre des outils opérationnels d'estimation de l'efficacité des mesures de lutte contre l'érosion hydrique des bassins versants cultivés. Cette collaboration entre la profession agricole, par le biais des Chambres d'Agriculture du Bas-Rhin et du Haut-Rhin, des deux Départements en tant que financeurs et acteurs de terrain, de la recherche par le biais de l'Institut de Mécanique des Fluides de Strasbourg (IMFS), et de l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA) pour la recherche appliquée, a permis l'élaboration d'un zonage de la sensibilité des sols à l'érosion. Des diagnostics ont été élaborés pour nombre de communes en partenariat avec les Chambres d'Agriculture, la profession agricole, et les diverses associations de riverains débouchant sur des prescriptions de mesures à mettre en œuvre (préventives ou curatives).

Les mesures de lutte contre l'érosion des sols sont multiples et s'appliquent à différentes échelles : de la parcelle au bassin versant. L'estimation de l'efficacité de ces mesures en terme de réduction de l'érosion hydrique nécessite le développement d'outils de modélisation adaptés au contexte local.

Les représentants de l'Etat (DDAF, DIREN) réfléchissent quant à la possibilité de s'appuyer sur ces outils de modélisation pour élaborer des PPR « coulées boueuses » comme cela a été fait pour le risque d'inondation. Le lancement de cette idée sur un bassin pilote pourrait voir le jour, avant la validation au niveau national.

L'ARAA intervient dans ce cadre de recherche opérationnelle. Dans cette optique, deux études complémentaires ont été entamées :

- l'une vise à déterminer l'incidence de la qualité des données pédologiques et du paramétrage des variables liés aux sols sur le ruissellement et l'érosion simulé. Cette dernière est encadrée par l'ARAA.
- l'autre, qui fait l'objet de ce stage, s'intéresse à la question de la précision de la localisation des chemins de l'eau en fonction de la qualité des données topographiques et de la prise en compte des motifs agraires. Cette étude est encadrée par le Conseil Général du Haut-Rhin en collaboration avec l'ARAA.

Les deux stages doivent aboutir à des recommandations claires par rapport aux données à fournir au modèle et doivent rendre compte des limites d'interprétation des résultats du modèle en raison de la qualité des données.

1.2 Problématique :

L'incidence socio-économique des dégâts engendrés par l'érosion hydrique a fédéré les acteurs concernés par ce risque autour d'une démarche active de diagnostic et de développement d'outils opérationnels permettant d'apprécier l'efficacité de mesures préventives et curatives.

Si le type de mesures à mettre en œuvre est bien identifié par les experts, leur localisation optimale dans le bassin versant reste difficile à apprécier faute d'outils d'évaluation qualitatifs et quantitatifs. Certains aménagements sont a priori plus adaptés à un positionnement en tête de bassin, quand d'autres peuvent concerner le bassin versant dans son entier. Aussi, selon le type de mesure à mettre en œuvre, la précision spatiale requise pour la détermination des chemins de l'eau et des volumes produits et transférés à l'aval ne sera pas la même. Ce point est précisément l'objet du développement de ce stage : quelle précision de donnée topographique est-il nécessaire d'acquérir pour quels types de mesures, quelle incidence la précision des données topographique aura-t-elle sur les hydrogrammes simulés, quels sont les seuils au-delà desquels les résultats du modèle ne pourront plus être considérés comme réalistes ?

1.3 Objectifs

Les objectifs de ce stage sont des réponses concrètes à la problématique développée ci-dessus. Il s'agit de :

- déterminer la résolution minimale requise pour un positionnement efficace des mesures d'aménagement
- déterminer l'impact de la résolution des données topographiques sur l'estimation des capacités de rétention d'eau dans le paysage avant transfert
- analyser l'incidence de la résolution sur la forme de l'hydrogramme.

2. Ruissellement et érosion : processus, modèles, et mesures préventives

2.1 Processus de formation et de transfert du ruissellement de surface dans un bassin versant

2.1.1 La formation du ruissellement sur les versants

La pluie non interceptée par le couvert végétal a tendance à s'infiltrer sous l'action de la gravité, et de la capillarité si le sol n'est pas saturé. Ce flux est contrôlé par des paramètres locaux liés à la structure et à la texture du sol. La capacité d'infiltration maximum est en effet fonction de la porosité et de la conductivité hydraulique du sol. La formation du ruissellement de surface sur les versants d'un bassin versant (Ambroise, 1999) peut résulter de la combinaison de trois processus (cf. Figure 1).

- **Dépassement de la capacité d'infiltration du sol** (HORTON, 1933) : le flux entrant dépasse les capacités d'infiltration du sol. Celui-ci se sature « par le haut ». Ce processus est particulièrement important pour les sols battants ; la croûte de battance une fois formée peut diminuer drastiquement la conductivité hydraulique à saturation de la couche de surface (Boiffin, 1990). Un sol limoneux peut ainsi voir sa capacité d'infiltration varier de 30 mm/h à l'état initial à 1 mm/h pour un état dégradé de type croûte sédimentaire (F2). Il est donc évident que l'histoire hydrique du sol va conditionner fortement la variable de contrôle « capacité d'infiltration ».
- **Ruissellement par saturation du sol** (CAPPUS, 1960) : nous sommes ici dans la situation où le sol recevant l'eau météorique est déjà saturé par le bas. L'eau de pluie atteignant la surface du sol constitue donc un excès d'eau. Cet excès ne pourra que ruisseler ou provoquer par effet piston la libération d'un volume équivalent.
- **Exfiltration de zone saturée** (DUNNE et BLACK, 1970) : Ce processus se déroule également dans des conditions saturées. Le flux entrant peut être transféré vers l'aval par effet piston. Le flux exfiltré en surface à l'aval étant équivalent au flux entrant. Ce processus est contrôlé par la conductivité hydraulique à saturation. Si le flux entrant dépasse la capacité d'écoulement dans le sol à saturation, les deux processus d'exfiltration et de ruissellement par saturation du sol peuvent se déclencher conjointement.

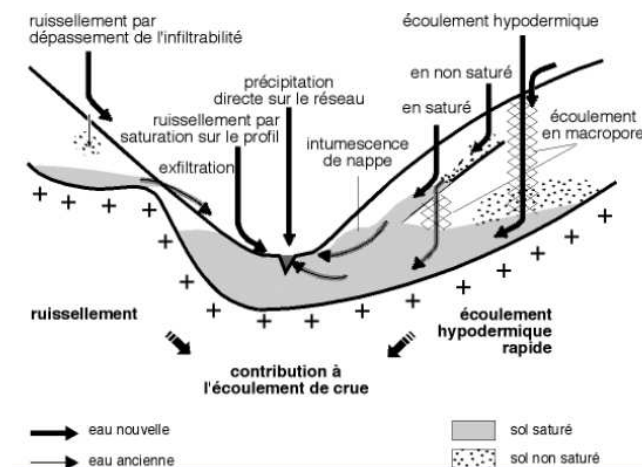


Figure 1 : Principaux processus d'écoulement superficiels et souterrains.

Source : Ambroise, 1999.

Ces trois processus peuvent intervenir séparément ou conjugués selon la période de l'année, les

conditions initiales, la durée et l'intensité des forçages atmosphériques. Le phénomène de battance (propre aux sols limoneux) provoque la fermeture de la surface du sol, diminuant considérablement ses capacités d'infiltration (cf. Figure 2) ainsi que sa capacité de stockage en surface du fait de la diminution de la rugosité. La sensibilité des sols à la battance est ainsi une variable de contrôle de la production du ruissellement (Auzet, 1987).



Figure 2 : Illustration de la dégradation de l'état de surface de sols limoneux .

(Après le semis – apparition de croûte de battance après un orage intense – croûte de battance)

Source : Clichés A. Jacod, 2008 – Landser (68) et Alteckendorf (67).

2.1.2 Le transfert de surface : les chemins de l'eau

Le transfert de l'eau à la surface du sol est soumis aux forces gravitaires. Il s'effectue donc de l'amont vers l'aval dans un bassin versant. L'eau en excès sera retenue dans un premier temps dans les dépressions de surface, puis cette eau de surface va s'évacuer vers l'aval dès lors que le point de débordement de la dépression est atteint. Les flux de surface, d'abord diffus sur les zones les plus en amont (proches des crêtes du bassin versant), se concentrent au fur et à mesure de leur écoulement vers l'aval, en suivant successivement plusieurs types de réseaux, pérenne et non pérenne.

A l'échelle de la parcelle, le réseau créé par les motifs linéaires liés au travail du sol (traces de roues, dérayures, sillons) peut contribuer à orienter les écoulements (cf. Figure 3) dans une direction qui ne sera pas forcément la ligne de plus grande pente (Souchère et al, 1998). Ce réseau sera mouvant dans le temps en se dégradant progressivement, et dans l'espace au fil des rotations culturales.



Figure 3 : Illustration du rôle de collecteur des motifs agraires.

(à gauche : dérayure – à droite : sillons)

Source : Clichés A. Jacod, 2008. Landser (68).

Au-delà de la parcelle vont intervenir d'autres éléments structurants, comme les éléments paysagers et les routes et chemins. Les fossés, talwegs, routes et chemins constituent un réseau pérenne car les variations dans le temps et l'espace sont très limitées. Au sortir de la parcelle, le ruissellement va se concentrer progressivement vers l'aval par le biais de ce réseau.

2.2 Modélisation des processus :

2.2.1 La modélisation des chemins de l'eau suivant la topographie

L'algorithme de calcul développé sur PC Raster (Van Deursen, 1995) complète l'algorithme D8 (Jenson et Domingue, 1988), lequel est basé sur le principe suivant : l'eau s'écoule du haut vers le bas suivant la ligne de plus grande pente. Il s'agit d'une méthode de routage à flux unidirectionnel : toute l'eau de la cellule amont est transférée vers une seule cellule située en aval. Il existe d'autres méthodes à flux multiples : transfert vers plusieurs cellules situées en aval, la répartition étant pondérée par la pente entre cellule source et cellule de destination.

Cet algorithme procède en trois étapes :

- détermination des directions d'écoulement pour chaque cellule : local drain direction (LDD),
- remplissage des dépressions (naturelles ou résultant de la discrétisation du MNT en raster)
- calcul de l'accumulation des flux (surface contributive amont) pour chaque cellule.

La détermination des directions d'écoulement (LDD) s'appuie sur le principe que l'eau située sur un pixel va se déplacer vers l'un des huit pixels voisins : celui dont la cote d'altitude est la plus basse et vers lequel la pente d'écoulement est la plus forte. Le pixel est alors affecté d'un code directionnel suivant la grille ci-dessous (cf. Figure 4). La valeur 5 correspond à un « puit », et est affectée aux pixels pour lesquels aucun exutoire n'a été trouvé.

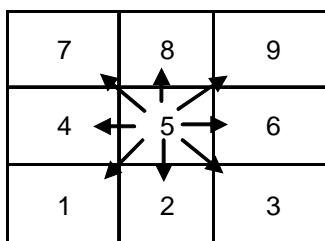


Figure 4 : Grille de codage des directions d'écoulement.

Source : Van Deursen, 1995.

Les « puits » ou les « zones plates » sont ensuite traités suivant leur degré de complexité par des opérations de morphologie mathématique (Van Deursen, 1995). A l'issue de ces traitements, chaque cellule dispose d'un code directionnel différent de la valeur « 5 », sauf celles situées en marge du MNT.

2.2.2 La modélisation des chemins de l'eau en tenant compte des motifs agraires et de la topographie (Tillage Controlled Runoff Pattern)

Le modèle TCRP développé par I. Takken (Takken et al, 2001) en langage PC Raster s'appuie les résultats de travaux antérieurs (Souchère et al, 1998) qui ont établi le rôle non négligeable des motifs agraires (sens de travail du sol, dérayures, fourrières) dans l'orientation des écoulements de surface. Le modèle TCRP procède en plusieurs étapes successives :

- Modélisation des écoulements suivant la ligne de plus grande pente topographique
- Modélisation des écoulements suivant le sens de travail du sol
- Combinaison de ces deux premiers résultats et élaboration finale des directions d'écoulement du ruissellement.

La modélisation des écoulements suivant la topographie est réalisée avec l'algorithme de routage à flux unique développé par Van Deursen (Van Deursen, 1995).

La modélisation des écoulements suivant le sens de travail du sol suppose l'intégration dans le modèle d'un schéma type de parcelle cultivée (cf. Figure 5). Cette dernière, telle que prise en compte par le modèle TCRP, est bordée sur chaque côté latéral par une dérayure et sur les côtés haut et bas par une fourrière pour laquelle le sens de travail du sol est perpendiculaire à celui de la parcelle. L'orientation du sens du travail du sol est mesurée en degré de 0° à 180° dans le sens horaire, la valeur zéro étant affectée au Nord.

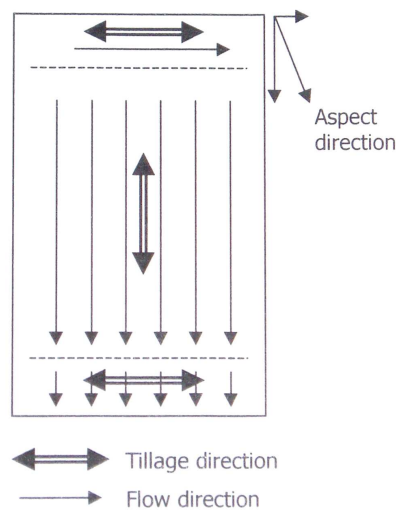


Figure 5 : Schéma de parcelle pour le modèle TCRP.

Source : Takken, 2001.

Dans un premier temps, la pente du terrain naturel est calculée dans le sens de travail du sol. La direction d'écoulement dans la parcelle est ensuite établie conformément à l'algorithme D8 d'après ces valeurs de pente en minimisant l'angle entre le sens de travail du sol et la direction d'écoulement (cf. Figure 6).

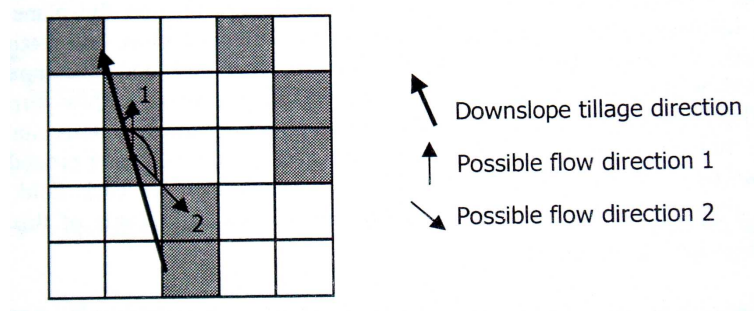


Figure 6 : Directions d'écoulement possible et sens de travail du sol.

Source : Takken, 2001.

Les bords de la parcelle sont traités séparément afin de pallier des incohérences liées à la

rasterisation du parcellaire. Les cellules constituant les limites d'une parcelle sont discriminées de celles appartenant à la parcelle voisine d'après l'identifiant numéro de parcelle. Si la valeur de l'angle entre le sens de travail du sol et le bord de la parcelle est supérieur à 30°, le bord est assimilé à une fourrière, à l'inverse il est conservé comme bord de parcelle. La largeur de la fourrière prise en compte dans le modèle correspond à la taille d'une cellule. Pour la fourrière, le sens d'écoulement suit la direction du bord considéré comme fourrière, pour les autres bords le sens de travail du sol est imposé.

La combinaison de ces différents modèles est ensuite réalisée par le biais d'une règle de décision. Celle-ci repose sur le calcul pour chaque cellule de la probabilité p que l'écoulement suive la pente topographique. Cette probabilité p est établie par l'équation suivante (Takken, 2001) :

$$\text{Log}(p)/(1-p) = -5,92 + 0,133S + 0,102 \lambda - 0,417 R_0$$

S : pente topographique

λ : angle entre la pente topographique et le sens de travail du sol

R_0 : rugosité orientée R_0 (Ludwig et al, 1995) définie comme la différence d'altitude entre le rang et l'inter-rang comme illustré sur la figure 7 ci-dessous.

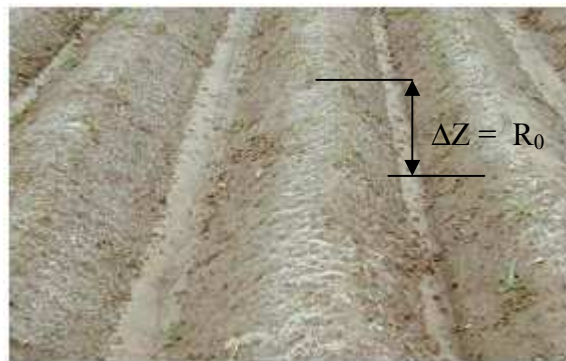


Figure 7 : Illustration de la rugosité orientée.

Source : Takken, 2001.

A l'issue de cette combinaison, un traitement des incohérences de routage (maillage, zones plates et dépressions) doit être envisagé.

2.2.3 Délimitation du bassin versant et calcul des surfaces contributives

L'algorithme utilisé par Van Deursen sur PC Raster pour la délimitation du bassin versant est de type hydrologique (Morris et Heerdegen, 1988), il se base sur le suivi du réseau de drainage (LDD). Cet algorithme procède en remontant de l'exutoire vers les limites du bassin versant : les cellules reliées par le LDD à l'exutoire se voient attribuer une valeur 1 ; celles dont le LDD ne conduit pas à l'exutoire sont marquées de la valeur 0. Cette carte booléenne permet de déterminer les limites topographiques du bassin versant.

Le calcul des surfaces contributives est traité comme un calcul d'accumulation de flux de l'amont vers l'aval en suivant le LDD. La surface contributive amont peut être calculée en nombre de cellules, ou en surface réelle. L'algorithme procède par incrémentation des cellules de l'amont vers l'aval, chaque cellule aval ayant un index comptabilisant le nombre de cellules amont qui lui sont reliées en suivant le LDD. En multipliant ce nombre par la surface unitaire d'une cellule, on obtient ainsi la surface contributive amont en tout point du bassin versant.

2.3 Les mesures contre l'érosion hydrique dans un bassin versant

L'identification des chemins de l'eau et des surfaces contributives au processus d'érosion hydrique dans un bassin versant a conduit à identifier les grands principes (Auzet, 1990) que doivent respecter les mesures de prévention mises en œuvre par les aménageurs. Ces principes peuvent se décliner en actions de prévention à localiser soit sur les surfaces de production du ruissellement, soit sur le réseau de collecte et de transfert. Le tableau 1 ci-dessous illustre cette classification spatiale.

Tableau 1 : Classification spatiale des mesures de prévention contre l'érosion hydrique

Principe	Localisation des mesures préventives
Limiter la production du ruissellement dans les zones émettrices	Sur les surfaces
Augmenter la résistance à l'arrachement des zones sources de production	Sur les surfaces
Limiter la concentration du ruissellement dans les zones à risque d'incision	Sur les chemins d'eau
Protéger les zones vulnérables aux inondations et aux dépôts	Sur les chemins d'eau

2.3.1 Les mesures sur les surfaces

Ces mesures sont de deux ordres : il s'agit soit d'influer sur les pratiques culturales, soit sur la nature même des cultures sur les zones identifiées à risque.

Les techniques culturales sans labour (TCSL) constituent une alternative aux pratiques traditionnelles. Les objectifs des TCSL (Fiches érosion, 2008) sont les suivants :

- A court terme : améliorer la protection de la surface du sol contre l'effet splash (détachement des agrégats par les gouttes de pluie), grâce aux résidus de culture maintenus en surface (Van Dijk et al, 1996).
- A moyen et long terme : une augmentation de la teneur en matière organique de la couche de surface, ce qui contribue à augmenter la stabilité des agrégats et donc à diminuer la sensibilité du sol à la battance. Par ailleurs, avec le temps, l'activité biologique va se développer dans cette couche de surface et développer le réseau de macro-porosités, augmentant ainsi les capacités d'infiltration du sol en surface.

Adapter la spatialisation des cultures sur les zones à risque suppose une concertation des différents exploitants. L'objectif est ici d'organiser une mosaïque spatiale des cultures en fonction de l'effet souhaité : favoriser l'infiltration sur les parcelles productrices de ruissellement, protéger le sol contre l'arrachement sur les parcelles situées sur les chemins d'eau, favoriser la sédimentation sur les replats en aval de parcelle, par mise en herbe par exemple. La mise en place d'inter culture pendant les périodes à risque (pluies longues d'automne, ou orages d'été selon les endroits) augmente la couverture du sol ainsi que sa capacité d'infiltration. Ces deux facteurs contribuent à la diminution de l'exposition du sol à l'impact de la pluie et de la production du ruissellement.

2.3.2 Les mesures sur les chemins de l'eau

Intervenir sur les chemins de l'eau répond à la double nécessité de protection des sols et de gestion

hydraulique des flux transférés vers l'aval. Les aménagements correspondants seront soit dans le sens d'écoulement des flux, pour protéger les sols, soit transversaux afin de créer un obstacle à l'écoulement, et d'obtenir un effet de laminage. Il s'agit ainsi (Fiches érosion, 2008) :

- d'augmenter la résistance du sol à l'arrachement afin de réduire l'érosion (chenaux enherbés, fossé d'infiltration, fossé et talus)
- de favoriser le dépôt des particules en suspension dans la lame d'eau ruisselante par effet peigne avant leur entrée dans le réseau de fossé et cours d'eau (bandes enherbées, fascines, haies, talus)
- d'augmenter la capacité d'infiltration du sol afin de réduire les flux transférés vers l'aval (bandes enherbées, chenaux enherbés,
- de ralentir les écoulements afin d'étaler la pointe de crue dans le temps (mares tampon, bassins de rétention).

Ces mesures ont chacune une plage de fonctionnement optimale, qui est liée à la surface drainée en amont du point de positionnement de l'aménagement. Ces gammes de valeurs seront mises en perspective avec le degré de précision qu'il est possible d'obtenir pour la localisation des chemins de l'eau (cf. 4 - Résultats et discussion).

3. Données et méthodologie

3.1 Données disponibles

3.1.1 Site d'étude :

Le bassin versant choisi pour cette étude est celui de l'Ibenbach, cours d'eau situé en amont de la commune de Landser dans la région du Sundgau alsacien (cf. Figure 8 ci-dessous).

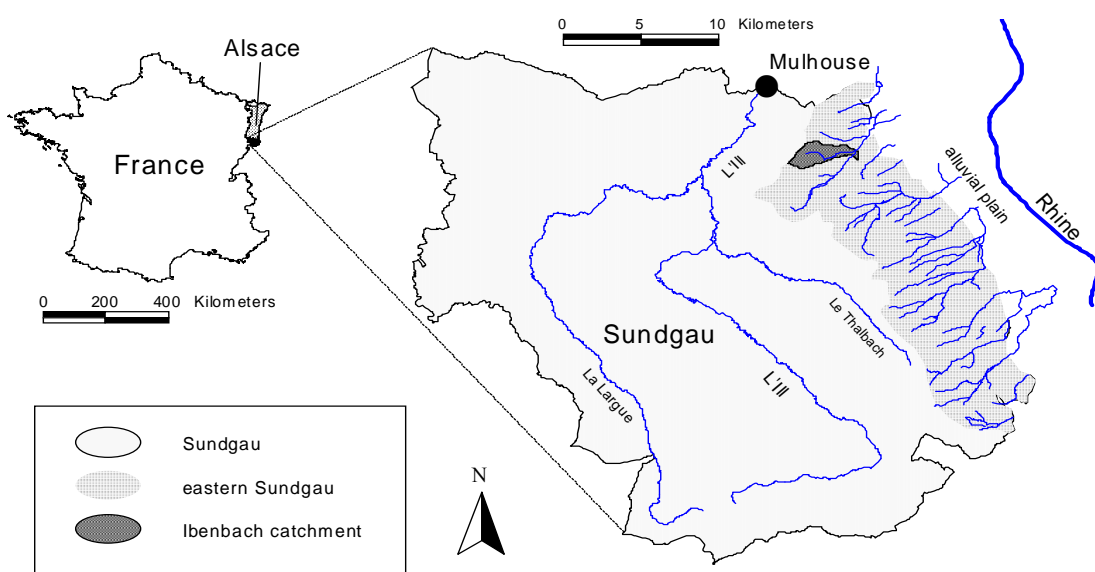


Figure 8 : Plan de situation du bassin versant de l'Ibenbach (68).

Source : Van Dijk et al, 2005.

Le choix de ce bassin versant a été motivé par plusieurs facteurs. De nombreuses études, relevés de terrain, et mesures y ont déjà été réalisées, notamment à la suite de l'événement orageux de 2001 pour lequel un repérage spatialisé des chemins de l'eau et des zones de dépôt de sédiments a été effectué (Van Dijk et al, 2005).

A la suite de cet événement, des mesures préventives (GERPLAN) et curatives (bassin de rétention) ont été mises en œuvre. Depuis 2006, une station de mesure (pluviométrique et hydrométrique en temps réel) a été installée sur la digue du bassin de rétention, elle permet une surveillance en continu des événements s'y produisant. Ces données devraient permettre le calage et la validation des modèles.

3.1.2 Données disponibles

Données topographiques

Les données topographiques à haute résolution ont été acquises par lever laser aéroporté suivant la technique de télémétrie laser. Cette technologie se base sur le calcul de la distance émetteur – réflecteur par transformation du temps de parcours d'une impulsion laser réfléchi sur le sol. Le laser embarqué dans un avion ou un hélicoptère émet une série d'impulsions balayant la surface du sol. L'enregistrement des échos (en général le premier et le dernier) permet de calculer la distance au sol de l'émetteur. Un système de positionnement de l'avion par GPS différentiel (un GPS embarqué avec centrale inertielle, et un GPS au sol servant de référence) permet de référencer en planimétrie et en altimétrie chaque écho enregistré. Un calage de l'appareil sur une ou plusieurs surfaces référencées est nécessaire. Les données sont ensuite transformées en fichier de coordonnées (X,Y,Z). Sans filtrage, on obtient un modèle numérique de surface (MNS) qui comporte le sursol. Après filtrage de la végétation et du bâti, le MNS est transformé en modèle numérique de terrain (MNT). La densité de points est de l'ordre de 5 à 7 au m², et la précision altimétrique de l'ordre de 15 cm.

Le MNT haute résolution a été acquis suivant cette technique à une résolution de 0,5 m en planimétrie, et de 0,15 m en altimétrie en avril 2007.

La deuxième source de données topographiques mises à disposition pour cette étude est le MNT à la résolution de 50 m issu de la BD-ALTI de l'IGN.

Données pédologiques et occupation du sol

Le Sundgau est un secteur où les sols à dominante limoneuse sont sensibles à la battance (Party et al, 2001). L'Association Régionale pour la Relance Agronomique en Alsace a cartographié sur SIG à l'échelle 1/50 000ème les différentes unités pédologiques. Un extrait de cette base de données spatiales a été mis à disposition sur la zone d'étude.

Les états de surface et données concernant la couverture du sol par la végétation ont été relevés sur le terrain peu de temps après le semis, en avril 2008. Des sondages à la tarière ponctuels ont été réalisés à cette occasion afin de vérifier la cohérence des limites cartographiques des unités de sol indiquées sur la carte des sols de l'ARAA et le terrain.

Le parcellaire recensant les différentes occupations du sol sur le bassin versant de l'Ibenbach a été constitué lors d'études précédentes (Van Dijk et al, 2005). Ce document a été actualisé sur le terrain en fonctions des cultures en place au printemps 2008.

Données climatiques et historiques

En mai 2001, la commune de Landser a été fortement touchée par les conséquences de pluies orageuses, environ 32 mm de pluie pendant 20 minutes (Van Dijk et al, 2005). Des relevés de terrain ont permis une cartographie des axes d'écoulement principaux et des zones de dépôt des sédiments. Ces données serviront à la validation des calculs des chemins de l'eau.

3.1.3 Outils

Les outils nécessaires à cette étude sont de deux ordres : logiciels et modèles.

Logiciels

Pour cette étude, deux logiciels de SIG ont été utilisés :

- Arc View 9.2 d'ESRI, avec les extensions 3D-analyst et spatial-analyst,
- PC Raster (Van Deursen, 1995), SIG raster libre. PC Raster dispose d'un calculateur puissant qui permet des calculs rapides pour des résolutions fines.

Modèles

Deux modèles ont été utilisés successivement, comme cela est illustré par la figure 9 ci-dessus. Il s'agit de :

- TCRP (Tillage Controlled Runoff Pattern) développé sous environnement PC Raster pour la modélisation des chemins de l'eau (Takken, 2001).
- LISEM (Limburg Soil Erosion Model), modèle Pluie – Infiltration – Ruissellement à base physique spatialisé, (De Roo et al, 1996), fonctionnant également sous l'environnement PC Raster.

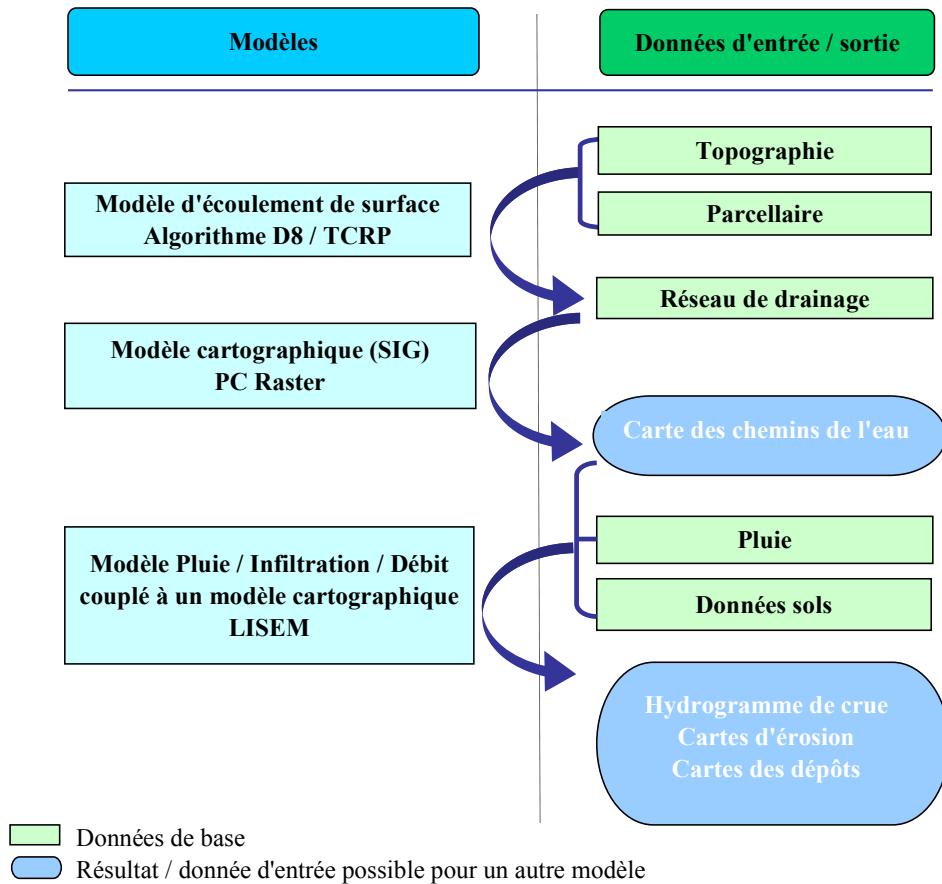


Figure 9 : Organigramme de l'articulation données – modèles.

3.2 Méthodologie développée pour la détermination des chemins de l'eau

L'un des objectifs de cette étude est la détermination du niveau de résolution du MNT nécessaire pour la détermination optimale des chemins d'eau dans le cadre d'aménagements de prévention contre l'érosion hydrique. Ces aménagements, comme cela a été présenté précédemment, peuvent être localisés à la parcelle ou concerner une surface plus grande. La précision requise pour la détermination des écoulement ne sera en conséquence pas la même. La méthode développée ici vise à établir des seuils de précision de données topographique nécessaires en fonction des plages de fonctionnement des différentes mesures de prévention envisagées.

La comparaison des résultats obtenus doit bien évidemment se faire par rapport à une référence. Nous faisons ici l'hypothèse que la résolution la plus fine (0,5 m) est celle qui donnera les résultats les plus proches de la réalité. A cette résolution, certains motifs agraires comme les dérayures profondes de plus de 0,15m (limite de la résolution en altimétrie) sont discernables et leur réseau pris en compte par les algorithmes de calcul des chemins d'eau. Toutes les opérations de création de données parcellaire, réseau de cours d'eau seront réalisées sur la base de cette résolution de référence, puis ré-échantillonnées aux différentes résolutions d'étude (cf. Figure 10).

Le MNT référence a également fait l'objet d'un traitement localisé afin de faire disparaître le barrage réalisé dans le bassin versant. En effet, l'étude portant sur tout le bassin versant, ce barrage aurait été artificiellement rempli lors des opérations d'élimination des zones plates et dépressions nécessaires au calcul du réseau de drainage. La digue a été artificiellement arasée et le MNT reconstitué localement par interpolation linéaire entre les points situés en limite du pied de talus. Cette zone sera considérée pour la suite comme « perturbée », et nous n'analyserons pas les résultats sur ce secteur.

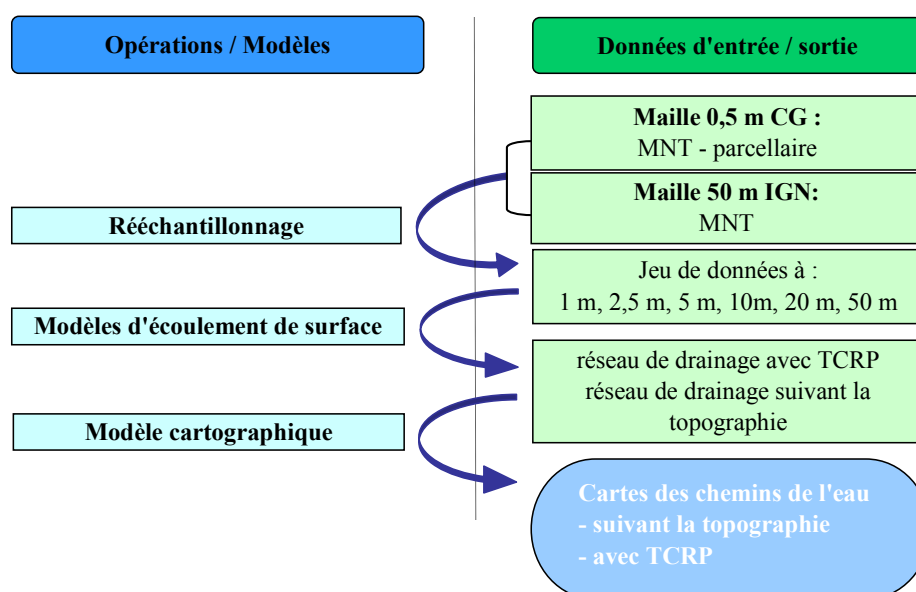


Figure 10 : Aperçu global de la méthodologie de détermination des chemins de l'eau.

3.2.1 Création d'un jeu de données topographiques

La donnée source : le MNT à haute résolution a ainsi été « dégradée » par ré-échantillonnage pour constituer un jeu de données topographiques à différentes résolutions : 1 m, 2,5 m, 5 m, 10 m, 20 m et 50 m.

Le MNT de l'Institut Géographique National (BD-Alt) de résolution 50 m a été ajouté à ce jeu de données à deux résolutions : 50 m et après ré-échantillonnage à 5 m.

La source des MNT sera ajoutée entre parenthèses (ex : MNT (CG68), ou MNT (IGN)), afin de pouvoir les distinguer aux mêmes résolutions.

Le ré-échantillonnage a été réalisé sur le logiciel Arcview 9.2 (Spatial Analyst) en utilisant la méthode d'interpolation bilinéaire (moyenne pondérée des valeurs des quatre cellules voisines les plus proches).

3.2.2 Réalisation du parcellaire

Les données initiales du parcellaire, réalisé pour l'étude post-événement de 2001 à Landser par l'ARAA, ont été mise à jour en utilisant l'ombrage du MNT à haute résolution puis par vérification sur le terrain. La précision du MNT permet de fait d'apprécier finement les modifications du relief dues aux motifs agraires notamment ; les dérayures indiquant les limites de parcelles sont perceptibles. L'ombrage permet également d'apprécier des différences d'occupation du sol : parcelle cultivée et bande enherbée ne présentent pas le même rendu de surface (cf Figure 11). Ces mises à jour sont cependant tributaires de la date d'acquisition des données topographiques. Aussi, une vérification sur le terrain s'impose afin de les valider.



Figure 11 : Actualisation du parcellaire d'après l'ombrage du MNT.

Le contrôle de terrain a permis l'actualisation des informations concernant les techniques culturales employées pour chaque parcelle, la nature de la culture en place, l'orientation du travail du sol, la présence de résidus en surface et leur taux de couverture, la localisation des dérayures et bandes enherbées. Le parcellaire mis à jour est présenté en annexe 1.

Le parcellaire est une couche de type polygone sous Arcview. Une fois les données validées, cette couche est transformée en raster et ré-échantillonnée par interpolation bilinéaire pour chaque résolution d'étude.

3.2.3 Modélisation des chemins de l'eau

La détermination des chemins de l'eau s'effectue en plusieurs étapes :

- enfouissement du réseau de cours d'eau dans le MNT
- attribution d'une valeur de rugosité orientée aux parcelles cultivées
- application de l'algorithme D8 calculant le réseau de drainage suivant la pente
- application du modèle TCRP calculant le réseau de drainage en incluant les motifs agraires.

Le réseau de cours d'eau et de fossé est digitalisé sur l'ombrage du MNT, sa cohérence est ensuite vérifiée par rapport aux courbes de niveau calculées à un pas de 0,15m sur le MNT référence.

Cette couche « stream » comporte les informations suivantes : numéro de segment, type (fossé ou cours d'eau). Les champs de cette couche sont ensuite, comme pour le parcellaire, rasterisés individuellement à la résolution de référence, puis ré-échantillonnés aux différentes résolutions d'étude. Cette étape est réalisée sur PC Raster, ce qui impose d'importer le MNT raster depuis Arcview par le biais d'un format d'échange ascii. La suite du traitement se fait sous PC Raster. Les cours d'eau sont artificiellement « enfoncés » dans le MNT afin de s'assurer de la continuité linéaire du réseau et de forcer l'écoulement dans le réseau. Ce traitement est réalisé pour chaque résolution.

Pour le calcul des directions d'écoulement suivant les motifs agraires, il est nécessaire de donner une valeur de rugosité orientée R_0 à chaque cellule de parcelle cultivée. Nous avons fait le choix de donner une valeur uniforme à l'ensemble des parcelles, puis de faire varier cette valeur afin de tester la sensibilité du modèle. La rugosité orientée est fonction de la nature de la culture (Takken, 2001), et de l'histoire hydrique écoulée depuis les opérations de travail du sol (Ludwig et al, 1995). La valeur initiale de R_0 que nous avons retenue est de 5 cm, elle correspond à une parcelle de maïs juste après le semis (soit début mai pour le bassin versant de Landser).

Les cartes introduites en entrée dans le modèle TCRP sont : le MNT, l'occupation du sol, l'angle de travail du sol, la rugosité orientée, une carte booléenne discriminant les parcelles cultivées du reste du bassin versant. Le modèle produira en sortie (cf. 2.2 Modélisation des processus) : la carte des chemins de l'eau suivant la ligne de plus grande pente, et la carte des écoulements combinant pente topographique et motifs agraires.

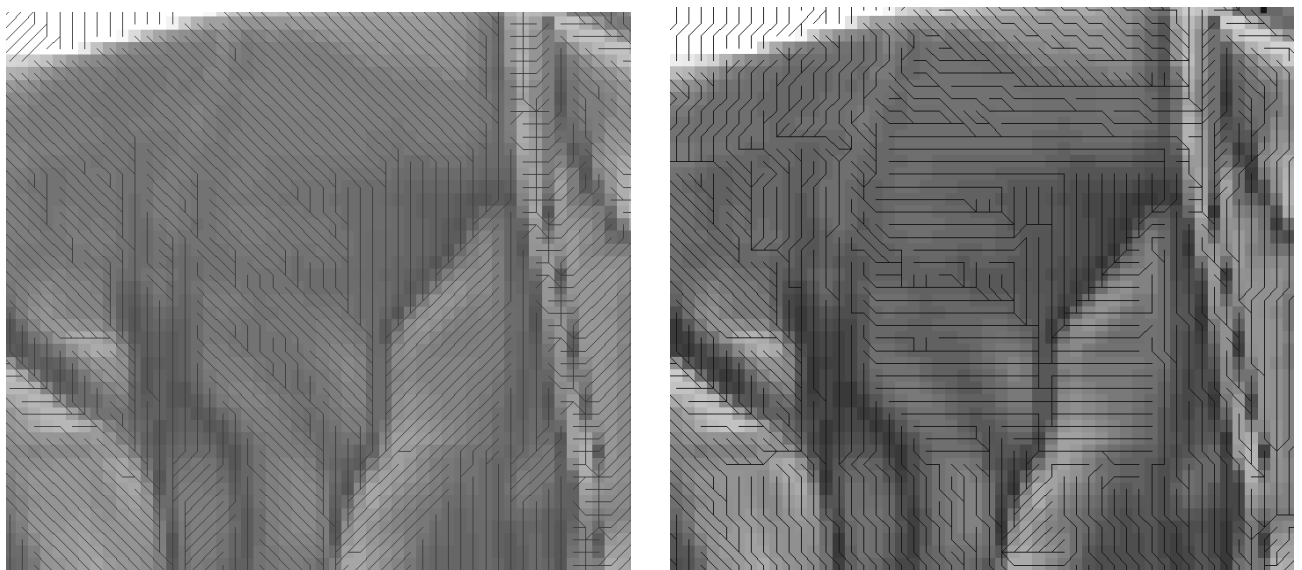


Figure 12 : Illustration des LDD.

(à gauche : selon la pente, à droite : pente et motifs agraires)

3.3 Méthodologie de modélisation de l'érosion hydrique : le modèle LISEM

LISEM est l'abréviation de « Limburg Soil Erosion Model » développé à l'Université d'Utrecht (De Roo et al, 1996). Ce modèle à base physique a été créé afin de mesurer l'impact des bandes enherbées et autres mesures conservatoires à petite échelle sur les sols limoneux du Limbourg. Ce modèle a par la suite été appliqué sur des territoires très variés, en tenant compte de conditions pédo-climatiques diversifiées (différents pays d'Europe, Afrique du Sud, Chine).

LISEM intègre les différents processus mis en œuvre dans le phénomène d'érosion hydrique : pluie, interception, rétention dans les micros dépressions, infiltration, ruissellement de surface,

détachement des particules par la pluie, détachement par la lame ruisselante, dépôt (cf. Figure 13). L'influence du compactage du sol (traces de roues), et des opérations de travail du sol sur les parcelles cultivées sont également pris en compte.

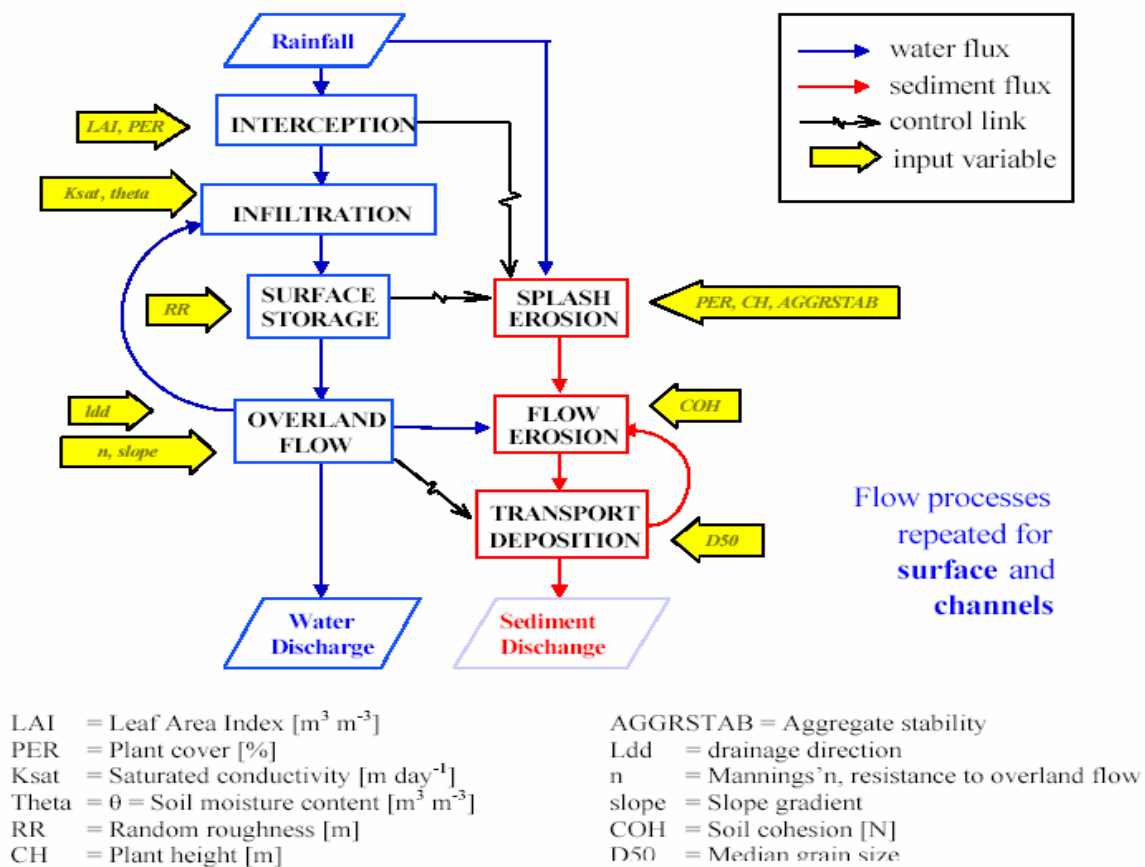


Figure 13 : Organigramme du modèle LISEM.

Source : Jetten, 2008.

Ce modèle est bi-dimensionnel, il intègre le processus d'apport d'eau latéral et celui, vertical, de l'infiltration. Pour ce dernier, plusieurs modules sont proposés dans LISEM. Nous avons choisi dans cette étude celui de Green et Ampt à deux couches (Green et Ampt, 1911). Ce module prend en compte les propriétés hydrodynamiques des deux premiers horizons de sol. Ceci nous permet de distinguer la couche de surface de la matrice, ce qui est intéressant dans le cas des sols sensibles à la battance pour lesquels la formation de croûte de battance provoque une rupture brutale de ces valeurs de surface par rapport au reste du profil. Ce modèle suppose que l'infiltration de l'eau dans la colonne de sol se fait par effet piston. Le front d'humectation séparant la couche de sol saturée de celle non encore mouillée est donc horizontal. Il se déplace verticalement sous l'effet de la capillarité et de la gravité. Les valeurs de conductivité hydraulique pour chaque sol concerné par cette étude ont été déterminées suivant les règles de pédotransfert (Hoffstetter, 2008).

Le routage du ruissellement est calculé par l'équation de l'onde cinématique combinée avec l'équation de Manning (Chow et al, 1988), pour chaque cellule. Ce modèle est couplé à un SIG raster (PC Raster) ce qui permet de modéliser les différents processus cités précédemment de façon spatialisée.

Nous avons procédé à plusieurs simulations dans cette étude afin d'évaluer l'impact de la résolution puis celui du modèle de détermination des chemins de l'eau sur la forme de l'hydrogramme simulé. L'effet de la résolution du MNT sera analysé à travers la comparaison des simulations réalisées aux résolutions de 5 m (MNT CG et MNT IGN), et 20 m, les chemins de l'eau étant calculés avec le

modèle TCRP.

Une deuxième simulation sur la résolution 5 m CG, sur la base de chemins de l'eau calculés suivant la topographie, sera comparée au résultat précédent pour la même résolution pour juger de l'impact de la méthode de calcul des chemins de l'eau sur la forme de l'hydrogramme.

Les propriétés hydrodynamiques des sols nécessaires en entrée du modèle (Hoffstetter, 2008) sont présentés en annexe 2 et 3. La pluie de projet correspond à un événement centennal sur une durée de 45 minutes. Le hyetogramme a été établi avec la formule de Montana sur la base de données Météo-France relevées sur la station de Rouffach, dans le piémont vosgien, dont les valeurs mesurées sont représentatives des orages intenses. L'extrapolation aux fréquences rares est issue de la méthode SHYPRE (Simulation d'hydrogrammes pour la prédétermination des crues) développée au CEMAGREF, (Cernesson et al, 1996 ; Lavabre et al., 1998 ; Arnaud et Lavabre, 2000 et 2002).

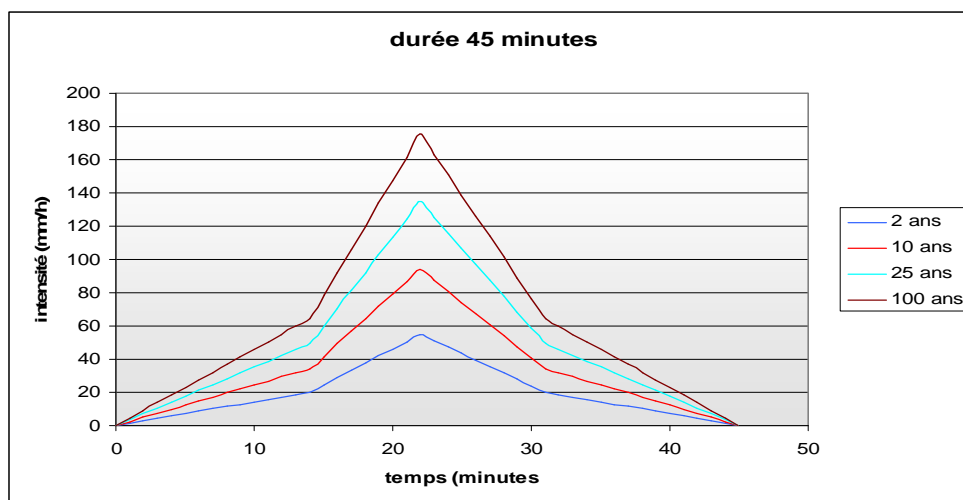


Figure 14 : Hyetogrammes d'après la méthode SHYPRE.

4. Résultats et discussion

4.1 Validation et analyse de sensibilité

4.1.1 Validation spatiale des chemins de l'eau

L'exutoire choisi pour le bassin versant est situé en limite de la zone urbanisée, au point d'entrée du cours d'eau dans le village. Il est important à cette étape de vérifier qu'il ne subsiste sur le LDD aucun autre « puits » que l'exutoire et les points en limite du raster, sinon la délimitation du bassin versant sera amputée du ou des sous-bassins résiduels.

Les bassins versant sont délimités pour chaque résolution de MNT suivant le « LDD topo » et le « LDD TCRP ». Les surfaces de ces bassins versant seront calculées et comparées.

Les surfaces contributives sont calculées en sommant les surfaces réelles des cellules en m^2 successivement à partir du modèle topographique des chemins d'eau puis du modèle avec motifs agraires, et ce pour chaque résolution.

Afin de pouvoir comparer spatialement les valeurs de surfaces contributives amont entre les différentes résolutions, nous avons choisi d'extraire ces résultats sur un semis de points situés sur les chemins de l'eau de la référence.

Ce semis de points a été créé par échantillonnage après seuillage des valeurs de surfaces amont au dessus de $5\,000\,m^2$ (0,5 ha), ceci afin de cibler préférentiellement les axes d'écoulement concentrés, et non pas les zones de ruissellement diffus. Ce semis de points sera ensuite ré-échantillonné aux

différentes résolutions et les valeurs extraites comparées point par point à celle de la référence. Or, pour les petites résolutions (en dessous de 10 m), il se peut que le pixel contenant la valeur maximum (axe du collecteur) soit décalé d'un ou deux pixels par rapport à la référence. On aurait alors un écart de valeur sensible pour un écart spatial peu significatif. Aussi, nous avons fait l'hypothèse que pour les résolutions de 1 m à 5 m, la valeur maximum se trouve dans une bande de 7,5 m autour du point de semis considéré. Cette largeur seuil a été établie de la façon suivante : nous avons considéré comme admissible un décalage spatial maximum d'un pixel de part et d'autre du pixel sélectionné à la résolution de 5 m.

Nous avons en conséquence remplacé la valeur des pixels dans cette bande par la valeur maximum identifiée par fenêtre flottante de 15 m par 15 m. Ce traitement aurait pu générer une confusion pour les points situés à proximité des zones de convergence entre chemins d'eau : les valeurs maximum de deux bras étant comprises dans la fenêtre, l'un des bras se verrait attribuer la valeur maximum de l'autre. Aussi, pour éviter ces sources d'erreurs possibles, nous avons éliminé les points de semis situés sur ces zones de convergence (cf. Figure 15).

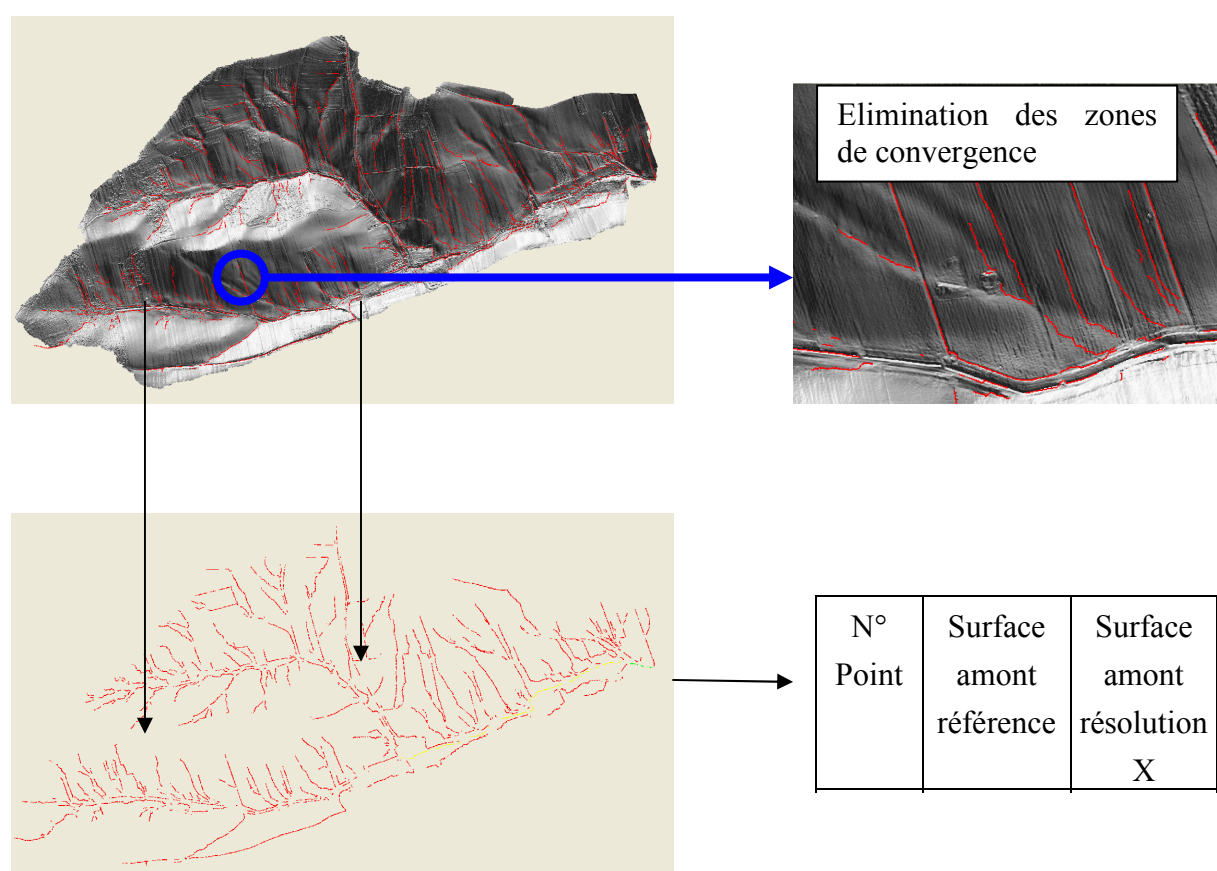


Figure 15 : Schéma de principe de réalisation du semis de points d'échantillonnage.

L'analyse des écarts des valeurs de surface contributive amont entre une résolution donnée et la résolution de référence est un indicateur de la précision spatiale du modèle utilisé. Cette comparaison est réalisée par extraction des valeurs sur le semis de points présenté par la figure 15 ci-dessus. Les résultats sont exposés ci-dessous (cf. Figure 16) pour trois résolutions : 1 m, 5 m et 10 m. Les autres résultats sont présentés en annexe 2.

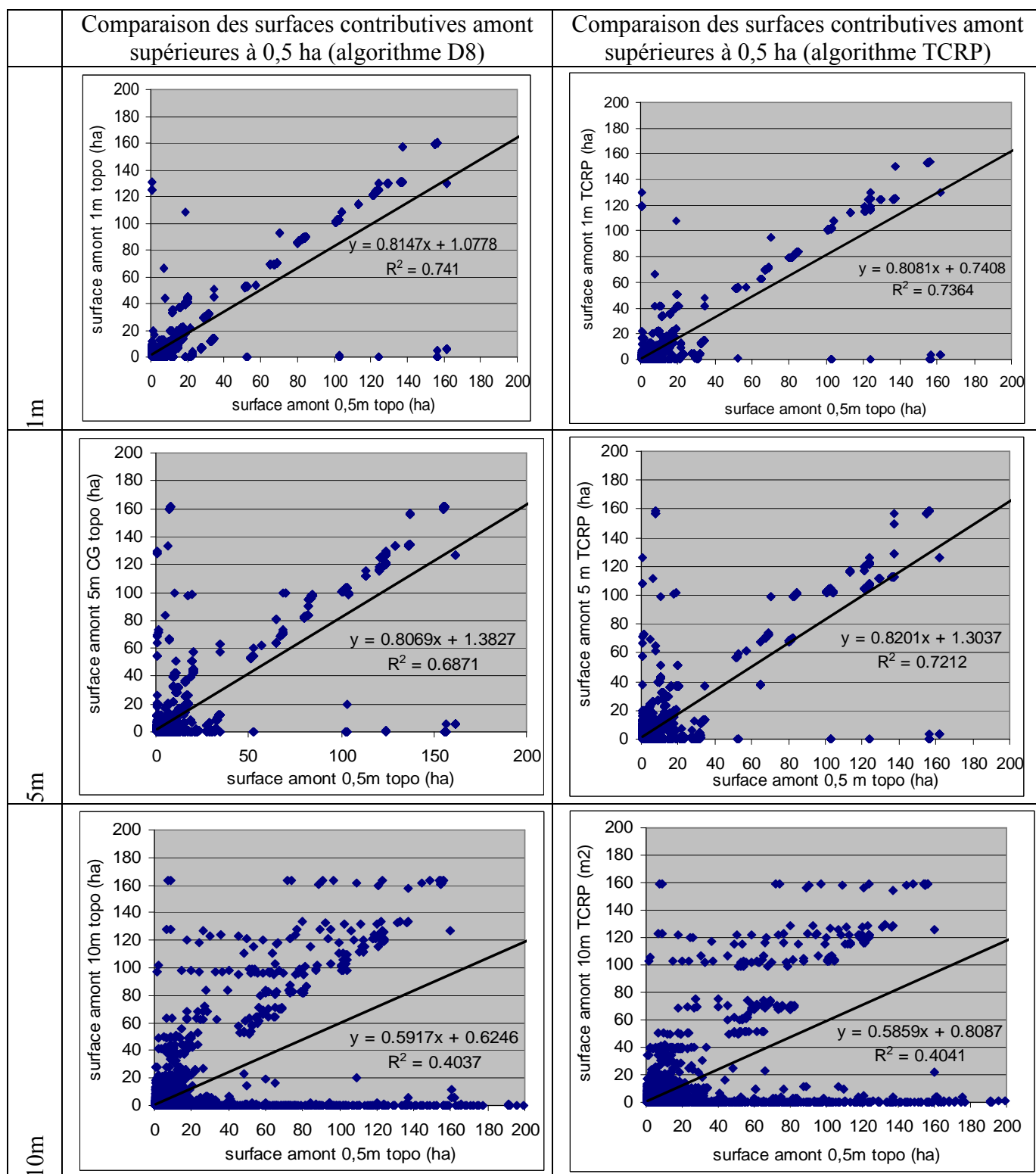


Figure 16 : Graphe des surfaces contributives par rapport à la référence.

Les graphes (Figure 16) montrent une dégradation marquée des correspondances spatiales de surfaces amont dès la résolution de 10 m. Cet étalement vers les fortes valeurs de surfaces amont peut être le résultat d'effet de bord (ce que nous avons cherché à éviter jusqu'à la résolution de 5 m), néanmoins on observe le même type de dispersion des points aux résolutions de 20 m et de 50 m (se reporter en annexe 2). Afin de mettre en relief les disparités entre les différentes résolutions pour les petites valeurs de surfaces amont, nous présentons ci-dessous (cf. Figure 17) les distributions des écarts de surface amont par rapport à la référence.

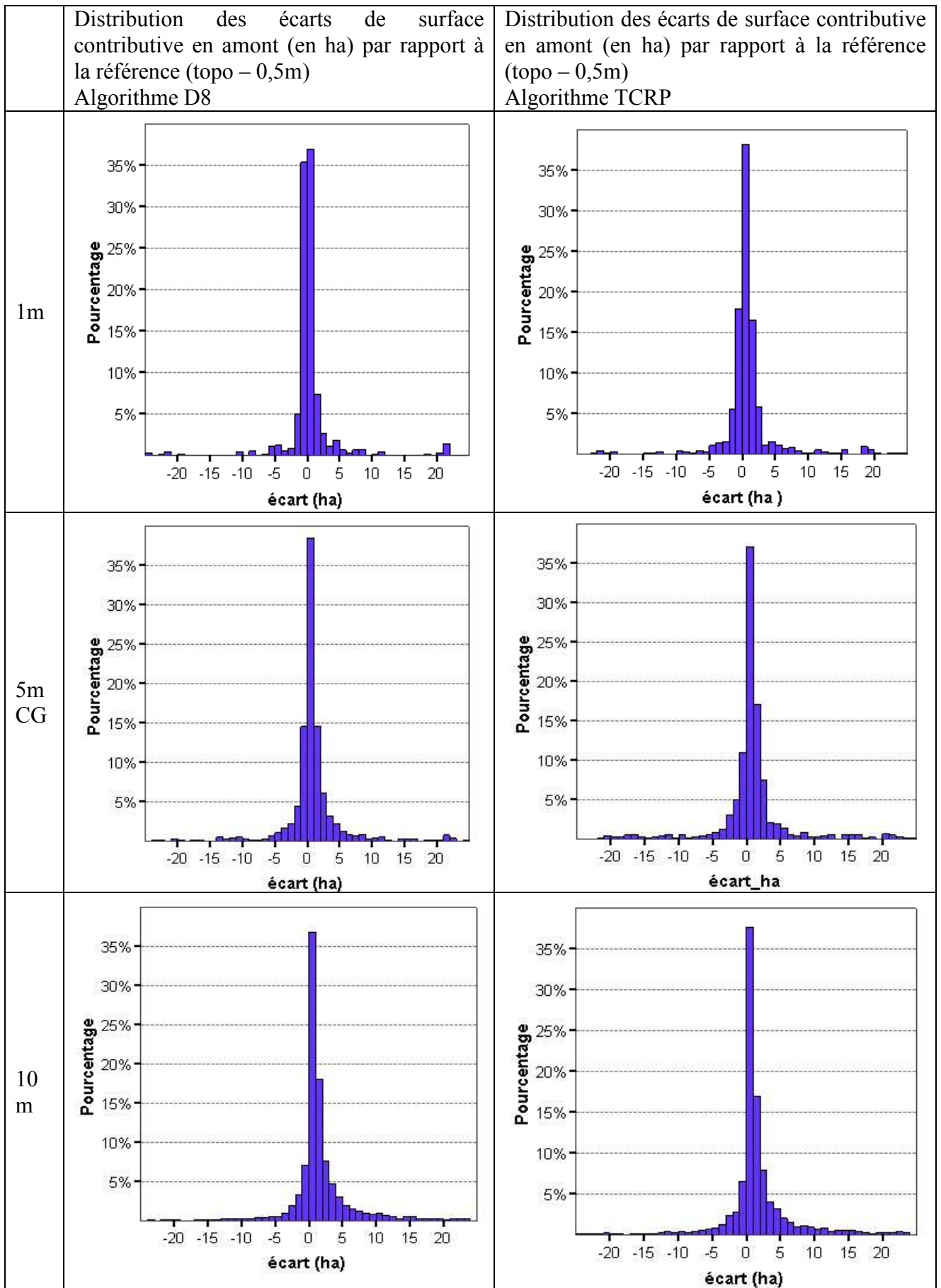


Figure 17 : Distribution des écarts à la référence.

Les distributions des résolutions 2,5 m, 20 m et 50 m sont présentées en annexe 3.

La figure 17 ci-dessus montre que les écarts sont pour la majorité comprises entre 0 et 5 ha. Néanmoins on observe des disparités entre résolutions et surtout des écarts résiduels de l'ordre de 1% pour des surfaces amont supérieures à 20 ha.

A ce stade, il est intéressant de se poser la question suivante : au-delà de quelle surface amont peut-on juger que ces écarts sont inacceptables ?

La surface moyenne des parcelles cultivées sur le bassin versant de l'Ibenbach est de 1,6 ha. Nous avons arrondi à 2 ha et analysé les écarts relevés au regard de ce seuil (cf. Figure 17). A la résolution de 1 m (algorithme D8), 17% des points du semis présentent un écart sur la valeur de la surface contributive amont supérieure à 2 ha. A la résolution de 10 m, ceci est le cas sur plus de 40 % des points échantillonnés.

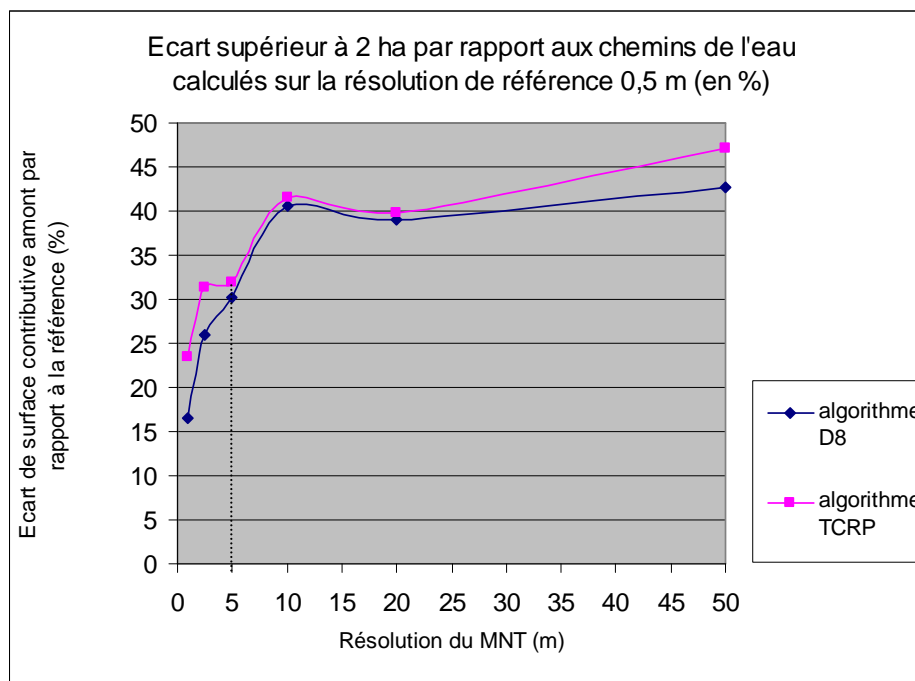


Figure 18 : écarts supérieurs à 2 ha en fonction des résolutions et du modèle chemins de l'eau.

Ce graphe montre un décrochement autour de la résolution de 5 m, quel que soit le modèle utilisé pour la détermination des chemins de l'eau. Il est intéressant de noter qu'à partir de la résolution de 10 m, les écarts supérieurs à 2 ha sont sensiblement les mêmes. En conséquence, la détermination des chemins de l'eau à l'échelle de la parcelle ne semble à priori pas pertinente pour les résolutions supérieures à 10 m.

L'un des objectifs de cette étude étant d'apporter une réponse claire concernant le degré de précision des données topographiques requis pour la mise en œuvre de mesures préventives ou curatives, nous avons souhaité mettre en perspective ces résultats avec les gammes de fonctionnement de ces mesures.

Le schéma suivant expose les plages de surfaces pour lesquelles les différentes mesures limitant l'érosion hydrique sont efficaces (cf. Figure 18). La classification proposée ci-dessous tient compte du positionnement spatial des mesures dans le bassin versant ainsi que des surfaces drainées en amont. Ces données ont été établies par avis d'expert (Ouvry et Van Dijk, 2008).

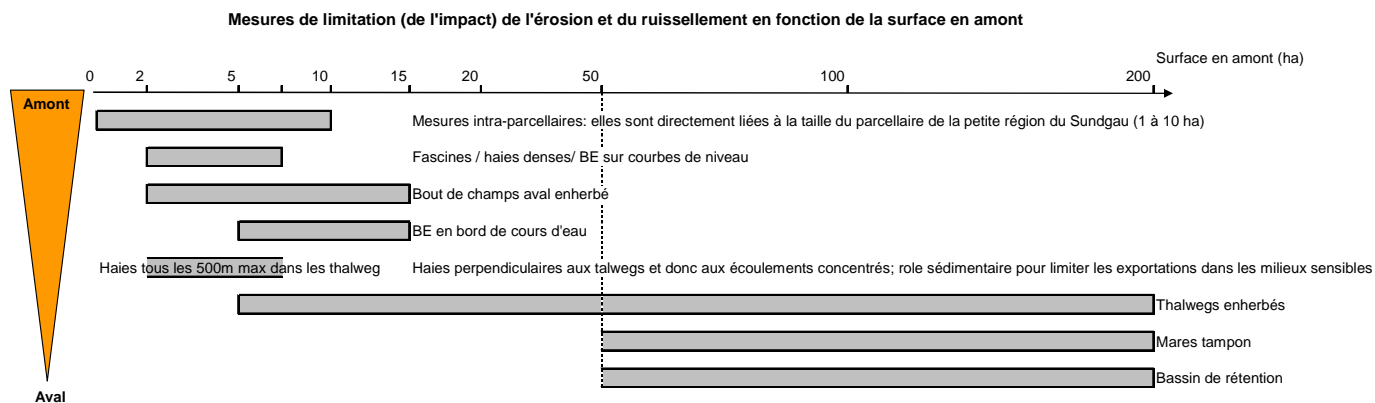


Figure 19 : Plages de fonctionnement des mesures contre l'érosion hydrique.

Source : Ouvry et Van Dijk, 2008. (Avis d'expert, com. pers.)

Nous avons donc décomposé nos valeurs d'écart en fonction de ces gammes de surfaces. Les deux figures ci-dessous (cf. Figure 19 et 20) illustrent cette décomposition en différenciant les résultats obtenus selon le mode de calcul des chemins de l'eau.

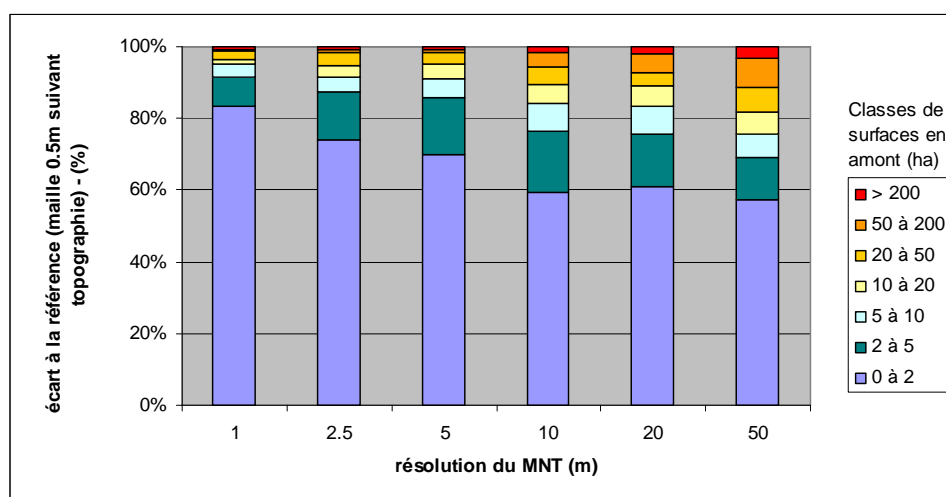


Figure 20 : Ecarts de surface amont selon les résolutions de MNT (algorithme D8).

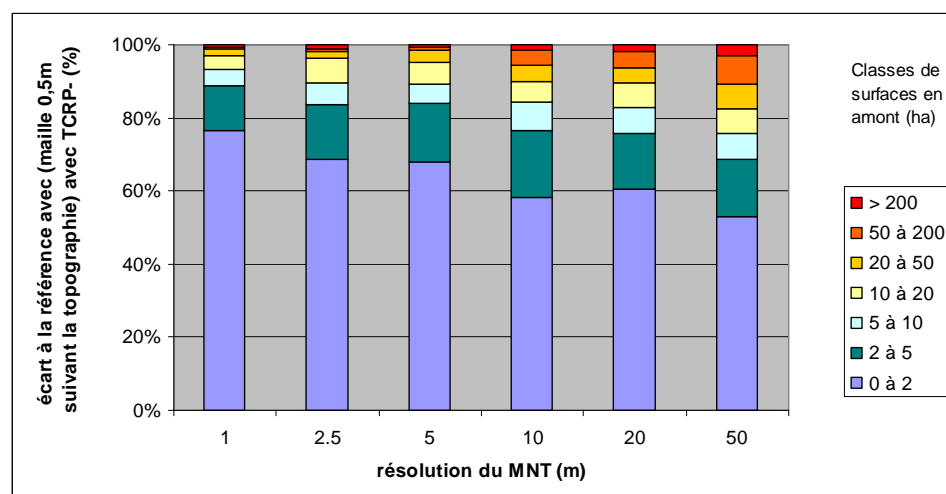


Figure 21 : Ecarts de surface amont selon les résolutions de MNT (algorithme TCRP).

Ces figures illustrent la dégradation de la précision spatiale en fonction de la diminution de la

résolution du MNT sur lequel le calcul des surfaces contributives amont est réalisé.

Cette analyse plus fine confirme le seuil existant à la résolution de 5 m constaté précédemment, indépendamment du mode de calcul des chemins de l'eau. En effet, au-delà de 5 m, la proportion d'écart concernant des surfaces amont supérieures à 50 ha augmente nettement.

Ainsi, nous pouvons déduire de ces résultats que la précision minimale requise pour la mise en œuvre d'aménagements de type fascines, bandes enherbées et chenaux enherbés, voire à la limite les mares tampon, en amont du bassin versant est de 5 m. Au-delà, les écarts concernent des surfaces au moins équivalentes à celles pour lesquelles les aménagements sont prévus, il n'est donc pas pertinent de s'appuyer sur des résultats issus de ces données topographiques.

Faute d'avoir à disposition des données topographiques précises, les acteurs procèdent fréquemment en ré-échantillonnant le MNT à 50 m issu de l'IGN à une résolution plus fine : 20 m voire 10 m. La figure 21 ci-dessous expose les résultats obtenus pour :

- le ré-échantillonnage du MNT 0,5m CG vers 5m CG et 50m CG,
- le ré-échantillonnage du MNT 50m IGN vers 5m IGN.

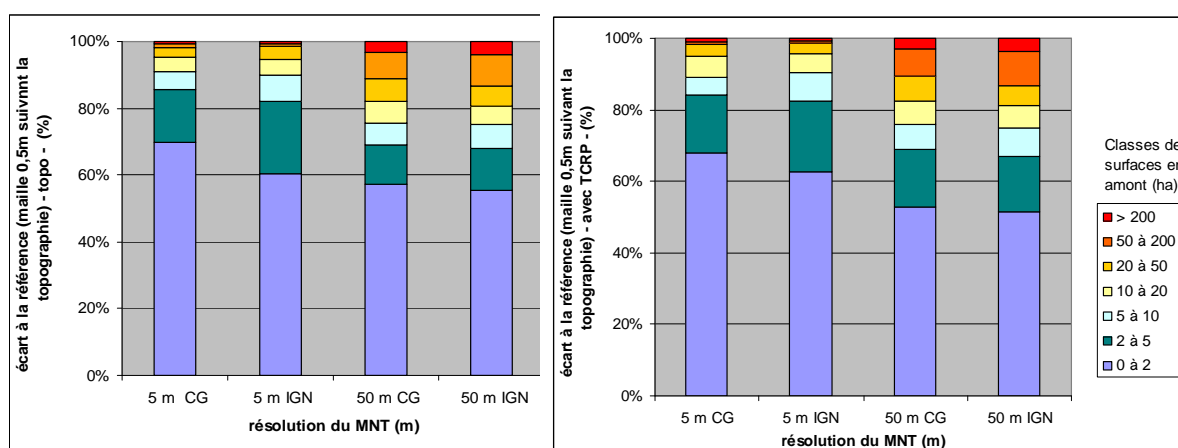


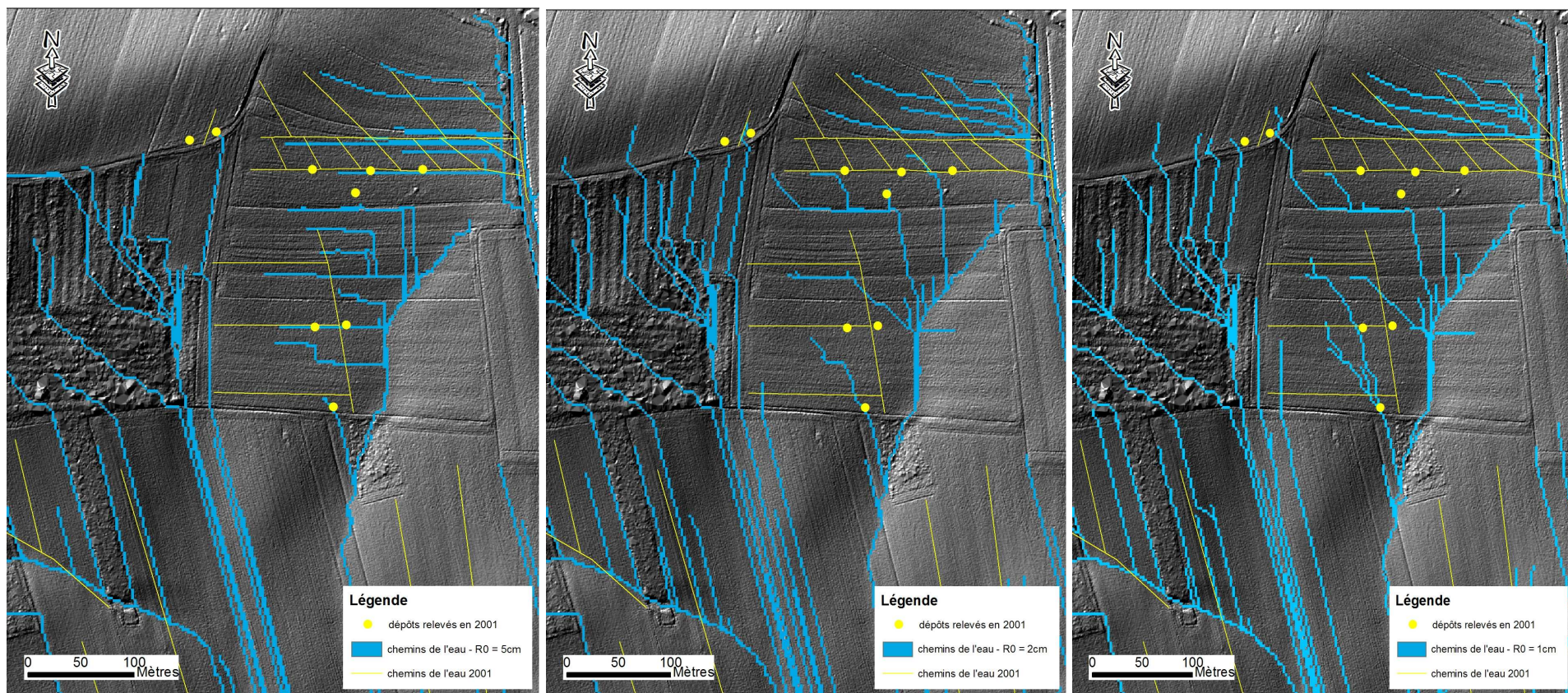
Figure 22 : écarts et MNT ré-échantillonnés (gauche : suivant la topo – droite : avec TCRP).

Dans les deux cas, le MNT issu de l'IGN donne de moins bons résultats que ceux issus du MNT 0,5 m initialement. Cependant on observe que les résultats sur la résolution de 5m sont assez proches, qu'il s'agisse du MNT issu du MNT 50 m ou de celui issu du MNT 0,5m.

Ce constat est à mettre en relation avec la méthodologie développée : nous avons ajouté des informations supplémentaires au MNT 50 m en enfonçant artificiellement le réseau de fossé et chenaux dans le MNT. Ce procédé contribue à créer un réseau fixe qui sera pris en compte quelque soit la résolution.

4.1.2 Analyse de la sensibilité du modèle TCRP au paramètre rugosité orientée

La modélisation des chemins de l'eau avec le modèle TCRP permet l'intégration spatiale de la rugosité orientée pour les parcelles cultivées. Ce facteur, qui influe sur la détermination du sens d'écoulement de l'eau, est susceptible de varier dans le temps entre la date du semis et la date de l'événement que l'opérateur souhaite modéliser. Nous comparerons à cet effet les chemins d'eau obtenus pour une résolution donnée en faisant varier la rugosité orientée entre une valeur correspondant au résultat du travail du sol juste après le semis, et deux valeurs plus faibles représentatives de la dégradation progressive des motifs agraires avec la pluie et le temps. Ce test a été mené à la résolution de 2,5 m sur une zone cultivée où le sens de travail du sol est perpendiculaire à la pente topographique (cf. Figure 23).



$R_0 : 5 \text{ cm}$ (juste après le semis)

$R_0 : 2 \text{ cm}$ (dégradation des motifs agraires)

$R_0 : 1 \text{ cm}$ (surface très dégradée)

Figure 23 : Chemins de l'eau en fonction de la rugosité orientée R_0 .

La figure 23 ci-dessus illustre l'importance pour l'opérateur qui souhaite modéliser les chemins de l'eau de rentrer des valeurs pertinentes de rugosité orientée en fonction de la période qu'il souhaite modéliser. Sur ce MNT à 2,5 m, on constate le phénomène que l'on pouvait prévoir du fait de la loi de probabilité appliquée pour le modèle TCRP : les motifs linéaires sont moins prépondérant par rapport à la pente lorsque la rugosité orientée diminue. Néanmoins, sur ce MNT, on note (pour la rugosité de 1 cm) que les dérayures sont suffisamment profondes pour être intégrées dans le MNT comme des dépressions naturelles qui vont guider le ruissellement.

Les chemins de l'eau relevés après l'événement du 24 mai 2001 montrent que les motifs agraires ont bien guidé le ruissellement dans ce secteur, le tracé approche celui calculé avec TCRP pour une rugosité orientée de 5 cm.

4.1.3 Analyse de l'impact de la résolution sur la quantification des volumes de stockage dans les dépressions du terrain naturel

L'écoulement du ruissellement sur les versants suit les lois de la gravité, aussi tant que les dépressions naturelles rencontrées par les filets d'eau ne sont pas pleines, le flux entrant va contribuer au remplissage jusqu'au moment où le point de débordement sera atteint. Ce processus est illustré par la figure 23 ci-dessous.



Figure 24 : Stockage dans les dépressions du terrain.

Source : Van Dijk, 2005.

La capacité de stockage ainsi que la surface effective du bassin versant de l'Ibenbach ont été calculées pour chaque résolution. Les résultats montrent une faible variation des surfaces de bassin versant entre résolutions, une disparité apparaît à 20 m et 50 m entre la surface calculée selon le mode de calcul des chemins de l'eau (topographie ou TCRP). A ces résolutions, un changement de direction de l'eau va induire un gain ou une perte de surface conséquente pour le bassin versant.

Par ailleurs, en ce qui concerne la capacité de stockage dans les dépressions du terrain naturel, on constate peu de variation en fonction de la résolution, les valeurs étant proches d'un ratio moyen de 120 m³ stockés par km². Ces résultats sont exposés dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 : Surfaces et capacités de stockage du bassin versant

Résolution du MNT (m)	Surface bassin versant (km ²) (calcul suivant topographie)	Surface bassin versant (km ²) (calcul suivant TCRP)	Capacité de stockage dans les dépressions du terrain (m ³) (suivant TCRP)
0.5	4.23	-	4941
1	4.23	4.21	5139
2.5	4.23	4.22	5074
5	4.25	4.23	5148
10	4.22	4.15	5031
20	4.2	4.07	5142
50	4.23	4.08	4798

4.2 Exemple d'application de la modélisation hydraulique des transferts

Comme cela a été expliqué dans la méthodologie développée au chapitre précédent, nous avons procédé à plusieurs simulations de modélisation de la transformation pluie / ruissellement avec LISEM, et ce à deux résolutions différentes : 5 m et 20.

4.2.1 Incidence de la résolution sur les volumes produits et transférés à l'aval

Pour ces simulations les paramètres sols et conditions initiales sont bien évidemment strictement identiques, on se reportera en annexe 4 et 5 pour plus de détails.

Les résultats de la modélisation pour une pluie de projet centennale sur une durée de 45 minutes sont illustrés par la figure 24 ci-dessous.

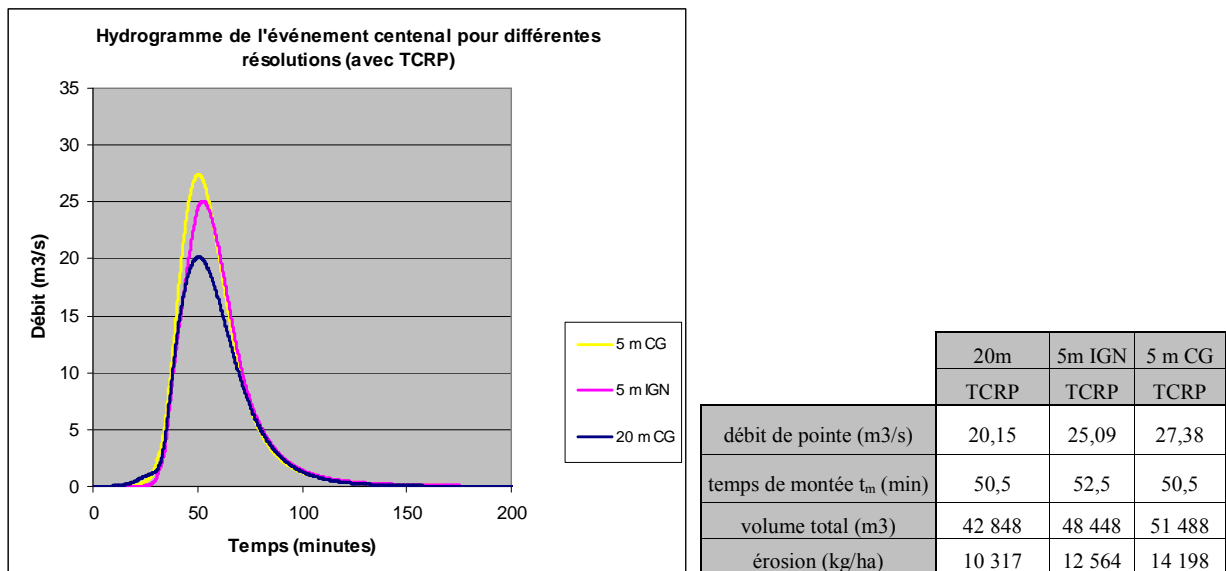


Figure 25 : Incidence de la résolution sur l'hydrogramme.

On constate que plus la résolution est précise, plus le débit de pointe et le volume sont élevés. Pour une même pluie, la résolution de 20 m va plus infiltrer que celle de 5 m. Nous avons supposé que cette différence était liée à la perte d'hétérogénéité du coefficient de Manning lors du ré-échantillonnage. De fait, à la résolution de 5 m, les chemins sont pris en compte comme une occupation du sol et se voient donc affecter un coefficient de Manning faible. Lorsque le parcellaire est ré-échantillonné à 20 m, les chemins disparaissent au profit des plus grandes surfaces, en

l'occurrence des parcelles cultivées dont le coefficient de Manning est plus élevé. L'augmentation du coefficient de Manning provoque une diminution des vitesses d'écoulement, ce qui pourrait contribuer à favoriser l'infiltration.

Pour vérifier ce point, nous avons modifié les valeurs du coefficient de Manning pour la résolution de 5 m, en prenant une valeur moyenne de surface cultivée, et procédé à une nouvelle simulation. Il s'avère que cela n'induit pas de changement significatif sur la forme de l'hydrogramme.

Une autre explication peut provenir du lissage des pentes sur un certain nombre de cellules pour la résolution de 20 m (voir figure 25 ci-dessous). Les distributions de pentes comparées au pas de 1% pour les différentes résolutions (5 m CG, 5 m IGN, 20 m) montrent une sous estimation significative des surfaces dont la pente est supérieure à 12 % pour les MNT 5 m IGN, et 20m. Ceci induit une diminution des vitesses de ruissellement, ce qui favorise l'infiltration et diminue la production de ruissellement pour ces résolutions.

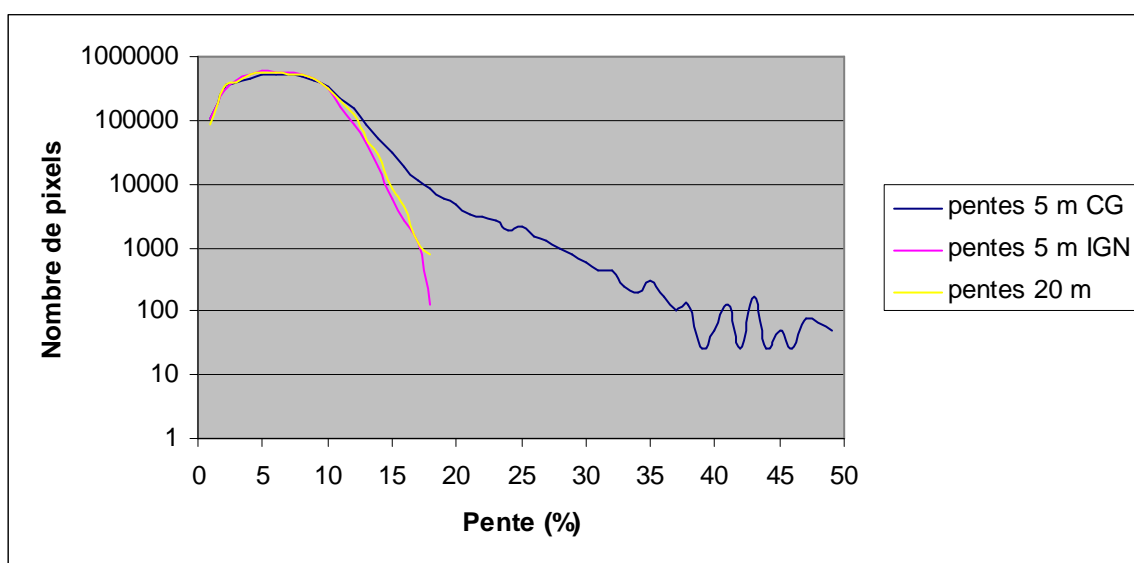


Figure 26 : Distribution des pentes pour les MNT de 5 m et 20 m.

La figure 26 ci-dessous reprend les hydrogrammes calculés par LISEM et comporte l'hydrogramme de projet retenu pour l'événement centennal qui a permis le dimensionnement du bassin de rétention de Landser.

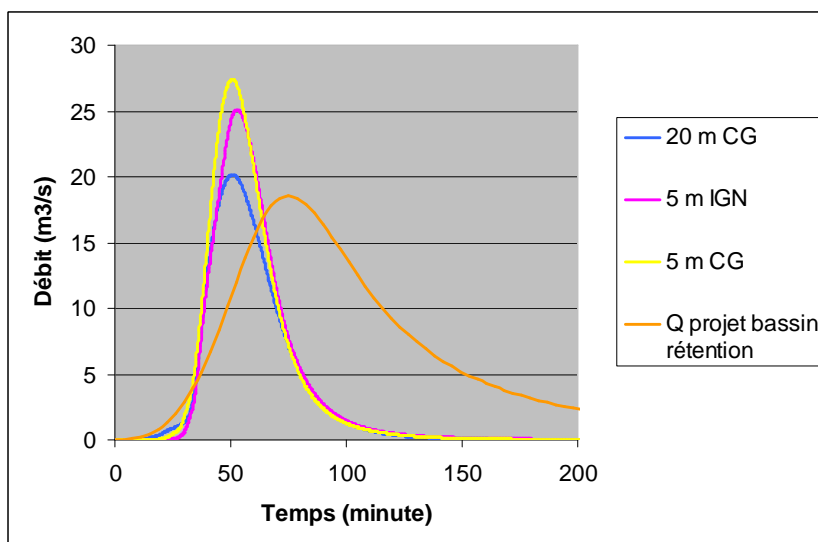
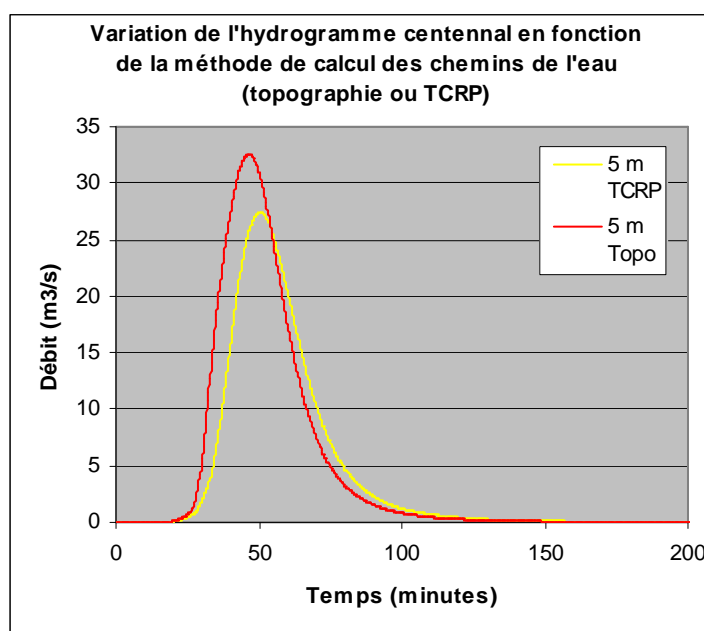


Figure 27 : Comparaison hydrogrammes de projet et calculés

L'hydrogramme de projet a une forme plus étalée, le débit de pointe est plutôt plus faible que ceux calculés par LISEM, mais le volume total est supérieur. Cette comparaison pointe la nécessité de calage du modèle sur différents événements pluvieux.

4.2.2 Incidence de la méthode de calcul des chemins de l'eau sur l'hydrogramme

Nous avons vu précédemment que la méthode de calcul des chemins de l'eau avait un impact sur la surface du bassin versant. De fait, la surface prise en compte à 5 m avec TCRP est légèrement inférieure à celle selon le modèle topographique. Par ailleurs, le modèle TCRP forçant les écoulements à suivre les motifs agraires, dans le cas où ceux-ci ne sont pas dans le sens de la pente, augmente la longueur du chemin hydraulique, d'où l'augmentation du temps de montée de l'hydrogramme comme l'illustre la figure 28 ci-dessous. La diminution des pentes et donc des vitesses d'écoulement contribue à diminuer la capacité de transport et d'érosion sur les chemins de l'eau.



	5 m CG TCRP	5 mCG TOPO
débit de pointe (m3/s)	27,38	32,51
temps de montée t_m (min)	50,5	46,5
volume total (m3)	51 488	57 880
érosion (kg/ha)	14 198	15 724

Figure 28 : Impact des chemins de l'eau sur l'hydrogramme

4.3 Conclusion sur la résolution à utiliser en fonction des applications

Au terme de cette étude, il semble réaliste d'établir des seuils de résolution des données d'entrée pour les modèles selon le type d'aménagement à mettre en œuvre.

4.3.1 Pour les mesures d'aménagement préventif en amont :

Cette gamme de mesures regroupe les bandes enherbées, fascines, petits bassins de rétention distribués (mares tampons). Nous avons pu établir précédemment que les résolutions inférieures à 5 m donnaient les résultats de localisation spatiale des chemins de l'eau les mieux à mêmes de permettre un positionnement fin des ouvrages.

Pour ce qui est de la modélisation avec LISEM des volumes produits et transférés à l'aval, ces résolutions fines permettent d'intégrer comme occupation du sol des éléments structurant du paysage

comme les chemins, les haies... Les paramètres physiques liés à la nature de l'occupation du sol sont ainsi définis par unités homogènes proches de la réalité.

4.3.2 Pour les mesure curatives :

Il s'agit ici d'aménagements plus conséquents de protection comme les bassins de rétention. Pour ces ouvrages, la précision des données topographiques nécessaire à leur positionnement est moins cruciale, puisqu'ils sont situés en aval du bassin versant sur des axes d'écoulement déjà très concentrés et donc identifiés correctement quelle que soit la résolution.

Par contre, la résolution a un impact non négligeable sur la quantification des volumes produits. Or cette donnée est la clef du dimensionnement de l'ouvrage. L'utilisation de données topographiques au-delà de la résolution de 5 m tendrait à sous estimer le débit de pointe et le volume, ce qui n'est pas sécuritaire pour les aménagements.

Conclusion et perspectives

La gestion intégrée de la problématique induite par l'érosion hydrique des bassins versants cultivés initiée actuellement par les acteurs locaux, représentants de la profession agricole et monde de la recherche nécessite la création d'outils de modélisation afin de juger de l'efficacité du type d'aménagement à mettre en œuvre.

Cette étude nous a permis de montrer qu'il existe des seuils de précision des données topographiques au-delà desquels il ne semble plus pertinent de les utiliser comme données d'entrées de modèle.

De façon générale, les résolutions en dessous de 5 m conviennent pour tous les types de mesures, préventives ou curatives. Utiliser des données topographiques plus précises que la maille de 5 m nous a confronté aux limites du modèle LISEM. En effet, sa structure actuelle ne permet pas d'intégrer des objets linéaires fins comme les cours d'eau ; celle-ci ne peut actuellement dépasser 80% de la taille d'un pixel, or pour une résolution fine (1 m par exemple) la largeur maximale sera de 0,80 m, ce qui n'est pas représentatif de la réalité dans de nombreux cas de figure. Ceci met l'accent sur une des limites actuelles de LISEM. Un axe de développement apparaît donc possible pour adapter la structure du modèle à la représentation d'objets linéaires en mode raster.

L'équipement en stations de mesures de plusieurs bassins versant proches de celui de l'Ibenbach contribue à l'acquisition de données localisées en continu qui permettront le calage de ces modèles sur différentes situations d'aménagement et différents phénomènes météorologiques.

Résumé

L'érosion hydrique des bassins versant cultivés périurbains commence à être identifié comme un risque naturel distinct de celui des inondations. Un partenariat d'acteurs variés (recherche, acteurs du développement des territoires, profession agricole) est à l'initiative du développement d'outils de modélisation performants pour la protection des sols et des zones urbanisées. De nouveaux outils permettant la détermination spatiale précise des chemins de l'eau sont à cet égard nécessaires.

Cette étude vise à mettre en évidence la précision de données topographiques requise pour la modélisation de l'aléa en fonction du type d'aménagement projeté. Pour cela nous analyserons ici l'impact de la résolution des données topographique sur la détermination spatiale des chemins de l'eau et sur la quantification des volumes produits et transférés à l'aval d'un bassin versant.

Des prescriptions concernant les seuils de précision adapté sont élaborées afin d'aider les acteurs dans la détermination de leurs besoins en terme de données sources.

Mots-clés : érosion hydrique, chemins de l'eau, résolution des données topographiques, modèle pluie-infiltration-débit.

Summary

Muddy flows resulting from soil erosion in cultivated catchments near built-up area are now identified as a natural risk, distinct from floods. In the Alsace, a partnership of various stakeholders from different fields (research, rural and urban land management and agriculture) is at the basis of the implementation of high quality modelling tools to serve soil conservation and urban protection. New tools permitting the accurate spatial determination of runoff flow paths are essential in this respect. This work aims at identifying the topographic data precision needed to accurately predict runoff flow paths. The required data precision was analysed taking into account the typical position of control measures in the landscape using the upstream area concept. The sensitivity of spatial runoff patterns and runoff volume to topographic data resolution was analysed. Results provide guidelines and recommendations - useful for end-users of spatial models - on the resolution of topographic data needed depending on the kind of measure.

Keywords : soil erosion, runoff pathways, topographic data resolution, rainfall-infiltration-runoff model.

Bibliographie :

Ambroise B., 1999. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. *Editions HGA, Bucarest.*

Arnaud P., Lavabre J., 2000. La modélisation stochastique des pluies horaires et leur transformation en débits pour la prédétermination des crues. *Revue des Sciences de l'Eau, (13/4) :441-462.*

Arnaud P., Lavabre J., 2002. Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency Estimation. *Water Resources Research, 38 (6), 11.1-11.11.*

Augeard B., 2006. Mécanismes de genèse du ruissellement sur sol agricole drainé sensible à la battance. Etudes expérimentales et modélisation. Thèse ENGREF - 31 mars 2006.

Auzet A.V, 1987. L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture - Aspect agronomiques. Ministère de l'Environnement, Ministère de l'Agriculture et de la Forêt. 1990.

Auzet A.V, 1990. L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture - Aspect aménagements. Ministère de l'Environnement, Ministère de l'Agriculture et de la Forêt. 1990.

Cerdan O., 2001. Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivés. Thèse Université d'Orléans.

Cernesson F., Lavabre J., Masson J.-M., 1996. Stochastic model for generating hourly hyetographs. *Atmospheric Research, 42, 1-4 pp.*

Chow V. T., Maidment D. R., Mays L. W., 1988. *Applied Hydrology.* McGraw-Hill, 572 pp.

De Roo A.P.J., Wesseling C.G., Ritsema C.G., 1996. LISEM : a single event physically-based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I : Theory, input and output. *Hydrological processes 10 (8) : 1107 - 1119 pp.*

Dunne T., Black R.D., 1970. An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resour. Res. 6(2), 478-490 pp.*

Fiches érosion, 2008. AREAS, Chambres d'agriculture de Seine – Maritime et de l'Eure

Green W.H., Ampt G. A. 1911. Studies on soil physics : flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci. 4, 1-24 pp.*

Hofstetter E., 2008. Sensibilité d'un outil de modélisation du ruissellement et de l'érosion à la qualité des données sols. *Mémoire de Master – Université Louis Pasteur de Strasbourg.*

Horton R.E., 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Amer. Geophys. Union* 14, 446-460 pp.

Jenson S.K., Domingue S.O., 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for Geographic Information System analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11) : 1593 - 1600 pp.

Jetten V., 2008. LISEM Manuel – Université d'Utrecht - <http://www.itc.nl/lisem/>

Lavabre J., Arnaud P., Masson J.-M., Folton N., 1998. Apport de la modélisation de la pluie en débit pour la connaissance de la ressource en eau et la prédétermination des crues. Congrès de la Société hydrotechnique de France, 25e journées de l'hydraulique, Chambéry, 15-18/09/98, Publications SHF, tome 2 : 349-358 pp.

Ludwig B., Boiffin J., Chadoeuf J., Auzet A.V., 1995. Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments. *Catena* 25 : 227-252 pp.

Morris D., Heerdegen R., 1988. Automatically derived catchment boundaries and channel networks and their hydrological applications. *Geomorphology* (1), 131-141 pp.

Party, J.P., Koller R., Sauter J., Burtin M. L., 2000. Guide des sols d'Alsace n°11, Sundgau et Jura Alsacien. Région Alsace, Sol Conseil.

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

Takken I., Govers G., Steegen A., 2001. The prediction of runoff flow directions on tilled fields. *Journal of Hydrology* 248 (1-4) : 1-13 pp.

Takken I., Jetten V., Govers G., Nachtergaele N., et Steegen A., 2000. The effect of tillage-induced roughness on runoff and erosion patterns. *Geomorphology* 37 (2001) 1-14 pp.

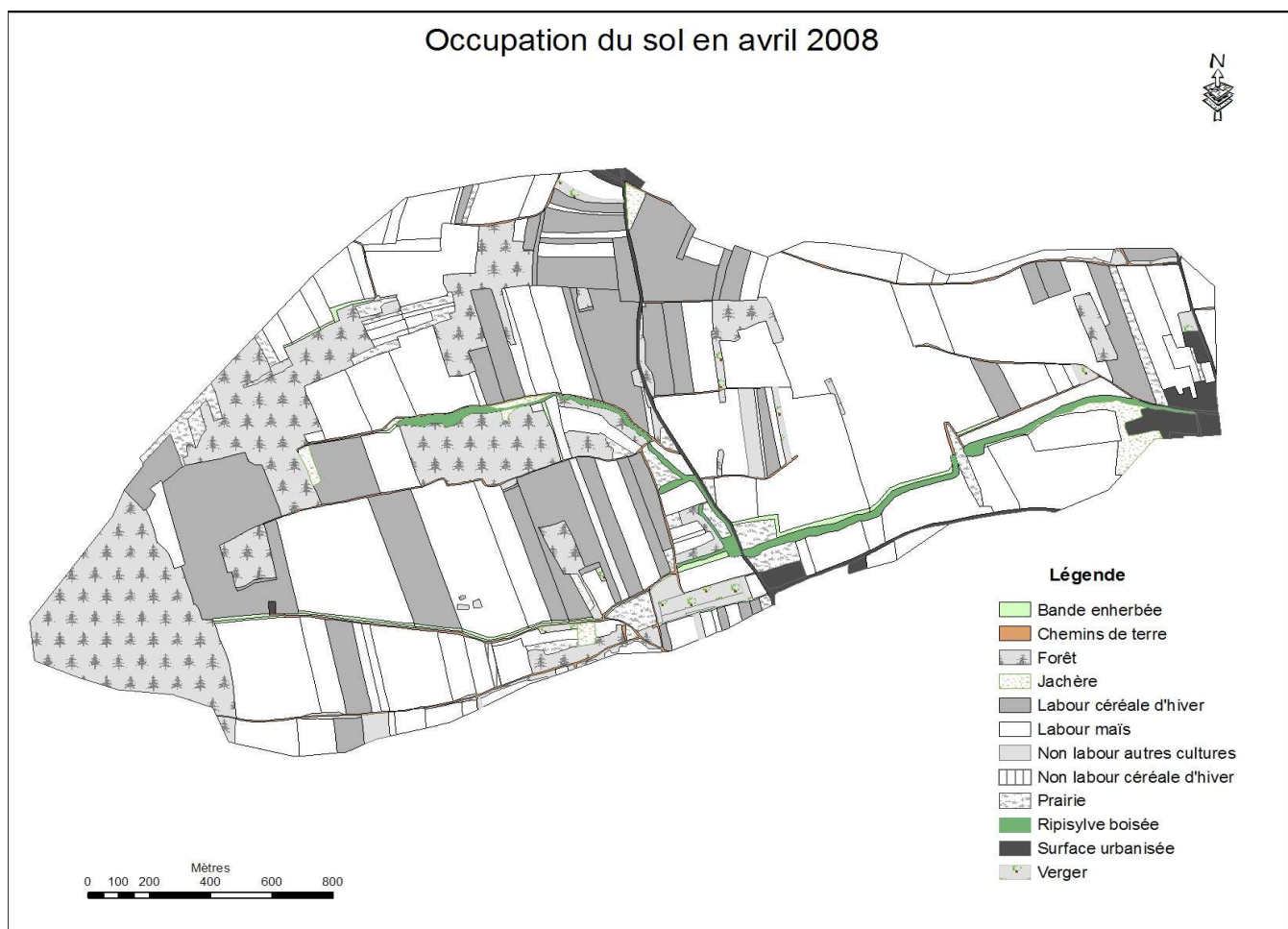
Van Deursen W.P.A., 1995. Geographical Information Systems and Dynamic Models - Development and application of a prototype spatial modelling language. PhD-Thesis. 19 mai 1995. Université d'Utrecht, Pays-Bas.

Van Dijk P.M., Van der Zijp M., Kwaad F. J. P. M., 1996. Soil erodibility parameters under various cropping systems of maize. *Hydrological Processes* 10 (1996) 1061-1067 pp.

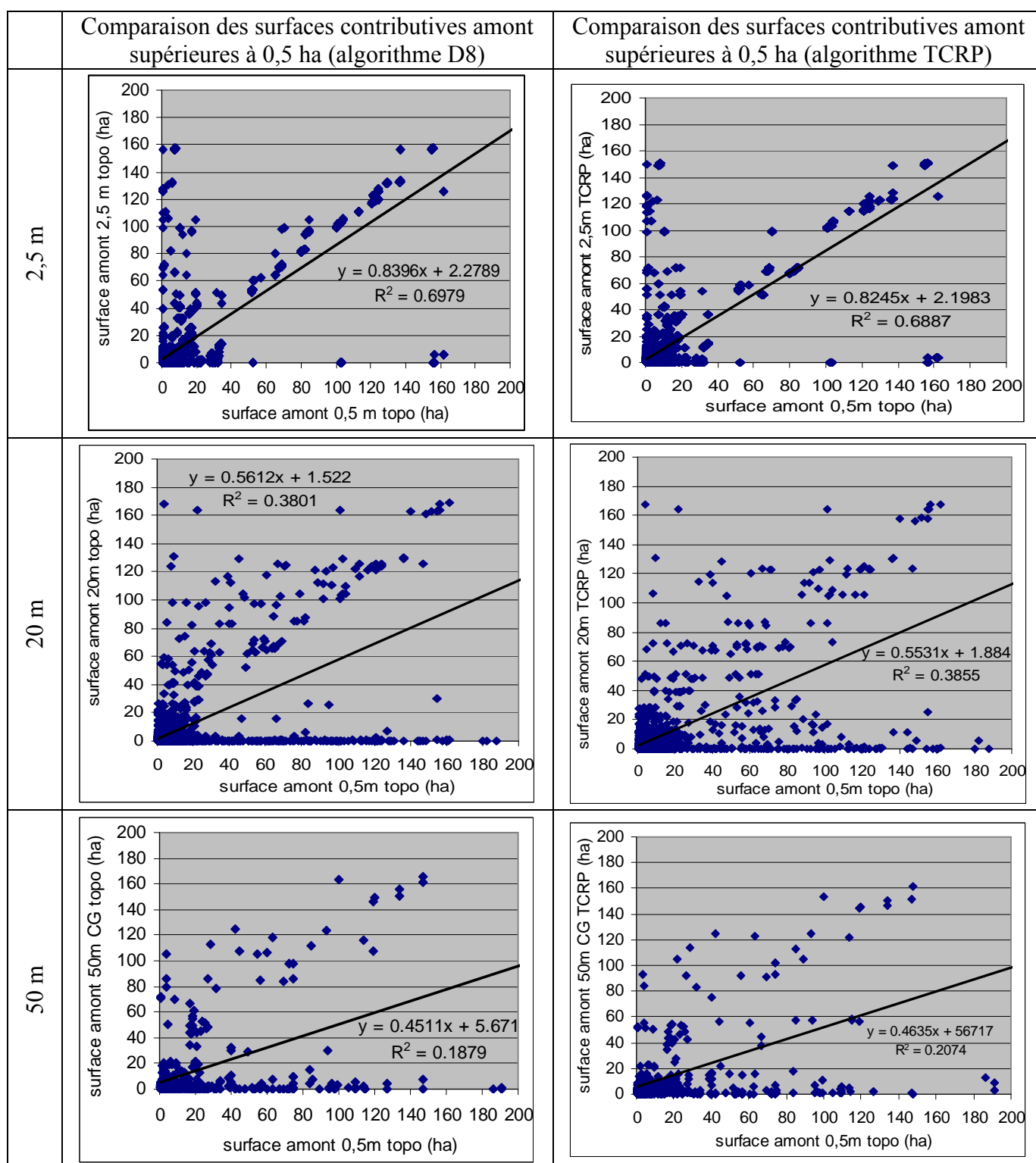
Van Dijk P.M., Auzet A.V., Lemmel M., 2005. Rapid assessment of field erosion and sediment transport pathways in cultivated catchments after heavy rainfall events. *Earth Surf. Process. Landforms* 30 (2005), 169 - 182 pp.

Liste des annexes

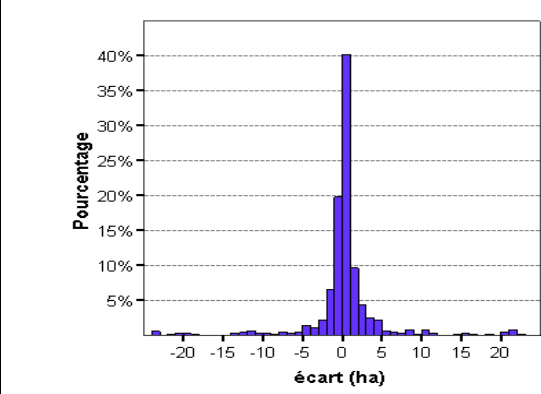
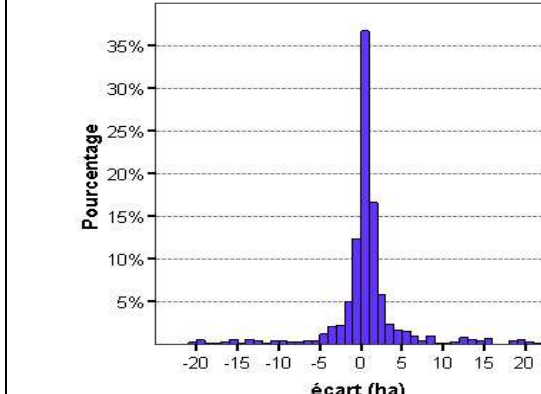
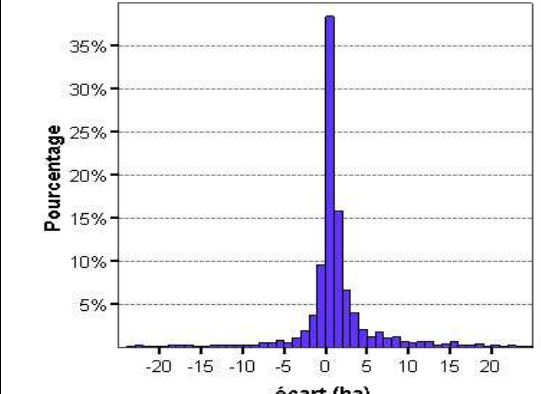
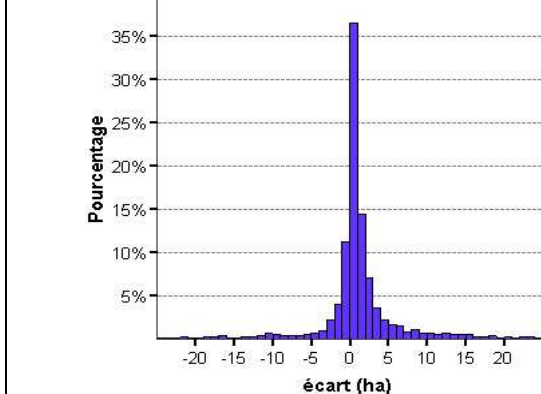
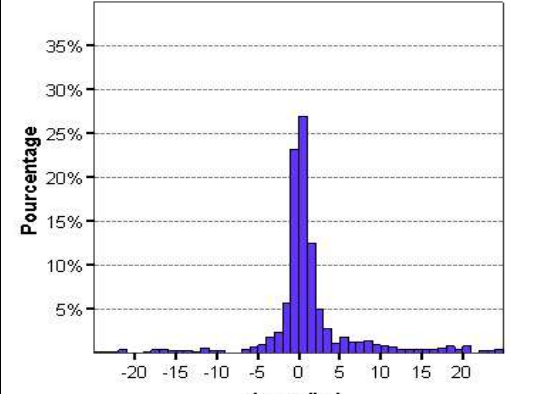
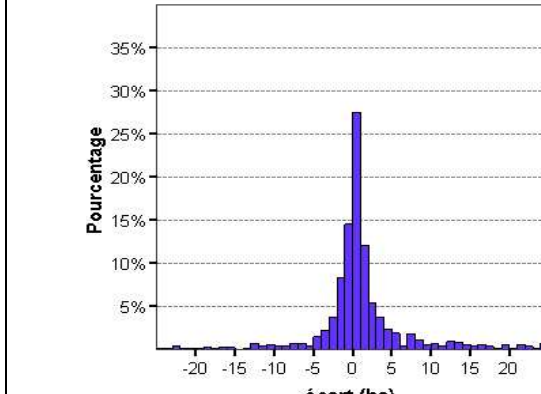
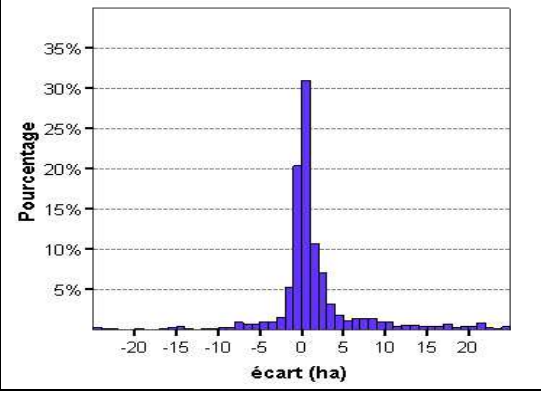
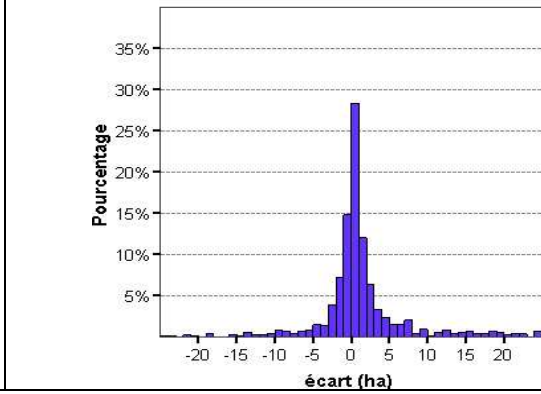
<i>Annexe 1 : Parcellaire du bassin versant de l'Ibenbach – avril 2008.</i>	<i>45</i>
<i>Annexe 2 : Comparaison des surfaces contributives amont supérieures à 0,5 ha pour les résolutions de 2,5 m, 20 m et 50 m.</i>	<i>46</i>
<i>Annexe 3 : Distribution des écarts de surfaces contributives amont par rapport à la référence pour les résolutions de 2,5 m, 20 m et 50 m.</i>	<i>47</i>
<i>Annexe 4 : Paramètres sols pris en compte pour les simulations de ruissellement sous LISEM.</i>	<i>48</i>
<i>Annexe 5 : Paramètres sols pris en compte par le module Green & Ampt à deux couches dans LISEM.</i>	<i>49</i>



Annexe 2 : Comparaison des surfaces contributives amont supérieures à 0,5 ha pour les résolutions de 2,5 m, 20 m et 50 m.



Annexe 3 : Distribution des écarts de surfaces contributives amont par rapport à la référence pour les résolutions de 2,5 m, 20 m et 50 m.

	Comparaison des écarts (en ha) entre la surface amont topo à 0,5m et à une autre résolution (algorithme topo)	Comparaison des écarts (en ha) entre la surface amont topo à 0,5m et à une autre résolution (algorithmeTCRP)
2.5 m		
20 m		
50 m CG		
50 m IG N		

Annexe 4 : Paramètres sols pris en compte pour les simulations de ruissellement sous LISEM

LAI = Leaf Area Index [$m^3 m^{-3}$]
 PER = Plant cover [%]
 Ksat = Saturated conductivity [$m day^{-1}$]
 Theta = θ = Soil moisture content [$m^3 m^{-3}$]
 RR = Random roughness [m]
 CH = Plant height [m]

AGGRSTAB = Aggregate stability
 Ldd = drainage direction
 n = Mannings'n, resistance to overland flow
 slope = Slope gradient
 COH = Soil cohesion [N]
 D50 = Median grain size

Ces valeurs ont été établies pour une période proche des semis (mois de mai).

		AGGRSTAB	CH	COH	COHADD	LAI	N	PER	RR
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Friche	1	-1	0.25	1.5	1.5	0.8	0.3	0.6	0.7
Prairie	2	-1	0.15	3	3.5	1.9	0.4	0.95	0.7
Bande enherbée	3	-1	0.1	3.3	3.5	1.9	0.4	0.95	0.7
Verger	4	-1	0.1	2	1.5	11	0.4	0.95	0.7
Forêt	5	-1	15	2	1.5	11	0.5	0.95	1.2
Ripisylve boisée	6	-1	15	2	1.5	11	0.5	0.95	1.2
Vigne	7	15	1.3	1	1.5	2	0.25	0.5	0.5
Surface urbanisée	8	-1	0	200	0	0	0.015	0	0
Jardin	9	-1	0.15	3	3.5	1.9	0.4	0.95	0.7
Chemins de terre	10	-1	0	5	0	0	0.02	0	0
Ripisylve avec bande enherbée	11	-1	15	2	1.5	11	0.5	0.95	1
Non labour maïs	20	15	0	0.9	0	0	0.12	0	0.99
Non labour céréale d'hiver	21	10	0.35	1.1	0.75	1.08	0.156	0.5	0.55
Non labour colza	22	15	0.25	0.9	0.75	0.8	0.144	0.4	0.66
Non labour tournesol	23	15	0	0.9	0	0	0.12	0	0.99
Non labour betterave	24	13	0.05	0.9	0.1	0.2	0.12	0.1	0.88
Non labour pomme de terre	25	15	0.1	0.9	0	0.2	0.12	0.15	0.66
Non labour céréales d'été	26	15	0.2	0.9	0.3	0.5	0.12	0.3	0.88
Non labour soja	27	15	0	0.7	0	0	0.12	0	0.99
Semis direct maïs	30	20	0	1.4	0	0	0.15	0	0.72
Semis direct céréale d'hiver	31	15	0.35	1.8	0.75	1.08	0.195	0.5	0.4
Semis direct colza	32	20	0.25	1.4	0.75	0.8	0.18	0.4	0.48
Semis direct tournesol	33	20	0	1.4	0	0	0.15	0	0.72
Semis direct betterave	34	18	0.05	1.4	0.1	0.2	0.15	0.1	0.64
Semis direct pomme de terre	35	20	0.1	1.4	0	0.2	0.15	0.15	0.48
Semis direct céréales d'été	36	20	0.2	1.4	0.3	0.5	0.15	0.3	0.64
Semis direct soja	37	20	0	1	0	0	0.15	0	0.72
Labour maïs	40	10	0	0.7	0	0	0.1	0	0.9
Labour céréale d'hiver	41	5	0.35	0.9	0.75	1.08	0.13	0.5	0.5
Labour colza	42	10	0.25	0.7	0.75	0.8	0.12	0.4	0.6
Labour tournesol	43	10	0	0.7	0	0	0.1	0	0.9
Labour betterave	44	8	0.05	0.7	0.1	0.2	0.1	0.1	0.8
Labour pomme de terre	45	10	0.1	0.7	0	0.2	0.1	0.15	0.6
Labour céréales d'été	46	10	0.2	0.7	0.3	0.5	0.1	0.3	0.8
Labour soja	47	10	0	0.5	0	0	0.1	0	0.9

Source : Hofstetter, 2008.

*Annexe 5 : Paramètres sols pris en compte par le module Green & Ampt à deux couches dans
LISEM*

Tableau pour lit de semis											
facteur multiplicateur pour lit de semis : x 5											
				D50	Ksat Spaw (en fonction type de sol)	PSI	SOILDEP	THETA1	THETAS Spav	STONFRC	
UTS	%UCUS	UCS	0	1	2	3	4	5	6	7	
1011	80	50101	50101	25	28.8	10	70	0.25	0.54	0	
1051	35	50105	50105	25	28.35	10	70	0.25	0.54	0	
1092	70	50109	50109	25	53.5	10	70	0.25	0.53	0	
1201	60	50120	50120	25	18.1	10	70	0.25	0.545	0	
1213	40	50121	50121	25	56.75	10	70	0.25	0.533	0	
1222	70	50122	50122	25	54.95	10	70	0.25	0.535	0	
1251	70	50125	50125	25	41.7	10	70	0.25	0.535	0	
1261	60	50126	50126	25	29.85	10	70	0.25	0.55	0	
1271	60	50127	50127	25	46.25	10	70	0.25	0.54	0	
1282	70	50128	50128	25	29.4	10	70	0.25	0.548	0	
189		72	72	25	28.2	10	70	0.25	0.542	0	
191		74	74	25	26.75	10	70	0.25	0.548	0	
192		75	75	25	29.8	10	70	0.25	0.546	0	
193		76	76	25	26.15	10	70	0.25	0.538	0	
195		77	77	25	19.85	10	70	0.25	0.547	0	
Tableau pour matrice en dessous du lit de semis											
				D50	Ksat Spaw	PSI	SOILDEP	THETA1	THETAS Spav	STONFRC	
UTS	%UCUS	UCS	0	1	2	3	4	5	6	7	
1011	80	50101	50101	25	5.76	10	1500	0.25	0.471	0	
1051	35	50105	50105	25	5.67	10	1500	0.25	0.444	0	
1092	70	50109	50109	25	10.7	10	1500	0.25	0.471	0	
1201	60	50120	50120	25	3.62	10	1500	0.25	0.471	0	
1213	40	50121	50121	25	11.35	10	1500	0.25	0.47	0	
1222	70	50122	50122	25	10.99	10	1500	0.25	0.459	0	
1251	70	50125	50125	25	8.34	10	1500	0.25	0.474	0	
1261	60	50126	50126	25	5.97	10	1500	0.25	0.472	0	
1271	60	50127	50127	25	9.25	10	1500	0.25	0.471	0	
1282	70	50128	50128	25	5.88	10	1500	0.25	0.471	0	
189		72	72	25	5.64	10	1500	0.25	0.472	0	
191		74	74	25	5.35	10	1500	0.25	0.472	0	
192		75	75	25	5.96	10	1500	0.25	0.472	0	
193		76	76	25	5.23	10	1500	0.25	0.471	0	
195		77	77	25	3.97	10	1500	0.25	0.472	0	

Source : Hofstetter, 2008.

VALORISATION D'UN MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN HAUTE RESOLUTION POUR LA MODELISATION DES TRANSFERTS DANS UN PETIT BASSIN VERSANT

Résumé

L'érosion hydrique des bassins versant cultivés périurbains commence à être identifié comme un risque naturel distinct de celui des inondations. Un partenariat d'acteurs variés (recherche, acteurs du développement des territoires, profession agricole) est à l'initiative du développement d'outils de modélisation performants pour la protection des sols et des zones urbanisées. De nouveaux outils permettant la détermination spatiale précise des chemins de l'eau sont à cet égard nécessaires.

Cette étude vise à mettre en évidence la précision de données topographiques requise pour la modélisation de l'aléa en fonction du type d'aménagement projeté. Pour cela nous analyserons ici l'impact de la résolution des données topographique sur la détermination spatiale des chemins de l'eau et sur la quantification des volumes produits et transférés à l'aval d'un bassin versant.

Des prescriptions concernant les seuils de précision adapté sont élaborées afin d'aider les acteurs dans la détermination de leurs besoins en terme de données sources.

Mots-clés : érosion hydrique, chemins de l'eau, résolution des données topographiques, modèle pluie-infiltration-débit.

Summary

Muddy flows resulting from soil erosion in cultivated catchments near built-up area are now identified as a natural risk, distinct from floods. In the Alsace, a partnership of various stakeholders from different fields (research, rural and urban land management and agriculture) is at the basis of the implementation of high quality modelling tools to serve soil conservation and urban protection. New tools permitting the accurate spatial determination of runoff flow paths are essential in this respect. This work aims at identifying the topographic data precision needed to accurately predict runoff flow paths. The required data precision was analysed taking into account the typical position of control measures in the landscape using the upstream area concept. The sensitivity of spatial runoff patterns and runoff volume to topographic data resolution was analysed. Results provide guidelines and recommendations - useful for end-users of spatial models - on the resolution of topographic data needed depending on the kind of measure.

Keywords : soil erosion, runoff pathways, topographic data resolution, rainfall-infiltration-runoff model.