HAL open science

Impacts des activités humaines sur le parcours des écoulements de surface dans un bassin versant bocager : essai de modélisation spatiale.

Erwan Bocher

▶ **To cite this version:**

Erwan Bocher. Impacts des activités humaines sur le parcours des écoulements de surface dans un bassin versant bocager : essai de modélisation spatiale. : Application au Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien (22). Géographie. Université Rennes 2, 2005. Français. NNT : . tel-01093074

HAL Id: tel-01093074

https://shs.hal.science/tel-01093074

Submitted on 12 Jan 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

THESE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITE DE RENNES 2 - HAUTE-BRETAGNE

Discipline : **GEOGRAPHIE**
Présentée par
Erwan Bocher

RESO UMR CNRS 6590 ESO COSTEL UMR CNRS 6554 LETG

Pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L' UNIVERSITE DE RENNES 2 – HAUTE-BRETAGNE

Impacts des activités humaines sur le parcours des écoulements de surface dans un bassin versant bocager : essai de modélisation spatiale

- Application au Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien (22) -

Jury composé de :

Corentin CANEVET, professeur, Université de Rennes 2 (Directeur)
Daniel DELAHAYE, professeur, Université de Caen (Rapporteur)
Pierre DUMOLARD, professeur, Université de Grenoble 1 (Président de jury)
Philippe MEROT, directeur de recherche, INRA Rennes (Examinateur)
Marie-Josée PENVEN, professeur, Université de Rennes 2 (Co-directrice)

Soutenue le 01 décembre 2005 à Rennes

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements iront à Koulman Mathieu, directeur du Syndicat d'eau du Trégor et coordinateur du Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien qui a investi de son temps précieux et de son énergie pour que cette recherche se réalise. Je le remercie pour sa confiance et son amitié. Nos longues heures de discussions à Trélévern n'auront pas été vaines.

Je remercie aussi Jean Nicolas président du Bassin versant du J-G-B qui a accepté sans hésiter cette recherche. Celle-ci doit également beaucoup à Alain Brochen, responsable du service Aménagement rural et forestier au Conseil général des Côtes-d'Armor. Je lui en suis très reconnaissant.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mes deux directeurs de thèse Corentin Canévet UMR ESO 6590 et Marie-Josée Penven UMR LETG 6554. Leurs connaissances et leur conseil mutuels furent d'une très grande richesse pour mener à « bien » ce travail. Je remercie aussi Philippe Mérot d'avoir accepté de faire partie du comité de pilotage de cette thèse.

Je remercie les membres du laboratoire RESO pour leur accueil chaleureux, particulièrement Vincent Goueset qui a mis à ma disposition les moyens nécessaires pour réaliser cette thèse.

Je souhaite aussi remercier Monsieur Christian Puech, Monsieur Daniel Delahaye, Monsieur Pierre Dumolard et Monsieur Philippe Mérot pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Un merci très spécial, **an trugarez vraz**, à **Olivier Bedel**, **l'ingénieur LSI** sans qui HydroTIN serait encore dans les cartons. Merci aux nombreuses heures sacrifiées, merci de m'avoir piqué à la « joie des jars », merci d'avoir stoppé mais 3 000 000 d'idées.

Merci à Erwan Quesseveur, dépositaire de la mobylette du SIG pour ses relectures attentives et ses conseils.

Merci à la communauté non pas de l'anneau, mais de l'open source, à Michaël Michaud (IGN), Jon Aquino (Vivids Solutions) et Steve Taner.

Merci aux équipes du Bassin versant du J-G-B et aux buzuc's du Syndicat d'Eau du Trégor pour tant d'efficacité et de bonne humeur. J'ai beaucoup appris sur le terrain en leur compagnie. Je dois notamment remercier Carole, mes « assistants bocage » Loïc et Adeline, et Maël le détenteur de la source (des données…) pour leur aide et leur sympathie.

Merci :

Aux talabardeur et biniaouer de la Kevrenn Alré, notamment Eric et Erwan qui ont compris que thèse et musique étaient difficiles à concilier ;

Aux locataires du Pont Pourri et de la rue des Jonquilles, pour leur accueil, leur gentillesse, leur intérêt pour mon travail et leur compréhension. Les repas à l'auberge du « Vezinais » ont toujours été d'un grand repos ;

A mes parents, sans qui je n'aurais jamais réalisé de thèse. Je leur dois beaucoup. Il me tarde de retrouver le bocage Plourivotain pour taper quelques notes de musique ;

A mon ancien locataire, Gwendal lui aussi piqué par le virus de l'analyse spatiale ;

Enfin, un grand **merci** à Elsa pour sa patience, son soutien de toutes les circonstances et ses relectures très attentives.

Résumé

Les sociétés transforment leur territoire pour l'adapter à leurs besoins, perturbant les processus physiques. En Bretagne, en système bocager, la question se pose entre autres en terme de ruissellement de surface, vecteur insidieux de transfert des intrants agricoles des parcelles cultivées vers le cours d'eau et par conséquent de dégradation de la qualité des eaux. Pour réduire les transferts par ruissellement de surface, les organismes de Bassin versant mettent en place des dispositifs paysagers ou hydrauliques. Cependant, si à l'échelle de la parcelle l'efficacité d'un talus sur le ruissellement s'appréhende aisément, en revanche, à l'échelle du bassin versant, il est difficile de mesurer l'impact de ces aménagements sans des outils adaptés. A cette échelle les phénomènes sont discontinus dans l'espace et le temps. Le ruissellement, de la parcelle cultivée au cours d'eau, s'effectue par un cheminement complexe **au travers d'une série de cellules en relais** dont le caractère connecté ou non, permet ou le passage ou le blocage des eaux. Nous proposons une méthodologie fondée sur l'utilisation d'un MNT triangulaire contraint et de données vectorielles. Nous aboutissons à la création de trois prototypes : **VectorProcess**, **TopoTIN** et **HydroTIN**. La singularité du travail réside dans la définition d'un nouveau graphe de cellules appelé **graphe de bassins** qui traduit les relations entre les aménagements linéaires et la topographie. Ce graphe de bassins est mis à profit pour mettre en évidence à l'échelle d'un sous-bassin versant prioritaire du Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien, les **enchaînements de processus et les systèmes en relais** qui structurent l'organisation du parcours de l'eau. L'analyse permet de classer les aménagements en deux catégories : « **passants** » et « **bloquants** ».

Mots clés : Bocage, Bassin versant, ruissellement de surface, aménagements, MNT, graphe de bassins.

Abstract

Societies alter their territory to adapt it to their needs, thus interfering physical process. In Brittany, within bocage landscape the question comes out among others in terms of runoffs insidious vehicle for agricultural inputs of cultivated plot of land towards rivers and as a consequence for the damage of water quality. In order to reduce the runoff transfers, the organisations in charge of catchment basin have settled landscape or hydraulic devices. Nevertheless, if on the one hand according to the plot scale, the efficiency of a talus on the streaming is easily conceivable, on the other hand, according to a catchment basin scale, it seems hard to measure the impact of these devices without the proper tools. At this scale, phenomena are discontinuous in space and time. The streaming of the cultivated plot towards the river is due to a complex course **through a series of networks cells** which connection or not allows either the circulation or the blocking of waters. We suggest a methodology based on the use of a constraint triangular DEM and vector data. It leads us to the creation of three prototypes: **VectorProcess, TopoTIN** and **HydroTIN**. The singularity of our work lies in the definition of a new graph of cells called **basins graph** that expresses the relationships between linear devices and topography. This basins graph is used to highlight **the sequences of processes and the systems networks** that structure the organisation of the water pathway at the scale of a priority side subbasin of the Jaudy-Guindy-Bizien. The analysis allows us to classify those devices into two categories : **"the along going ones" ("passants") and "the blocking ones" ("bloquants")**.

Keywords :Bocage, Watershed, runoff, planning, DEM, basins graph.

SIGLES ET ACRONYMES

BEP : Bretagne-Eau-Pure

CIPAN : Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates

CORPEP : Cellule d'Orientation Régionale pour la Protection des Eaux contre les Pesticides

DIREN : Direction Régionale de l'Environnement

DRAF : Direction Régionale de l'Agriculture et de la Forêt

EPA : Engagement de Progrès Agronomique

FEOGA : Fonds Européen d'Orientation et de Garantie Agricole

J-G-B : Jaudy-Guiny-Bizien

MNT : Modèle Numérique de Terrain

PMPOA : Programme de Maîtrise des Pollutions d'Origine Agricole

RNB : Réseau National de Bassin

TIN : Triangular Irregular Network

ZES : Zones d'Excédent Structurel

Table des matières

Introduction générale **10**

Chapitre 1. Du remembrement à la reconquête de la qualité de l'eau 15

1. Evolution récente du bocage : de 1940 à nos jours **17**

1.1. La destruction des bocages… 17

1.2. La recomposition : vers une évolution des idées sur le paysage bocager 21
1.2.1. Les premiers éclairages sur les fonctions du bocage 21
1.2.2. Les politiques bocagères départementales : quelques éléments de compréhension 22

1.3. Essai de bilan sur l'évolution des paysages de bocage 26

2. La crise de l'eau en Bretagne : facteur clé de la recomposition du bocage . **28**

2.1. La dégradation de la qualité des eaux 28
2.1.1. Le cas du nitrate 29
2.1.2. Le cas du phosphore 32
2.1.3. Le cas des pesticides 35

2.2. Les dispositifs régionaux pour lutter contre la pollution de l'eau 37
2.2.1. Le programme Bretagne-Eau-Pure 38
2.2.2. Bassins versants et aménagement du milieu 41

Chapitre 2. Impacts des activités humaines sur les écoulements de surface en territoire agricole : de la parcelle au versant **50**

1. Le couvert végétal **52**

1.1. A l'échelle de la parcelle 52

1.2. A l'échelle du versant et du bassin versant 54

1.3. Dépendance spatio-temporelle : conséquence sur le ruissellement 56

2. Impacts des structures linéaires temporaires et pérennes **59**

2.1. Les motifs agraires 59

2.2. Les dispositifs pérennes introduits par l'homme 63
2.2.1. Voirie et éléments connexes 63
2.2.1.1. L'effet de la voirie 63
2.2.1.2. L'effet des fossés 68
2.2.2. Talus et haie 69
2.2.2.1. Les talus 69
2.2.2.2. Les haies 71

Chapitre 3. Méthodes et outils pour la spatialisation du cheminement des écoulements de surface 75

1. La modélisation spatiale en hydrologie 76

2. L'arbre de drainage 80

2.1. L'arbre de drainage topographique 80
2.1.1. Le calcul de l'arbre de drainage à partir de données raster 80
2.1.1.1. La méthode mono-directionnelle 81
2.1.1.2. Les méthodes multi-directionnelles 83
2.1.1.3. La méthode de Tarboton (1997) 87
2.1.2. Le calcul de l'arbre de drainage à partir d'un TIN 88

2.2. L'arbre de drainage contraint 93
2.2.1. La méthode de ré-ingénierie du MNT 93
2.2.1.1. Application sur un MNT raster 93
2.2.1.2. Application sur un TIN 98
2.2.2. Les méthodes algorithmiques spécifiques 101
2.2.2.1. Le modèle TCRP (Takken et al., 2001a) 102
2.2.2.2. Le modèle RIDEM (Duke et al., 2003) 106
2.2.2.3. Le modèle TORTRAT (Tortrat et al, 2004) 110

Chapitre 4. L'organisation des écoulements de surface sur un bassin versant bocager : de l'observation à la conceptualisation 116

1. Présentation du site d'étude 118

1.1. Le Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien 118
1.1.1. Les enjeux de la qualité de l'eau 118
1.1.2. Situation climatique 122
1.1.3. Un territoire fortement agricole 122
1.1.4. Une répartition des cultures à relier avec les caractéristiques physiques 123
1.1.5. Le linéaire bocager 124

1.2. Le sous-bassin versant du Sterenn : un territoire agricole hétérogène..... 128
1.2.1. Une agriculture omniprésente 128
1.2.2. Une armature hydrographique dense et complexe..... 129
1.2.3. Des structures paysagères hétérogènes 131
1.2.4. Cultures et ruissellement de surface 137
1.2.4.1. La période automne-hiver..... 137
1.2.4.2. La période printemps-été 139
1.2.4.3. Le cas particulier des choux-fleurs 139

2. Observation des écoulements de surface et de leurs conséquences 140

2.1. A l'échelle de la parcelle..... 140

2.2. Les interactions parcelles / linéaires 141

2.3. A l'échelle du versant : échange et collecte 143

Chapitre 5. Conceptualisation d'une modélisation spatiale à partir de structures triangulaires 150

1. Choix et hypothèses de modélisation..... 151

1.1. Les données d'entrée..... 151

1.2. Mécanismes du modèle..... 153
1.2.1. Le TIN contraint 153
1.2.2. Le graphe des cellules..... 154
1.2.3. L'automate cellulaire 160
1.2.3.1. Les arcs collecteurs 161
1.2.3.2. Les arcs potentiellement obstacle 162
1.2.3.3. Le graphe de bassins et la dynamique des écoulements 164

2. Structure et organisation des données 169

2.1. Le modèle « spaghetti » 169

2.2. Le modèle topologique planaire unifié : MTH 170
2.2.1. Le choix d'un modèle topologique planaire 170
2.2.2. Spécifications du MTH..... 176

2.3. Le modèle TIN..... 178

Chapitre 6. Mise en œuvre de la modélisation dans un environnement SIG 182

1. Le module VectorProcess 183

1.1. Mise en cohérence des données d'entrée 183

1.2. Construction de la topologie 185

2. Le prototype TopoTIN 187

2.1. Production du TIN standard et amélioré 189
2.1.1. Le TIN standard 189
2.1.2. Le TIN amélioré 189
2.1.2.1. Le calcul des skeletons et l'extraction des branches 190
2.1.2.2. L'évaluation des altitudes des branches de skeleton 191
2.1.2.3. Application à des cas particuliers 194
2.1.2.4. L'intégration des branches de skeleton dans la triangulation 199
2.1.2.5. Conclusion et discussions sur la méthode des skeletons 199

2.2. Production du TIN contraint 203
2.2.1. L'intégration des axes de drainage naturel 203
2.2.2. L'intégration des arcs du MTH 208

3. Le prototype HydroTIN 209

3.1. Le calcul du graphe de cellules 209
3.1.1. Principe général 209
3.1.2. Le traitement des zones horizontales 212
3.1.3. La connexion des cuvettes topographiques 214
3.1.3.1. Détermination des cellules contributives 214
3.1.3.2. Recherche de l'exutoire principal de la cuvette topographique 215

3.2. Le calcul du graphe de bassins 217
3.2.1. La prise en compte des arcs obstacles dans le graphe de bassins 217
3.2.1.1. Recherche des cuvettes artificielles 217
3.2.1.2. La connexion des cuvettes artificielles 222
3.2.2. La prise en compte des arcs collecteurs 224

3.3. Vers un automate cellulaire simplifié 227
3.3.1. Principe de l'automate cellulaire simplifié 227
3.3.2. Le graphe de bassins paramétrable 228
3.3.3. Les cumuls de superficies de cellule à cellule 230

3.4. Récapitulatif du fonctionnement de la modélisation 231

Chapitre 7. Application de la modélisation sur le sous-bassin versant du Sterenn 233

1. Préparation des données 234

1.1. Construction du Modèle Topologique Hybride (MTH)..... 234

1.2. Construction du TIN 237
1.2.1. Source de données 237
1.2.2. Données intégrées dans le TIN 238

1.3. Données d'occupation du sol et coefficients de ruissellement 240

2. Validation des paramètres du graphe de bassins..... 242

2.1 Caractéristiques pluviométriques pour les périodes d'observation 243
2.2. Présentation des sites 244
2.3. Protocole de validation 246
2.4. Analyse des résultats..... 246

3. Application aux scenarii automne-hiver et printemps-été..... 253

3.1. Les aménagements linéaires facteur de perturbation des écoulements de surface..... 254
3.1.1. L'impact des aménagements linéaires sur les aires d'alimentation des cours d'eau 254
3.1.2. Relais et interactions spatiales dans les systèmes bassin versant : l'exemple du Goasguden..... 262
3.1.2.1.Les apports directs de versant..... 264
3.1.2.2. Les interactions aménagements-topographie dans le fonctionnement interne du bassin versant..... 264
3.1.2.3. Les aménagements linéaires facteurs de perturbation des limites de bassin versant 268
3.1.3. Vers une typologie des secteurs de concentration du ruissellement de surface 272
3.1.3.1. Les aménagements « passants » 272
3.1.3.2. Les aménagements « bloquants » 272

3.2 L'effet des aménagements linéaires dans le contrôle des surfaces mobilisées : des objectifs à une analyse critique d'HydroTIN 273
3.1.1. Identification du problème..... 274
3.1.1. Explication du problème..... 278

CONCLUSION GENERALE 284
BIBLIOGRAPHIE..... 291
TABLE DES FIGURES..... 304
TABLE DES TABLEAUX 311
ANNEXES 312

Introduction générale

Les sociétés humaines adaptent leur territoire à leurs besoins. Elles transforment les paysages, les « domestiquant » par des aménagements linéaires (route, fossé), occupent les espaces par des cultures et des habitats. Par conséquent, elles modifient l'évolution des milieux, les processus physiques. Dans certaines régions agricoles les nouvelles pressions exercées sur le sol ont provoqué une désorganisation des transferts des eaux de surface dans les bassins versant. Elles ont aussi favorisé l'apparition de phénomènes érosifs parfois catastrophiques sans commune mesure avec les caractéristiques des précipitations et du relief. C'est le cas des terres limoneuses du nord-ouest de l'Europe où des dégâts sont maintenant recensés de manière chronique (Auzet, 1990 ; Papy et Douyer, 1991 ; Delahaye, 2002). Ainsi, dans le Pays de Caux (Seine-Maritime), les eaux se concentrent dans les talwegs et entraînent une érosion hydrique spectaculaire et dangereuse pouvant mettre en péril les populations et les biens.

En Bretagne, les remembrements excessifs des années 1960 à 1975-1980, en relation avec la modernisation de l'agriculture, ont détruit la majeure partie du linéaire de talus au profit d'un agrandissement du parcellaire. Canévet et Lebahy (1994) remarquent qu'en l'espace de 40 ans en Bretagne, environ 65 % de la surface agricole a fait l'objet d'un aménagement foncier, réduisant de 40 % le linéaire bocager dans les départements du Morbihan et des Côtes-d'Armor. L'ouverture du bocage a souvent servi de support pour justifier à tort ou à raison le rôle déterminant des linéaires de talus dans le déclenchement des inondations. Ainsi, dès 1973, suite à un orage dans la baie de Saint-Brieuc, la suppression des talus est mentionnée comme la cause de l'inondation des habitations situées en bas du versant. En 1995, en 2000 et en 2001, les inondations importantes qui touchent la ville de Quimperlé amènent les élus locaux à dénoncer les arasements de talus. Mérot (1978) a ainsi démontré que le volume ruisselé était plus faible et plus régulier à l'exutoire d'un bassin versant bocager par rapport à l'exutoire d'un bassin versant non bocager.

Les études menées sur le ruissellement de surface en système bocager montrent qu'il est lié à la sensibilité des sols à la formation d'une croûte de battance et aux systèmes de culture (Cros-Cayot et Gascuel-Odoux, 1998). Les processus d'érosion par ruissellement concentré sont limités et très localisés et engendrent des griffes et de petites incisions rarement supérieures au centimètre (Cros-Cayot et Gascuel-Odoux, 1998). Selon Le Bissonais *et al* (2002), l'érosion hydrique des sols ne constitue pas un problème majeur. Si la contribution du ruissellement de surface au débit total des cours d'eau est faible et les phénomènes d'érosion rarement

catastrophiques, en revanche celui-ci provoque des effets notables sur la redistribution des sols à l'échelle de la parcelle (Pihan, 1976) et sur la qualité des eaux (Cros-Cayot, 1996).

En effet, depuis les années 1970 la Bretagne connaît une dégradation régulière de l'état de ses eaux superficielles et souterraines, polluées par des produits issus en grande partie de l'activité agricole. La présence dans les cours d'eau de concentrations de polluants supérieures aux normes de potabilité est devenue un phénomène chronique et pose de nombreux problèmes à la collectivité (sanitaire, environnemental, économique). Pour lutter contre ce phénomène et se conformer aux directives européennes, les pouvoirs publics ont mis en place, en complément des dispositifs réglementaires (loi sur l'eau, directive nitrate, installation classée), des dispositifs contractuels (Contrat de Rivière et de baies, Contrat Territorial d'Exploitation devenu le Contrat d'Agriculture Durable). En Bretagne, le programme Bretagne Eau Pure (BEP) constitue l'élément central d'une politique régionale de préservation et de reconquête de la qualité des eaux de surface et souterraines. Son territoire d'action repose sur un ensemble d'unités hydrologiques « cohérentes », les Bassins versants. Ces Bassins versants dont la plupart sont gérés par des collectivités locales proposent des mesures incitatives pour accompagner les acteurs locaux (agriculteurs, communes, particuliers) vers des pratiques plus respectueuses de la ressource en eau. Parmi les différentes mesures figurent les opérations d'aménagement du milieu (construction de talus) dont l'objectif est de réduire les transferts rapides des flux de surface de la parcelle agricole vers le cours d'eau et donc de limiter la diffusion des polluants. Après une période de politique de reconstruction par saupoudrage (1980-1995), le linéaire de talus est aujourd'hui en cours de reconstitution. Cependant ces opérations restent inégalement développées même si le linéaire reconstruit est significatif en certains points du territoire. Ainsi dans les trois bassins versants du Léguer, du Jaudy-Guindy-Bizien et du Leff, la totalité du linéaire de talus édifié en 2002 équivaut à celle de l'ensemble du département[1]. Il en résulte, suite aux destructions inégales du linéaire et de ses reconstructions éventuelles, une forte hétérogénéité de la densité bocagère et surtout de celle des talus dans les bassins versants.

Même si, Pihan (1976) et Carnet (1978) ont mis en évidence l'influence de certains talus dans le stockage des sédiments, les aménagements paysagers ne constituent pas l'unique facteur de contrôle des écoulements de surface à l'échelle des versants et des bassins versants. La voirie et ses réseaux connexes (Sun *et al*, 1998 ; Moussa *et al*, 2002 ; Duke *et al*, 2003), les fossés de drainage agricole, les motifs agraires (Auzet, 1990 ; Souchère, 1995) et la distribution des cultures (Papy et Boiffin, 1988; Takken *et al*, 1999b ; Souchère *et al*, 2001) sont autant d'éléments qui vont perturber le parcours des écoulements de surface. Or, comme le souligne

[1] Bocher, 2004, enquête sur les constructions bocagères en Bretagne.

Ambroise (1999), la compréhension des chemins empruntés par l'eau de surface est une donnée indispensable pour la gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant. Ils sont à l'origine de l'érosion des sols et contrôlent les transferts liquides, solides et chimiques rapides vers les axes hydrologiques, voire aggravent les inondations.

De nombreuses approches ont été proposées pour spatialiser le parcours des écoulements de surface à différentes échelles grâce notamment au développement des logiciels d'analyse spatiale et la mise à disposition de nouvelles sources de données numériques tels que les Modèles Numériques de Terrain (MNT). Cependant, la façon dont le ruissellement circule depuis les parcelles où il se forme, jusqu'aux zones sensibles – cours d'eau, aires bâties– est loin d'être bien comprise et modélisée. Lors du passage de la parcelle au bassin versant, les recherches se sont heurtées au problème de changement d'échelle (Delahaye, 2002). L'extrême imbrication des aspects physiques, leur variabilité spatiale et temporelle auxquelles se surimposent les actions de l'homme produisent des échanges complexes à l'échelle du bassin versant (Ambroise, 1999). Ces difficultés ont conduit les chercheurs à restreindre les variables prises en compte dans les schémas de modélisation. Beaucoup de modèles se sont ainsi concentrés sur des aspects essentiellement physiques et sur l'occupation du sol. Bien que les impacts des aménagements linéaires, notamment les routes, les fossés et les linéaires paysagers (haie, talus) sur les écoulements de surface aient été souvent mentionnés comme des facteurs à risque, ce n'est que très récemment qu'ils ont été intégrés dans la modélisation spatiale.

L'objectif de cette recherche est de proposer une méthodologie pour évaluer l'impact des activités humaines sur l'organisation des écoulements de surface à l'échelle d'un bassin versant bocager. Cette méthodologie doit permettre d'aboutir à la construction d'un modèle capable d'intégrer et de représenter spatialement les relations qui s'établissent entre la topographie naturelle et ces activités. Il s'agit de mettre en évidence les enchaînements des processus d'écoulement et d'identifier les chemins de l'eau à l'échelle du bassin versant. A terme, ce modèle pourra servir de support à la conception d'une « application métier » adaptée au contexte opérationnel de la gestion de l'eau dans les Bassins versants, comme outil d'évaluation des travaux d'aménagement du milieu ou pour la prospection (construction de scenarii d'aménagement).

La méthode repose sur l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain à mailles triangulaires (*Triangular Irregular Network* TIN). Ce dernier est contraint par des données vectorielles exogènes (voirie, parcellaire, talus…). Il permet de déduire un arbre de drainage amélioré, le graphe de bassins, représentant les interactions spatiales entre les éléments linéaires et les directions imposées par la topographie. Les échanges de surface représentés par le graphe de bassins s'appuient sur l'analyse du fonctionnement d'un paysage bocager. Le cadre

d'application est le sous-bassin versant d'action prioritaire du Sterenn situé au nord ouest du département des Côtes-d'Armor. Cette recherche s'inscrit dans l'opération Dour-Hon-Douar de reconquête et de protection de la qualité des eaux de surface et souterraines, menée depuis 2000 sur le Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien. Elle émane de la volonté des acteurs de cette unité de gestion de l'eau de disposer d'outils de suivi et d'évaluation des actions engagées sur le milieu naturel. Cette recherche a bénéficié du soutient financier de l'Europe (Fonds FEOGA), de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, du Conseil Régional de Bretagne, du Conseil Général des Côtes-d'Armor et du Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien.

Le mémoire est structuré en six chapitres.

Le chapitre 1 rappelle l'évolution du paysage bocager depuis les années 1940 à nous jours, de la destruction à la recomposition du bocage. Il permet de cerner les principaux acteurs et facteurs qui ont conduit à la transformation du bocage. A partir de l'exemple d'un Bassin versant, il montre la nouvelle place accordée aux linéaires pour la réduction des fuites de polluants de la parcelle au cours d'eau et surtout l'ampleur des travaux d'aménagement paysager et hydraulique qui sont aujourd'hui réalisés et qui pose inévitablement la question de leur conséquence sur le fonctionnement du bassin versant.

Le chapitre 2 présente un état des connaissances concernant l'impact des activités humaines sur le ruissellement de surface dans des bassins versants agricoles. Il permet également de dégager les principaux facteurs humains qui interviennent dans l'organisation du parcours des écoulements de surface.

Le chapitre 3 est consacré aux méthodes et modèles permettant de représenter spatialement le parcours de l'eau de surface. Les principales méthodes de calcul d'un arbre de drainage à partir d'un MNT sont présentées et discutées.

Le chapitre 4 présente le contexte d'application de cette recherche ainsi que le site d'étude et ses caractéristiques. Les observations terrain faites sur ce site d'étude conduisent à une description de l'organisation des écoulements de surface afin de préciser le rôle de certains aménagements linéaires et les interactions spatiales qui régissent les échanges de surface.

Le chapitre 5 s'attache à définir un cadre théorique pour prendre en compte les activités humaines dans une modélisation spatiale reposant sur un Modèle Numérique de Terrain à mailles irrégulières. Ce cadre peut être interprété comme le cahier des charges de la

modélisation. Nous y présentons aussi les modèles de données retenus pour organiser les données géographiques, composantes indispensables de la modélisation spatiale.

Le chapitre 6 fournit une description technique des méthodes employées pour appliquer le cadre théorique défini dans le chapitre 5. Nous présentons les trois prototypes développés, VectorProcess, TopoTIN et HydroTIN sur lesquels s'appuie la modélisation spatiale du parcours des écoulements de surface.

Le chapitre 7 présente l'application des trois prototypes, notamment d'HydroTIN sur un sous-bassin versant agricole et bocager. Plusieurs simulations sont réalisées pour tenter d'identifier l'impact respectif du linéaire de talus, de la voirie et des fossés. Une analyse détaillée à l'échelle d'un sous-bassin versant est effectuée. Elle permet de faire ressortir la façon dont les écoulements de surface se structurent et les interactions spatiales entre les aménagements et la voirie le long du continuum amont-aval. Dans ce chapitre, sont aussi exposées certaines limites du modèle HydroTIN.

Chapitre 1.Du remembrement à la reconquête de la qualité de l'eau

Ce premier chapitre, à travers une présentation rapide de l'évolution de l'agriculture bretonne de 1940 à nos jours, rappelle les principaux facteurs qui ont guidé la réorganisation des paysages de nos campagnes. Il expose les profondes mutations structurelles conduites sur un paysage atypique, le bocage, témoin contemporain d'une société rurale en perpétuelle transformation.

L'évolution des paysages de bocage est ici appréhendée selon les trois périodes définies par les géographes rennais (Meynier, 1967 ; Flatrès, 1986 ; Canévet, Lebahy, 1994) : de 1940 à 1960 remembrement conservateur, de 1960 à 1975-1980 remembrement table-rase, de 1975-1980 à nos jours remembrement diagnostic. Le linéaire bocager (talus et haie à plat), détruit puis reconstruit, est le reflet de ces transformations. Nous porterons une attention particulière aux programmes bocagers départementaux dont l'étude permet de mettre en évidence l'évolution de l'appréhension institutionnelle et politique du bocage. Cette évolution trouve une part de ses origines dans les questionnements de scientifiques s'inquiétant de la disparition de cette forme d'organisation du territoire, mais aussi dans des inondations exceptionnelles, auxquelles sont venus s'ajouter plus récemment les problèmes de pollution de l'eau. Ce sont d'ailleurs ces derniers qui ont amené les institutions publiques à définir un cadre pour une politique régionale de reconquête et de protection des ressources en eau superficielles et souterraines : le programme Bretagne Eau Pure (BEP).

Créé en 1990, le programme BEP s'appuie sur une unité fonctionnelle cohérente : le bassin versant. Devenue progressivement une véritable unité de gestion de l'eau, cette « collectivité locale virtuelle » constitue aujourd'hui une force de proposition et d'action en matière d'aménagement du milieu naturel. Ainsi, dans le cadre de la protection des eaux superficielles contre les transferts par ruissellement de surface (matières en suspension, phytosanitaires), elle subventionne en complément des fonds européens ou départementaux des actions de (re)construction du bocage. Le linéaire de bocage reconstruit est significatif. Dans le département des Côtes-d'Armor, l'action bocage cumulée de trois bassins versants (Léguer, Jaudy-Guindy-Bizien et Leff, soit 40 % de la superficie du département) au cours de l'année 2003 représente la totalité du linéaire de talus construit pour l'ensemble du département en 2002[2].

Si ces résultats attestent de l'efficacité territoriale des actions de bassins versants ils amènent en revanche de nouvelles interrogations scientifiques : Quelles sont les conséquences de ces opérations sur les processus physiques à l'échelle du bassin versant ? Comment

[2]Source : Bocher, 2004, enquête sur les constructions bocagères en Bretagne.

interviennent-elles sur la dynamique des écoulements ? Est-il possible de les évaluer ? De les anticiper ? Ces questions sont d'actualité à l'heure où de nombreux acteurs institutionnels (Grouazel, 2002 ; Cour des comptes, 2002) et scientifiques (Rousseau, 2001 ; Balland *et al.*, 2001) soulèvent les carences en matière de dispositif de suivi et d'évaluation des politiques d'aménagement du milieu.

1. Evolution récente du bocage : de 1940 à nos jours

1.1. La destruction des bocages…

Après la Seconde Guerre mondiale, l'agriculture française connaît un retard considérable face à d'autre pays comme les Etats-Unis, le Danemark ou les Pays-Bas qui ont su s'adapter aux impératifs de l'économie de marché (Canévet, 1992). Dominée par une agriculture de polyculture-élevage avec de petites exploitations familiales (9 à 10 ha) produisant essentiellement pour la consommation familiale, la Bretagne est alors considérée comme une région pauvre dotée d'une agriculture archaïque et peu rentable (Flatrès, 1986 ; Canévet, 1992).

Face à cette situation, les réponses du monde agricole ne tardent pas. Dès le début des années 1950, sous l'impulsion d'un mouvement paysan, la JAC (Jeunesse Agricole Chrétienne), qui formera par la suite le CNJA (Centre National des Jeunes Agriculteurs) se dessine une nouvelle agriculture, plus moderne. Canévet (1992) résume le mouvement de la JAC en ces termes : « *une idéologie qui conjugue progrès techniques, humanisme chrétien et réussite individuelle* ». Relayée par les élites locales, puis par les pouvoirs publics (Direction des services agricoles, premier Plan régional breton), la Bretagne agricole, bouillonnante, se transforme (Tristan et Lebot, 1995).

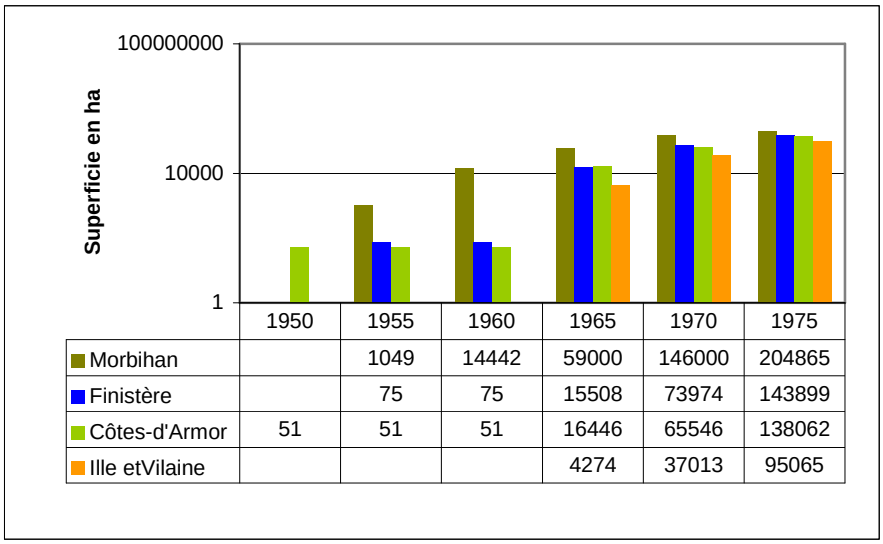
Les progrès se réalisent d'abord sur les plans « agrologiques» (engrais, sélection des semences, introduction de races plus productives) et mécaniques (tracteurs et accessoires associés). Parallèlement à ces progrès émerge la nécessité de repenser l'organisation foncière des exploitations, de reconstruire un paysage rural plus adapté aux nouvelles méthodes de travail (Canévet, 1992).

Dans les années 1940, le paysage rural breton est fortement marqué par un réseau de talus surmontés de haies entourant des parcelles de petites tailles, le bocage. Issue de la petite propriété individuelle paysanne ayant conduit par génération successive au morcellement (terre située à différents endroits du finage agricole), cette structure spatiale empêche l'usage optimal des engins agricoles, notamment par l'exiguïté de ses parcelles (Meynier, 1967).

Pour s'affranchir de ce finage agraire, les agriculteurs bretons ont spontanément procédé à des adaptations de leur parcellaire et des éléments connexes (chemins d'exploitation, chemins ruraux). Ainsi en Bretagne, la « *destruction des talus pour élargir les chemins, agrandir les champs et faciliter la mécanisation* » avait débuté avant les premiers remembrements (Flatrès, 1986 ; Jouin, 2003).

Durant la période 1940-1960, les opérations de transformation des structures agraires sont lancées sur la base d'échanges volontaires de terres (article XIX.9 du Code rural émanant de la loi du 9 mars 1941 sur la réorganisation foncière et le remembrement). Ces premiers remembrements sont modestes tant du point de vue des superficies qu'ils couvrent que des travaux réalisés. Dans le département des Côtes-d'Armor, le premier remembrement a lieu en 1950 sur la commune de Pordic pour 60 ha seulement (Guellec, 1979). Qualifié d'opération conservatrice par les géographes rennais, le remembrement se fait alors « *dans le cadre de chaque groupe de fermes, et l'on respecte les lignes majeures du parcellaire, supprimant le moins de talus possible…* » (Flatrès, 1986).

A cette période de pratiques douces (Rousseau, 2001) succède la pratique de la table rase entre 1960-1975 voire même jusqu'au début des années 80 dans certaines régions. Mis en œuvre de façon isolée ou en conjugaison avec une opération foncière, au cours de la période 1954-1970, les travaux de remembrement changent d'échelle et d'ampleur. Les rythmes s'accélèrent : les transformations sont plus rapides et plus profondes. La figure 1 représente le cumul annuel évalué tous les cinq ans, des surfaces aménagées (parcellaire et travaux connexes) dans le cadre des procédures d'aménagement foncier. On peut y observer une très nette augmentation des superficies aménagées à partir de 1965 pour l'ensemble des départements par rapport aux années 1950, 1955 et 1960.



	1950	1955	1960	1965	1970	1975
Morbihan		1049	14442	59000	146000	204865
Finistère		75	75	15508	73974	143899
Côtes-d'Armor	51	51	51	16446	65546	138062
Ille etVilaine				4274	37013	95065

Figure 1. *Surfaces aménagées cumulées par département entre 1950 et 1975 (Bocher, 2004)*
(Source : DRAF)

Ces statistiques agricoles permettent de restituer l'évolution et le rythme des remembrements à l'échelle des départements bretons. En l'absence de données générales sur le bocage pour la période 1950 à 1975, elles constituent un référentiel certes imprécis mais essentiel pour dégager les phases d'évolution de ce paysage. Complétées par des données et des observations locales (à l'échelle du périmètre foncier ou des structures paysagères), elles permettent d'expliciter la nature des transformations dans les territoires ruraux, de supposer leur ampleur à l'échelle de la Bretagne et leurs conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes.

De manière générale, au cours de cette période, les anciennes structures agraires (talus, fossés, chemins creux) sont remodelées selon le principe de la ligne droite (appliquée parfois jusqu'à la rectification des cours d'eau) induisant l'ouverture des paysages (Flatrès, 1986 ; Canévet et Lebahy, 1994). Les figures 2 et 3 illustrent les effets de ces remembrements.

Figure 2. *Rectification d'un cours d'eau dans le département du Morbihan suite à une opération foncière (Source : Robin, 1973, localisation non précisée)*

Figure 3. *Conséquences d'une opération de remembrement sur la commune de Guenin dans le Morbihan.*
(Source : Robin, 1973)

Entre 1952 date du premier survol aérien et 1972 date du second, la commune de Guenin dans le Morbihan a été le théâtre d'une importante opération foncière à l'issue de laquelle nous pouvons observer, outre la nouvelle géométrie du territoire :

- un arasement systématique des talus-haies excepté dans la zone riparienne et la conservation de quelques arbres épars,
- une réorganisation du parcellaire augmentant la taille des surfaces cultivées,
- l'apparition avec les travaux connexes de nouvelles dessertes,
- la disparition des chemins ruraux.

Ainsi dans le département des Côtes-d'Armor, pour la période 1960-1980, les arasements subventionnés jusqu'en 1967 totalisaient 17 885 kilomètres, soit à titre de comparaison 40 % du linéaire de talus et de haie existant en 1978 (Danais, 1987).

1.2. La recomposition : vers une évolution des idées sur le paysage bocager

La période des années 1970-80 est une période charnière pour le paysage de bocage. Guidée par des mouvements d'opinions (associations, citoyens), par des préoccupations sociales (atteinte au paysage, émergence de la conscience environnementale) auxquelles se surimposent des travaux scientifiques émerge la reconnaissance de l'utilité de cette forme d'organisation du paysage.

1.2.1. Les premiers éclairages sur les fonctions du bocage

Les modifications apportées sur les paysages de bocage, dont témoignaient les cicatrices du remembrement (tas de souches, traces des talus sur le sol, fosses béantes comblées par les arbres déracinés, figure 4) ont favorisé de nombreux mouvements d'oppositions qui ont conduit les pouvoirs publics à interroger la communauté scientifique (Burel et Baudry, 1999).

Figure 4. *Tas de souches dans la région de Kernascleden*
(Source : Robin, 1973)

En 1976, un important programme de recherche pluridisciplinaire est engagé par l'INRA de Rennes sur les bocages de l'Ouest de la France. Ce programme financé conjointement par le Ministère de l'Agriculture et le Ministère de l'Environnement intitulé « Conséquences de l'arasement des talus en zones bocagères de l'Ouest » piloté par l'INRA de Rennes associé à l'Université de Rennes apporte les « *premiers éclairages sur l'impact hydraulique, anti-érosif et écologique des haies et talus* » (Bazin *et al.*, 1995).

Parallèlement, en 1973, Soltner fait paraître la 1ère édition de *L'Arbre et la Haie*. Véritable guide technique et méthodologique pour la gestion et la reconstruction du bocage, cet ouvrage contribue largement à la reconnaissance des fonctionnalités du bocage. Il vulgarise notamment les recherches scientifiques en appuyant les résultats obtenus par des mises en pratiques (techniques de construction et d'entretien).

Quelques années plus tard, la naissance d'un nouveau champ d'étude, l'écologie du paysage, renouvelle les réflexions sur les conséquences des transformations de l'espace agricole (Burel et Baudry, 1999).

D'une part elle conforte les récents travaux engagés par les équipes de Rennes sur :

- l'importance des systèmes en réseau (favorise la diffusion des espèces, la colonisation des nouveaux milieux) ;
- le rôle des structures verticales (frein aux écoulements de surface, limitation de l'érosion des sols, effet micro-climatique) ;

D'autre part, elle introduit de nouvelles notions (structure, hétérogénéité) qui vont amener les chercheurs à s'interroger sur l'intérêt et l'importance des approches multiéchelles dans l'étude de ces paysages (Baudry, 1988).

Ces travaux ont suscité l'attention des pouvoirs publics mais surtout des défenseurs de cet élément du patrimoine qui y ont trouvé un support et des relais de leurs revendications.

Dans un contexte agricole alors en pleine effervescence, les résultats de ces recherches mais aussi l'évolution des textes réglementaires et législatifs (dans le droit français et européen) ont conduit à la mise en place des premières politiques départementales en faveur du bocage.

1.2.2. Les politiques bocagères départementales : quelques éléments de compréhension

Dès le début des années 1970, les services départementaux de l'Agriculture, en réaction aux « levées de bouclier » anti-remembrement, ont mis en place des dons de plants et/ou des subventions (Fonds Forestier National, Ministère de l'agriculture) pour palier les arrachages de

haies (Jegat, 1996). Ces démarches ont permis de définir les premiers cahiers des charges de plantation qui serviront par la suite à la définition des programmes départementaux bocagers des Conseils généraux.

Ces actions destinées aux communes remembrées avaient pour objectif principal d'encourager la plantation de haies sur les nouvelles limites du parcellaire (Rousseau, 2001). Dans le département des Côtes-d'Armor, les premières plantations ont lieu dès 1972[3]. Elles sont réalisées essentiellement pour cacher des bâtiments (intégration paysagère) et utilisent des espèces à croissance rapide (thuya, laurier palme, épicéa sitka) (Rousseau, 2001). Dans le département d'Ille-et-Vilaine, elles commencent en 1975.

La loi de décentralisation de 1982 a confié aux Conseils généraux des compétences et des missions notamment dans les domaines de l'environnement : protection et valorisation des espaces naturels, du cadre de vie et du paysage. Ces nouvelles prérogatives engendrent une réorganisation des services au sein des départements, notamment des redéploiements de moyens humains, techniques et financiers entre les services déconcentrés de l'Etat et les Conseils généraux. Des services départementaux prenant en charge les questions relatives à l'environnement, au paysage, aux espaces naturels sont ainsi créés. En Côtes-d'Armor, il s'agit de la DAE (Direction de l'Agriculture et de l'Environnement).

Au milieu des années 80, ils instaurent les premiers programmes bocagers départementaux (en 1984 dans les Côtes-d'Armor). Ces derniers sont définis comme une politique de soutien aux opérations de reconstitution du bocage et s'accompagnent d'aides financières uniquement pour les actions en faveur des haies (même si celles-ci ne sont pas situées en limite du parcellaire agricole). Plusieurs raisons expliquent ce choix paysager [4] :

- psychologique : la haie constitue un élément de mobilisation beaucoup plus fort que le talus chez les agriculteurs qui sont sensibles aux fonctions brise-vent, protection du bétail et aux possibilités qu'elle offre pour l'intégration paysagère de leur bâtiment ;
- financière : « le coût d'une politique privilégiant les talus serait de 4 à 5 fois supérieures à celle privilégiant les haies à plat » (Perichon, 2003) ;
- politique : la construction d'une haie est une action qui se voit dans le paysage. Elle permet de marquer l'engagement du département pour la prise en compte de son environnement.

Cependant, les importantes crues dans l'Ouest en 1995 (figure 5), auxquelles sont localement venus s'ajouter des phénomènes importants d'érosion des sols, amènent l'ensemble des acteurs publics (DDAF, Conseils généraux, DIREN, Chambre d'agriculture…) à

[3] Source : Bocher, 2004, enquête sur les constructions bocagères en Bretagne.
[4] Source : Bocher, 2004, enquête sur les constructions bocagères en Bretagne.

reconsidérer ces orientations paysagères en faveur du talus. L'idée étant que le talus, grâce à ses fonctions hydrauliques et anti-érosives, peut constituer un atout dans la régulation des écoulements, dans la minimisation des phénomènes de crue. Cette idée n'est d'ailleurs pas nouvelle puisque dès 1973, suite à un orage dans la baie de Saint-Brieuc, la suppression des talus est mentionnée comme la cause de l'inondation des habitations situées en bas du versant.

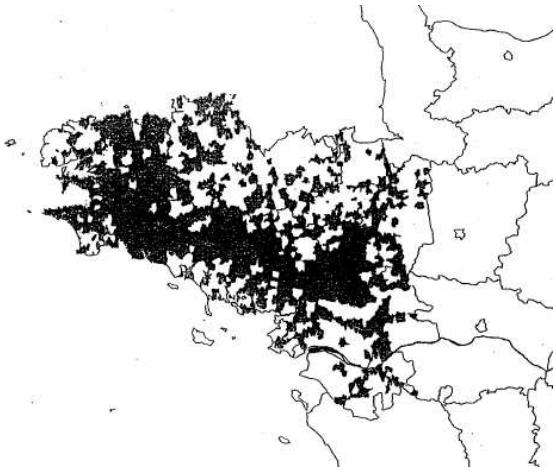


Figure 5. *Carte des communes reconnues inondées entre le 17 et le 31 janvier 1995 (Source : Huet et al., 2001)*

Dans un rapport rédigé en 1995 à l'intention du Premier ministre (Huet *et al.*, 2001) la DIREN faisant état des inondations de cette même année proposait pour la gestion des sols :

- la réalisation d'aménagements anti-érosifs (banquettes, diguettes, fossés et chenaux enherbés),
- la réservation de surfaces pour l'expansion des crues,
- le développement des incitations à la reconstitution de talus et boisements linéaires (haies),
- l'encouragement au maintien d'un couvert végétal sur les sols agricoles en toute saison,
- la reconversion en prairies des surfaces cultivées en maïs et la pratique des labours perpendiculaires à la pente.

En l'espace de 8 ans, de 1995 à 2003, 487 km de talus seront reconstruits dans le cadre des programmes départementaux bretons, soit une moyenne de 60 km par an. Cependant, ces résultats sont très inégaux d'un département à l'autre, lesquels ont pour la plupart privilégié les haies à plat (Perichon, 2003) (figures 6 et 7). Ainsi dans le département d'Ille et Vilaine entre 1995 et 2003, 2 200 kilomètres de haies ont été plantés contre 122 kilomètres de talus. A

l'inverse, le département du Finistère a choisi d'axer sa politique sur une sensibilisation aux talus et leur reconstruction.

En 2000, le nouveau cahier des charges pour l'action bocage dans le Finistère prévoyait entre autres :

- la plantation de talus de plein champ plutôt que des haies sans talus et des haies situées à proximité des bâtiments du siège d'exploitation.
- la baisse des plafonds d'aide pour les haies à plat au profit des talus.

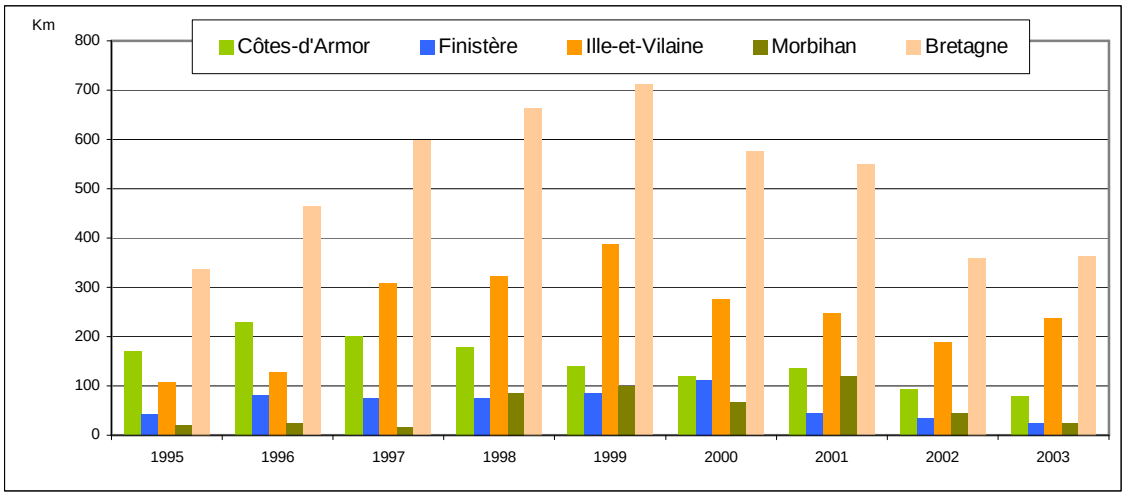


Figure 6. *Linéaire de haies plantées depuis 1995 dans le cadre des programmes bocagers départementaux (Bocher, 2004)*
(Source : DRAF)

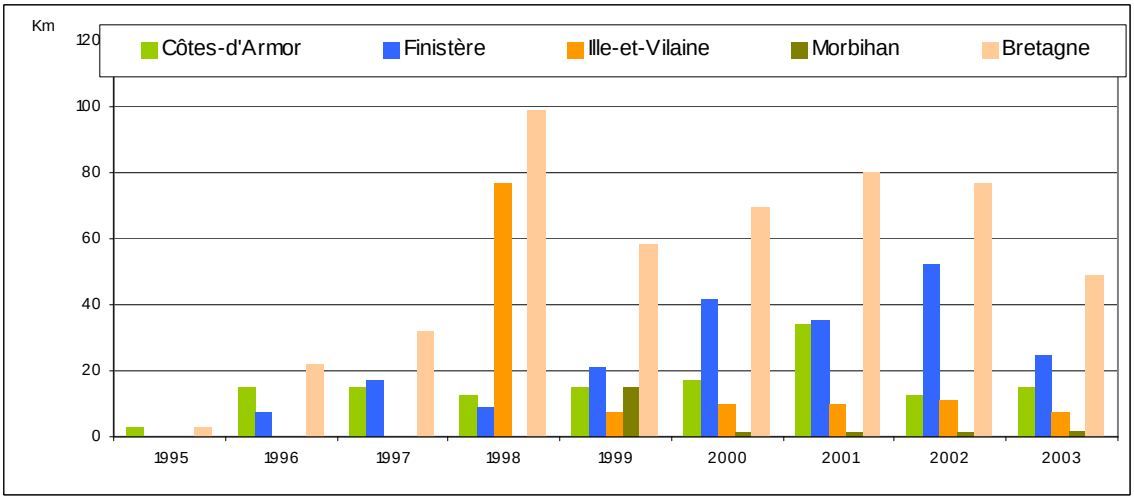


Figure 7. *Linéaire de talus construits depuis 1995 dans le cadre des programmes bocagers départementaux (Bocher, 2004)*
(Source : DRAF)

1.3. Essai de bilan sur l'évolution des paysages de bocage

L'espace agricole breton, notamment le bocage qui le constitue, a été soumis durant les cinquante dernières années à un jeu antagoniste de fragmentation et de défragmentation. Cette dynamique se conjugue à plusieurs niveaux, celui des acteurs, des politiques publiques ainsi qu'à plusieurs échelles spatiales, régionale, départementale et locale. Le remembrement foncier a constitué l'un des principal facteur de l'évolution du paysage du moins par l'ampleur des superficies et le nombre de communes touchées (Croix, 1999). Ces remembrements ont été particulièrement importants pendant la période des années 1960 jusqu'au milieu des années 1970 où l'on a pu observer :

- un agrandissement de la taille des parcelles avec pour effet l'augmentation de la distance de parcours des eaux de ruissellement,
- la disparition d'aménagements ayant une fonction hydraulique tels que les fossés, les talus, les mares et les zones humides,
- la suppression des talus en rupture de pente permettant de freiner l'écoulement des eaux et favorisant les dépôts de sédiments,
- l'augmentation des surfaces imperméables avec surtout une modification de la géométrie des réseaux.

Dans le Nord du département du Morbihan et au Sud du département des Côtes-d'Armor les remembrements ont connu un développement considérable. Canévet et Lebahy (1994) remarquaient qu'en l'espace de 40 ans en Bretagne, près de 65 % de la surface agricole avait fait l'objet d'un aménagement foncier tout particulièrement dans ces deux départements avec une baisse de 40 % du linéaire de haies.

Toutefois, comme il a été dit précédemment, les remembrements n'expliquent pas à eux seuls les transformations du paysage de bocage. En outre, malgré le sentiment d'uniformité véhiculé par des données statistique à l'échelle des départements, l'évolution du linéaire de talus et de haie présente de fortes hétérogénéités spatiales. Comme le souligne Canévet (2004), « *le remembrement n'est pas, du moins chronologiquement, la première cause de débocagement puisque les arasements individuels, hors remembrement, subventionnés ou non, ont précédé puis accompagné l'aménagement planifié* ». Cette stratégie d'aménagement est souvent négligée parce que les transformations sont plus lentes et plus insidieuses, car en dehors de l'enquête publique post et pré-remembrement, il n'existe pas de dispositif permettant d'évaluer les changements. Par exemple, la commune de Pacé, située dans le département d'Ille-et-

Vilaine, à la périphérie de l'agglomération rennaise, a connu un recul de 40 % de son maillage bocager entre 1960 et 1990 sans pour autant avoir fait l'objet d'un remembrement (Canévet, 2004).

La dichotomie entre un territoire remembré dont le bocage aurait disparu et non-remembré dont le bocage aurait peu changé est donc loin d'être aussi tranchée, d'autant qu'entre ces deux stratégies de recomposition du territoire, l'une institutionnelle et l'autre individuelle sont venus s'intercaler, se surimposer, des dispositifs publics dont les orientations et les temps de diffusion ont renforcé la diversité spatiale des paysages de bocage. L'application à différentes dates des primes à l'arrachage des haies dans les départements en donne un exemple : de 1955 à 1958 dans le Finistère, de 1957 à 1967 dans les Côtes-d'Armor, de 1960 à 1974 dans le Morbihan (Canévet, 2004).

Plus récemment, à partir des années 80, des programmes d'aide à la replantation de haies sont mis en place à l'initiative des Conseils généraux. Ces programmes dont les rythmes de plantation par départements sont très inégaux se composent souvent de plantations autour des bâtiments (brise-vent et embellissement) plus qu'en plein champ (Rousseau, 2001 ; Canévet, 2004). Ils sont de plus renforcés au début des années 1990 par le programme du Conseil régional, Harmonie, dont l'objectif est de subventionner les plantations de haies autour des sièges d'exploitation pour les intégrer dans le paysage.

Malgré ces programmes et les initiatives publiques ou citoyennes (association Skol ar C'hleuzioù dans le Trégor, http://www.talus-bretagne.org), le linéaire de talus reconstruit représente à l'échelle des départements bretons un très faible pourcentage de ce qui a disparu (Huet *et al.*, 2001).

De plus, Jegat (1996) fait remarquer qu'en l'espace de vingt ans de politiques de plantation de haies (1975-1995), elles ne représentent qu'une augmentation de la densité de haies bocagères de 30 cm/ha/an. Ce rythme étant à comparer aux 7,5m/ha/an arasés entre 1960 et 1980.

Néanmoins, depuis la fin des années 1990 et le début des années 2000, sous l'impulsion des politiques de reconquête et de protection de la qualité de l'eau (BEP, directive européenne Cadre Eau), nous assistons peu à peu à un changement des politiques bocagères en faveur des talus. La recomposition du paysage est passée de logiques agricoles à des logiques paysagères puis environnementales.

Le talus est placé aujourd'hui au cœur des actions des Bassins versants dans le cadre de la protection des ressources en eau.

2. La crise de l'eau en Bretagne : facteur clé de la recomposition du bocage

Depuis les années 1970, la Bretagne connaît une dégradation régulière de l'état de ses eaux superficielles et souterraines, polluées par des produits issus en grande partie de l'activité agricole. La présence dans les cours d'eau de concentrations de polluants supérieures aux normes de potabilité est devenue un phénomène chronique et pose de nombreux problèmes à la collectivité (sanitaire, environnemental, économique). Pour répondre à ces préoccupations, la Bretagne a mis en place au début des années 1990 un programme régional composé de plusieurs partenaires institutionnels (Etat, Conseil régional, Conseils généraux, Agence de l'Eau Loire-Bretagne) visant la reconquête et la préservation de la qualité de l'eau. Ce programme intitulé Bretagne Eau Pure s'appuie sur une unité fonctionnelle, le bassin versant, afin de mener des actions en cohérence avec les problématiques de gestion de l'eau. Inscrit dans le contrat de Plan Etat / Région 2000-2006, le programme Bretagne-Eau-Pure concerne aujourd'hui 45 Bassins versants.

2.1. La dégradation de la qualité des eaux

En France, l'eau utilisée pour produire de l'eau potable vient à 63 % d'eaux souterraines et à 37 % d'eaux dites superficielles, issues des cours d'eau ou des lacs. Cependant, en Bretagne, 80 % des approvisionnements sont issus des eaux superficielles (Cour des comptes, 2002). Or les eaux superficielles sont particulièrement affectées par les surcharges en nitrate et en pesticides. Pour ces derniers, le seuil des 0,1 µg /l est régulièrement dépassé (Fleury et Guyomarc'h, 2003). En 2001, les résultats des analyses réalisées (DIREN, DDASS/DRASS, CORPEP, Agence de l'eau) montrent que la quasi-totalité des eaux superficielles bretonnes est contaminée plus ou moins gravement par les pesticides (Fleury et Guyomarc'h, 2003).

Le problème de la qualité de l'eau en Bretagne a été soulevé dès le début des années soixante-dix par l'INRA de Quimper (Laimé, 2003, Fleury et Guyomarc'h, 2003). Or, depuis les années 1970, les analyses menées par les services déconcentrés de l'Etat (DIREN, DDASS) montrent une dégradation progressive de l'état des eaux (Cour des comptes, 2002 ; Fleury et Guyomarc'h, 2003). Le cas des nitrates est certes le plus connu en raison de ses prolongements économiques, néanmoins d'autres facteurs de contamination chimique et biologique tout aussi pernicieux sont décelés dans les eaux douces et littorales (matières phosphatées, produits

phytosanitaires, métaux lourds, cyanobactéries). Plus de 75 % du nitrate présent dans les cours d'eau proviendrait de l'activité agricole (Merceron, 1999).

2.1.1. Le cas du nitrate

En théorie, le sol et les plantes avec l'aide de bactéries aérobies et anaérobies vont consommer ces intrants par dénitrification et produire leur propre matière organique. Seulement, en Bretagne, les apports d'azote sur les sols cultivés sont excédentaires au regard des possibilités de résorption. Le nitrate en excédent, très soluble et peu retenu par le complexe argilo-humique, est alors transféré du sol vers les eaux de nappes par percolation (Martin, 2003). Ce processus appelé aussi lixiviation concerne principalement l'azote sous la forme NO_3.

La nappe constitue un réservoir important de nitrate. Elle contrôle les flux de nitrate du sol vers la rivière (Molenat, 1999). Des expériences de traçage isotopique ont montré la forte inertie des systèmes aquifères. Cette inertie dépend de plusieurs facteurs comme l'organisation de l'aquifère, le contexte climatique et géologique. Elle souligne un élément important du fonctionnement du bassin versant : son temps de réponse. Celui-ci peut atteindre plusieurs dizaines d'années (Ruiz *et al.*, 2002).

L'INRA de Rennes, dans le cadre du programme COMORAN (Caractérisation, Observation et Modélisation des transferts de masse et d'énergie en milieu agricole intensif) en relation avec d'autres organismes (Cemagref, CNRS, Universités de Rennes, BRGM…), a étudié sur plusieurs années le comportement de l'azote dans l'aquifère d'un bassin versant morbihannais d'une superficie de 1 193 ha, le Coët-Dan. Les résultats obtenus montrent que le temps de résidence des eaux dans le sol et le sous-sol est très variable et peut aller jusqu'à 5 à 10 ans. Apparaît également une hétérogénéité spatiale verticale et horizontale des concentrations en nitrate dans les unités hydrogéologiques de l'aquifère du bassin versant. En haut de pente les concentrations sont plus fortes que dans les dépressions et plus fortes à la limite supérieure des nappes qu'à leur limite inférieure (Gascuel, 2001). Les prélèvements réalisés dans les premiers mètres de la nappe ont des teneurs très élevées qui peuvent atteindre 200 mg/l (Pauwels, 1998).

Par ailleurs, mais dans une moindre mesure, l'azote peut aussi être transporté sous forme organique particulaire ou minérale ammoniacale adsorbée sur les colloïdes argileux et humiques (Grosclaude, 1999). Ce second mode de transfert est lié aux processus d'érosion et de ruissellement à l'échelle du bassin versant et peut se produire lorsqu'une averse intervient peu de temps après un épandage de fertilisant, entraînant des apports directs aux cours d'eau.

Ces deux modes de transfert expliquent en partie les variations d'azote dans les eaux, la nature ainsi que la disparité spatio-temporelle des phénomènes de pollution.

Un suivi des concentrations d'azote sur le bassin versant du Coët-Dan fait apparaître que lors d'épisodes de crue, les concentrations en azote organique et ammoniacal augmentent à contrario des concentrations en nitrate. Cette variation s'explique par les cheminements différents de ces formes d'azote vers le cours d'eau (Cann *et al.*, 1999). Le nitrate très soluble et facilement lixivié enrichit les nappes tandis que l'azote organique ou ammoniacal est transporté par les eaux de ruissellement. Si les eaux de ruissellement sont peu chargées en nitrate, en revanche dans certains cas, la part de celui-ci à l'alimentation de la crue peut modifier notablement les concentrations dans le cours d'eau (Ruiz *et al.*, 2002).

A l'échelle des saisons, dans la majeure partie des bassins versants de l'Ouest, les concentrations maximales sont observées en fin d'hiver et les concentrations minimales en fin d'été (fin de période d'étiage). A l'échelle interannuelle, la tendance de fond est à l'augmentation particulièrement depuis la fin des années 70 (figure 8). Celle-ci est généralement chiffrée autour de 1,5 mg/l/an en moyenne.

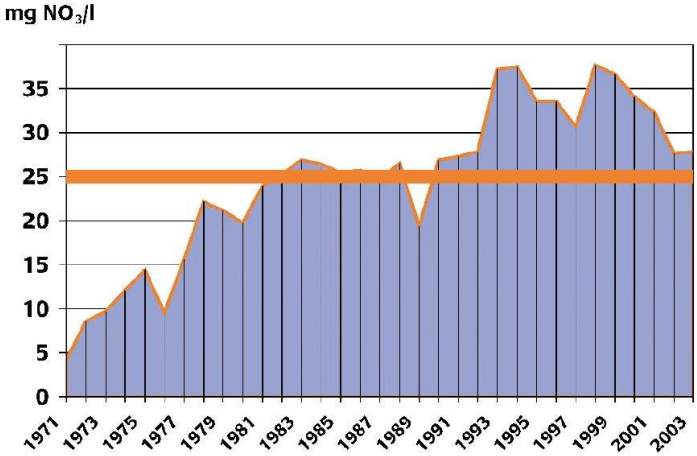
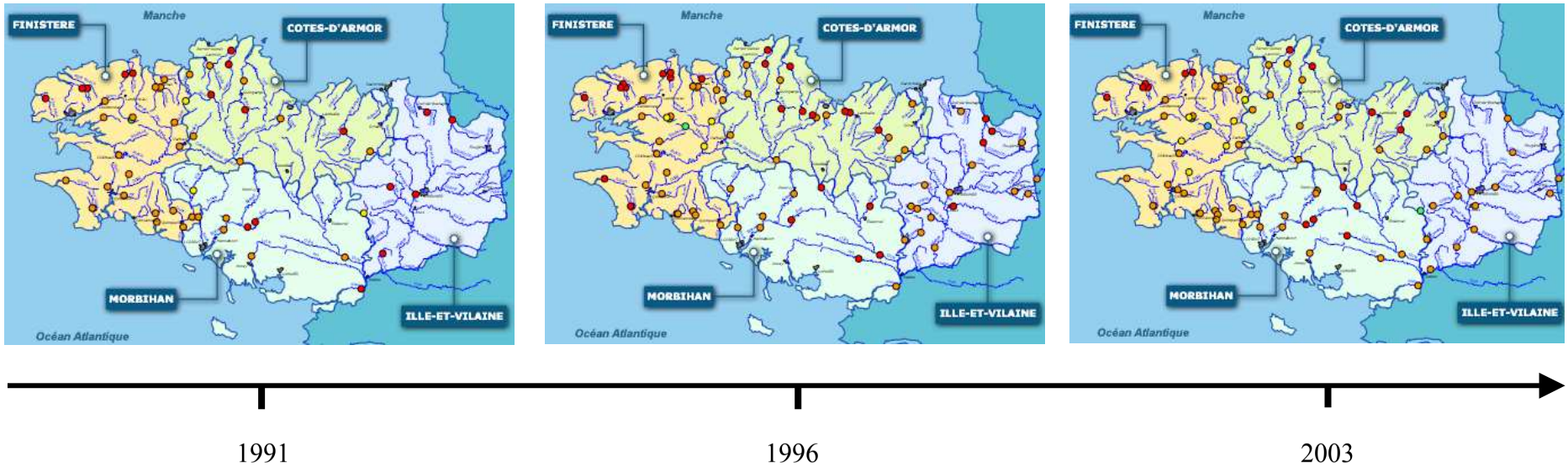


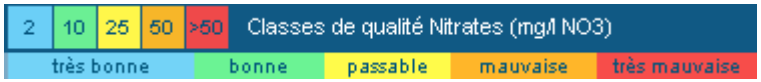
Figure 8. *Evolution des concentrations moyennes en nitrates dans les eaux superficielles depuis 1971 en Bretagne (Source : DIREN, 2003)*

Les concentrations les plus importantes sont relevées dans les cours d'eau du Nord de la région où les teneurs atteignent des valeurs de 50 à 100 mg/l avec des pics très supérieurs à 100 mg/l alors que les rivières du Sud de la Bretagne ont une teneur qui varie le plus souvent entre 25 et 40 mg/l (Fleury et Guyomarc'h, 2003). Cependant au Nord comme au Sud, il n'en reste pas moins une mauvaise qualité puisque les teneurs observées restent presque toutes supérieures à 25 mg/l, seuil à partir duquel la mise en œuvre de mesures de lutte contre le nitrate est reconnue comme nécessaire (figure 9). Ajoutons que le seuil de potabilisation est fixé à 50 mg/l[5].

[5] La Directive européenne 75/440, du 16/06/75 concernant la qualité des eaux superficielles destinées à la production d'eau potable limite les concentrations en nitrates : valeur guide à 25 mg/l et valeur limite obligatoire à 50 mg/l.



Légende



Source : Réseau National de Bassin (RNB), http://www.rieb-eau.org

Figure 9. *Evolution des concentrations en nitrate dans les cours d'eau bretons (méthode SEQ-EAU)*

2.1.2. Le cas du phosphore

Lorsque dans les eaux l'excès d'azote est conjugué avec le phosphore, se produisent alors des phénomènes de pollution organique. L'introduction de ces nutriments entraîne une évolution des systèmes aquatiques du stade dit « oligotrophe » (faible présence en nutriments) vers le stade dit « eutrophe » (riche en nutriments) (Grosclaude, 1999 ; Merceron, 1999). L'excès des nutriments dans le cours d'eau (phénomène d'eutrophisation) conduit à la prolifération du système algal. Ce dernier modifie la composition et la structure de la faune et de la flore (biotope et biocénose).

Le phosphore est présent à l'état naturel dans l'écosystème, mais l'activité humaine a considérablement accru les quantités libérées dans l'environnement. Selon Pellerin (2003) la quantité de phosphore apportée aux eaux superficielles serait de 71 000 tonnes en 2000 en France dont 50 % d'origine agricole, 30 % d'origine urbaine et 20 % d'origine industrielle. La baisse des teneurs dans les lessives, le changement des comportements des consommateurs (achat de lessive sans phosphate), l'amélioration des méthodes de déphosphatation et la modification des techniques de production des industries expliquent que la part des sources urbaines et industrielles tend à régresser au profit du phosphore agricole.

En Bretagne, l'agriculture intensive a conduit à augmenter considérablement les stocks de phosphore dans les sols. Celui-ci est un élément essentiel pour la croissance des végétaux. Mais on estime qu'au-delà de 250 à 300 ppm de phosphore Dyer[6], il cesse d'influer sur la production végétale. Or en Bretagne la teneur moyenne dans les sols est aujourd'hui de 400 ppm (Aurousseau, 1999).

Le phosphore agricole est apporté par les produits de nettoyage (notamment ceux utilisés dans les salles de traite) et les engrais minéraux (phosphore contenu dans les engrais) dont l'usage est en nette diminution mais aussi par les déjections animales[7] dont les volumes augmentent en revanche. D'après Cann *et al* (1999), c'est en Bretagne que la consommation d'engrais minéraux phosphatés aurait baissé le plus. En 1980, elle représentait 35 kg/ha, en 1992, 15 kg/ha et en 1997 14 kg/ha. Cette tendance s'observe également dans les régions de forte densité d'élevage comme les Pays-Bas ou l'Italie du Nord. Contrairement au phosphore urbain ou industriel, le phosphore agricole a un caractère très diffus. Généralement les

[6] « Le phosphore Dyer est un indicateur du phosphore assimilable par les plantes, mais la fraction extraite par le réactif utilisé n'est pas strictement égale à celle réellement assimilée par les plantes, qui reste généralement inconnue et variable selon les espèces et les caractéristiques biologiques du milieu. » (Fleury et Guyomarc'h, 2003).

[7] Parmi les déjections animales, le fumier de volailles constitue l'un des plus riches en phosphore.

concentrations sont très faibles dans les cours d'eau, de l'ordre de 0,1mg/l. Cependant, de fortes concentrations peuvent être relevées au début des crues lorsque le débit augmente (Cann *et al*, 1999).

En Bretagne, peu de données sont disponibles pour suivre ou évaluer la présence de phosphore dans les sols ou les eaux superficielles. La méthode traditionnellement la plus utilisée pour évaluer le phosphore « assimilable » (P2O5) [8] dans le sol est celle de Dyer. Une estimation cartographique des teneurs en phosphore dans les sols cultivés par commune en Bretagne a été réalisée à partir de 500 échantillons pour la période 1990 à 1995 (Aurouseau, 1999). Il en résulte que plus de la moitié des communes bretonnes sont en moyenne dans une situation d'excès (500, 1000, 2000, voire 5000 mg/kg de terre de P205 assimilable) alors qu'une teneur normale est de l'ordre de 250 à 300 mg/kg de terre. D'importantes disparités spatiales sont observables notamment entre les communes sud du département d'Ille-et-Vilaine où les teneurs sont inférieures à 300 mg/kg de terre et la quasi-totalité des communes du département du Morbihan où les teneurs sont supérieures (figure 10).

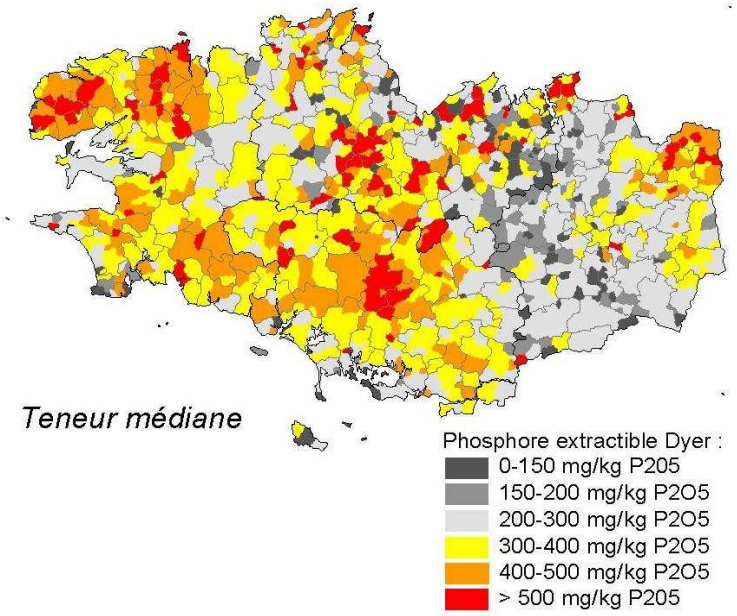


Figure 10. *Statistiques communales des teneurs en phosphore Dyer des sols cultivés de 1990 à 1995* (Source : Aurouseau, 1999)

Néanmoins, ces résultats sont, de l'avis même de l'auteur, à analyser avec précaution compte tenu de l'absence de mesures directes de phosphore total (Aurousseau, 1999). Les estimations résultent de corrélations avec les mesures de phosphore « assimilable », elles ne donnent qu'une vision globale et potentielle des stocks de phosphore dans les sols bretons.

[8] Le phosphore assimilable se trouve sous la forme d'ions phosphoriques présents dans la solution du sol ou fixés au complexe argilo-humique par des ponts calciques. La proportion de phosphore assimilable dans le sol est étroitement liée au pH du sol.

Dans les eaux douces, la plupart des suivis sont effectués à partir des stations existantes du réseau national de bassin (DIREN, 2003). Les prélèvements sont réalisés avec un pas de temps mensuel indépendamment des rythmes hydrologiques ce qui dans le cas du phosphore comme des autres intrants chimiques pose un problème d'interprétation et de représentativité des résultats. Les transferts de phosphore sont liés à des processus hydrologiques rapides (ruissellement) et varient très fortement à des pas de temps très courts (pic de concentration au début de la crue).

La figure 11 permet de situer l'état des cours d'eau bretons pour la période 1997-1999 vis-à-vis des matières phosphorées (phosphore total et orthophosphates). Les classes de qualité sont produites en utilisant la méthode SEQ-EAU. Elles sont déterminées par le prélèvement le plus déclassant constaté dans au moins 10 % des prélèvements effectués pendant la période (annexe 1).

Les secteurs de très mauvaise qualité (couleur rouge) s'observent en aval d'agglomérations et sur de nombreux cours d'eau côtiers, notamment sur le littoral nord. La plupart des cours d'eau du bassin de la Vilaine sont au mieux de qualité passable. Les cours d'eau du département du Finistère sont dans l'ensemble moins affectés par la présence de matières phosphatées.

Figure 11. *Qualité des cours d'eau bretons pour la période 1997-1999 pour les matières phosphorées* (Source : Lemercier, 2003)

2.1.3. Le cas des pesticides

La prise en compte de la pollution des eaux par les produits phytosanitaires en France est une préoccupation relativement récente. [9]. Elle s'est traduite par la mise en place de la cellule technique pluridisciplinaire, la CORPEP[10] en 1990. Son action vise à :

- identifier les principales utilisations de produits phytosanitaires (agricoles ou non),
- dresser un constat des pollutions accidentelles et de la contamination diffuse des eaux de surface,
- évaluer les effets de la contamination sur les divers usages de l'eau, pour la production d'eau potable mais aussi vis à vis du milieu naturel, en étudiant la présence de produits phytosanitaires dans différents compartiments de l'écosystème aquatique,
- préciser les mécanismes de transfert en fonction des caractéristiques du milieu, du climat et des produits phytosanitaires,
- synthétiser les données recueillies et mener des actions d'information et de sensibilisation auprès du public, notamment auprès des distributeurs et utilisateurs de produits phytosanitaires.

En 2001, sur le réseau CORPEP de suivi des eaux de surfaces (8 stations), 85 substances actives ont été recherchées et 32 ont été détectées. Depuis une dizaine d'années quatre molécules se distinguent systématiquement dans les prélèvements : l'isoproturon[11], le glyphosate[12], le diuron[13] et l'atrazine[14] auxquelles il convient d'ajouter leurs molécules de dégradation[15].

---

[9] « Le décret du 3 janvier 1989 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine mentionne pour la première fois les pesticides et produits apparentés comme paramètres soumis à vérification. » (Gillet *et al.*, 2002).

[10] Cellule d'Orientation Régionale pour la Protection des Eaux contre les Pesticides. Elle est composée d'organismes scientifiques et universitaires, de services de l'Etat, de l'agence de l'Eau, de collectivités territoriales et de professionnels.

[11] Désherbant des céréales.

[12] Désherbant présent notamment dans le Round-up, largement utilisé par les particuliers.

[13] Herbicide systémique de la famille des urées substituées, autorisé exclusivement pour le désherbage des zones non agricoles : jardins, cours, trottoirs, parcs, bordures de voiries.

[14] Désherbant du maïs.

[15] AMPA : molécule de dégradation du glyphosate, 2-hydroxy-atrazine : molécule de dégradation de l'atrazine.

Le bilan annuel 2003 de la DIREN, souligne la contamination de toutes les rivières bretonnes avec la présence d'au moins une substance active[16] décelée sur l'ensemble des réseaux de surveillance des eaux superficielles (RNB et CORPEP, 35 stations).

Depuis la fin des années 90, la fréquence de dépassement du seuil de 0,1 µg/l des concentrations en pesticides pour les principales molécules tend à régresser excepté pour l'isoproturon (DIREN, 2003). Néanmoins, cette tendance doit être relativisée :

- d'une part, les programmes de substitution des molécules préconisés dans la lutte pour la reconquête de la qualité des eaux ont conduit à une diversification du nombre de molécules utilisées, notamment dans l'agriculture. En 2003, la moitié des échantillons de prélèvements contient au moins 7 molécules différentes.
- d'autre part, certaines molécules sont présentes en concentrations importantes et ceci malgré leur interdiction ou la définition de périodes restreintes d'utilisation.

C'est le cas par exemple de l'atrazine, interdite depuis fin septembre 2003 mais que l'on détecte en 2004 avec des concentrations atteignant les 13,8µg/l. ou bien encore du diuron présent dans les échantillons alors que celui-ci est interdit d'utilisation 11 mois sur 12 dans l'année (DIREN, 2003). De 1990 à 1998, il est détecté dans 62 % des prélèvements d'eau analysés par la CORPEP.

Bien que les contaminations ne trouvent pas seulement leur origine dans les pratiques agricoles, les facteurs de transferts vers les eaux de surface des produits phytosanitaires ont été étudiés principalement dans ce contexte. Ce choix s'explique par l'importance des contaminations des eaux superficielles résultant de l'emploi des herbicides, en premier lieu ceux de la famille des triazines et des urées substituées qui sont appliqués sur les cultures de maïs. Pour la saison 1997-1998, un suivi analytique des contaminations par l'atrazine et ses métabolites réalisé par Clément *et al.* (1999) sur deux sous-bassins du bassin versant atelier du Coët-Dan : le Kerhoueh et La Villeneuve a montré que :

- le pourcentage de détection des triazines est extrêmement élevé lorsqu'une pluie intervient après l'application du produit ;

[16] La norme à ne pas dépasser pour l'eau potable est fixée à 0,1 µg/l pour chaque type de pesticides et 0,5 pour l'ensemble de ceux-ci.

- lors d'une crue le premier pic de concentration est succédé par des concentrations moins élevées qui correspondraient vraisemblablement à des apports par écoulement hypodermique ;
- en dehors des épisodes de crues les concentrations en atrazine sont faibles ;
- les quantités d'atrazine exportées à l'exutoire du bassin versant sont affectées par un autre facteur que les précipitations.

Ces résultats sont corroborés par les suivis de concentration et de flux de pesticides atrazine et isoproturon sur le bassin versant du Pouliou[17] pour la saison 1997-1998. Le ruissellement de surface concerne une faible quantité d'eau dans le bilan des écoulements mais présente de loin les concentrations les plus fortes.

De plus, sur ce même bassin versant un suivi spatialisé des contaminations par ces deux matières actives met en évidence l'existence de parcelles susceptibles de favoriser les transferts de pesticides vers le cours d'eau. Les pics de concentrations sont selon les auteurs à relier au nombre de parcelles traitées proches du cours d'eau (Gillet *et al.*, 2002).

Aujourd'hui en raison de la modification des pratiques phytosanitaires de nouvelles interrogations et inquiétudes émergent chez les gestionnaires de l'eau et les scientifiques.

Parmi ces dernières on peut noter :

- l'accroissement du nombre de molécules dont on connaît mal le comportement dans l'environnement (41 molécules sont retrouvées pour le réseau CORPEP en 2003 sur 130 molécules recherchées),
- le coût élevé des suivis analytiques qui tendrait à supposer une amélioration de la qualité des eaux superficielles (plus de 900 molécules et près de 9 000 produits homologués sont mis en vente en France).

2.2. Les dispositifs régionaux pour lutter contre la pollution de l'eau

Face à la dégradation de la qualité de l'eau et en application des directives européennes, l'Etat et les institutions publiques ont mis en place de nombreux dispositifs, réglementaires ou contractuels incitatifs. Avant d'aborder la question spécifique des opérations d'aménagement du

[17] Le bassin versant du Pouliou est situé au sud-est du massif granitique de Quintin dans le département des Côtes-d'Armor, sur la commune de Lanrivain.

milieu dans le cadre des contrats de Bassin versant, nous présenterons le programme régional Bretagne-Eau-Pure.

2.2.1. Le programme Bretagne-Eau-Pure

A partir des années 90, les différents acteurs publics (Etat, Agence de l'Eau, Région et Départements) ont décidé de coordonner leurs actions de reconquête de la qualité de l'eau sous la forme d'un contrat pluriannuel intégré au Contrat de Plan Etat-Région : le programme Bretagne-Eau-Pure.

Le premier programme Bretagne-Eau-Pure (**BEP 1, Contrat de Plan 1990-1994**) a été mis en place pour améliorer l'assainissement des communes littorales afin de préserver leur image touristique. Au terme de ce contrat, plusieurs critiques ont été soulevées :

- l'inefficacité d'un « saupoudrage financier » sur quelques communes littorales alors que la gestion de l'eau nécessite un travail sur des territoires plus cohérents prenant en compte l'ensemble du cycle de l'eau (bassin versant par exemple)
- la permanence d'une détérioration rapide de la qualité des eaux

Ces limites du premier programme BEP ont conduit à redéfinir le territoire d'action, désormais le bassin versant topographique, et à réorienter les objectifs en direction de la lutte contre les pollutions diffuses, principalement nitrate et pesticides.

BEP 2 (1995-1999) concerne 20 bassins versants. Le choix de ces bassins versants est porté sur des secteurs à contentieux européen et sur des secteurs considérés comme stratégiques pour l'approvisionnement en eau de la Bretagne (Directive 75-440 pour le paramètre nitrate)[18]. La démarche de Bassin versant est portée par une collectivité locale ou une association, syndicat de production d'eau, syndicat d'aménagement de vallée… La mise en place d'un Bassin versant est à l'initiative de la collectivité et repose sur le principe du volontariat. Cette démarche s'inscrit dans la logique de la loi sur l'eau de 1992 qui a pour objectif une gestion équilibrée et coordonnée de la ressource en privilégiant les principes de précaution et d'action préventive.

Cependant BEP 2 ne regroupe qu'un ensemble d'actions disparates et ne crée que très peu d'instruments nouveaux pour remédier aux problèmes de la qualité de l'eau. Il vise à coordonner et amplifier à l'échelle du Bassin versant des programmes déjà existants, dont le Programme de Maîtrise des Pollutions d'Origine Agricole (PMPOA) et les programmes de résorption en Zones d'Excédent Structurel (ZES) (Fleury et Guyomarc'h, 2003).

[18] Le Gallic et Gillet, 2002.

BEP 3 (2000-2006) va remédier en partie au manque de moyens opérationnels en renforçant les actions spécifiques propres aux bassins versants dans le domaine des conseils agronomiques aux exploitants (EPA, Engagement de Progrès Agronomiques) et celui de la lutte contre les pollutions par les pesticides (classement des parcelles à risque).

BEP 3 concerne aujourd'hui 45 bassins versants. Ses champs d'applications sont organisés selon deux volets :

- les programmes généraux associés, (PMPOA, programmes de résorption dans les ZES, mesures agri-environnementales)
- les actions spécifiques. Elles sont mises en œuvre dans les Bassins versants dotés ou en cours d'élaboration d'un contrat de bassin versant. Leur objectif premier est de sensibiliser les acteurs du bassin aux problèmes de l'eau. Elles prennent la forme de conseils agricoles (pratiques culturales respectueuses de l'environnement, EPA, classes des parcelles à risque), de conseils aux collectivités (plan de désherbage communal), d'aménagements ponctuels (construction de talus, restauration de zones humides), d'animations (démonstrations de techniques alternatives, expositions, conférences dans les écoles…).

L'efficacité d'une opération de Bassin versant est fortement conditionnée par la détermination et la capacité de l'ensemble des acteurs concernés à dépasser les intérêts et conflits liés aux différents usages de ce territoire. Pour relever ce défi majeur, le Bassin versant[19] fonctionne sur un schéma simple (figure 12) caractérisé habituellement par trois niveaux complémentaires.

Le premier niveau, celui du comité de pilotage, regroupe l'ensemble des acteurs selon le principe d'une représentativité la plus complète possible. Des réunions plénières où sont exposés résultats et travaux en cours, doivent conduire à une prise de conscience collective des contraintes et des intérêts de chacun des acteurs. Le second niveau est une émanation du premier. Sur la base des discussions du comité de pilotage, de l'évolution du milieu et des actions engagées, le comité technique, sorte de comité décisionnel où le nombre de membres est restreint, définit les orientations de la politique de Bassin versant. Pour répondre à des questions précises et assurer une meilleure mobilisation, il peut demander la création de groupes de travail professionnels ou thématiques. C'est le troisième niveau.

L'équipe de coordination et d'animation du Bassin versant assure le lien entre ces différents échelons en proposant un appui technique et humain pour la conduite de diagnostic,

[19] Le terme de Bassin versant fait référence ici à l'unité « administrative » définie dans le cadre de BEP. Nous le différencions du bassin versant hydrographique.

l'élaboration des programmes d'actions et le choix de solutions adaptées aux objectifs fixés par le comité de Bassin versant et aux contraintes des acteurs.

Parmi les nombreuses actions menées par ces bassins versants, les opérations d'aménagement du milieu naturel occupent une place prépondérante.

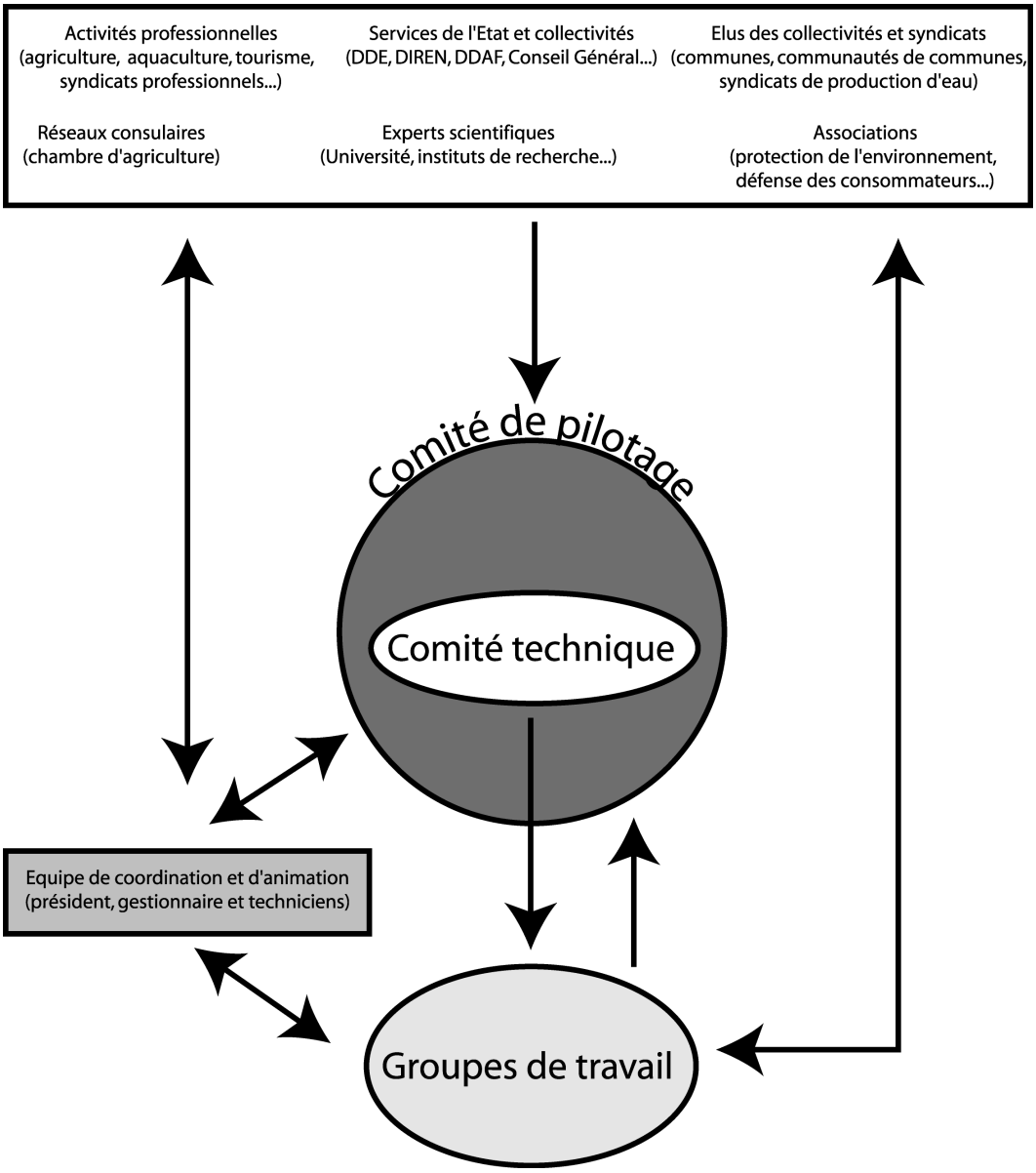


Figure 12. *Schéma général de fonctionnement de l'opération de Bassin versant (Bocher, 2004)*

2.2.2. Bassins versants et aménagement du milieu

Malgré la forte médiatisation sur les atouts des talus en Bretagne, dans les faits peu de talus sont construits ou restaurés. De 1989 à 2001 dans les Côtes-d'Armor dans le cadre des programmes départementaux, 1 577 km de haie ont été plantées contre 90 km de talus. Le montant total des travaux s'élevait alors à 3 822 201 euros[20]. Ce n'est que très récemment que la construction de talus a connu un essor important dans le cadre des opérations de Bassins versants. Cette évolution est fortement liée à l'outil de classement des parcelles à risque phytosanitaire mis en place dans le cadre de BEP 3 pour lutter contre la pollution des eaux de surface par ruissellement.

La démarche « de classement des parcelles à risque phytosanitaire » a pour objectif dans un premier temps d'apprécier pour chaque parcelle de culture d'une exploitation, le risque d'entraînement des produits phytosanitaires par ruissellement de surface vers le cours d'eau en fonction de cinq critères : distance au cours d'eau, longueur de la parcelle dans le sens de la pente, présence d'une protection à l'aval de la parcelle, présence de drainage et valeur de la pente. Ces critères sont relevés sur le terrain par des techniciens agréés et combinés selon la méthode des rangs SIRIS (tableau 1) définie par Aurousseau *et al* (1996). Chaque parcelle est alors classée selon un niveau de risque : faible (en vert), moyen (en jaune), élevé (en rouge).

Non drainée		Distance								
		>200 mètres			De 20 à 200 mètres			< 20 mètres		
Protection aval	Longueur parcelle	pente			pente			pente		
		< 3 %	3 à 5	> 5 %	< 3 %	3 à 5 %	> 5 %	< 3 %	3 à 5	> 5 %
Présence	< 50 m	0	5	10	10	18	26	22	32	43
	50 à 150 m	2	8	14	15	23	32	29	40	51
	> 150 m	4	11	18	20	30	39	37	49	61
Absence	< 50 m	2	9	16	17	27	37	34	46	58
	50 à 150 m	4	12	20	23	33	43	42	55	68
	> 150 m	8	17	25	29	40	51	50	64	78

Drainée		Distance								
		>200 mètres			De 20 à 200 mètres			< 20 mètres		
Protection aval	Longueur parcelle	pente			pente			pente		
		< 3 %	3 à 5	> 5 %	< 3 %	3 à 5 %	> 5 %	< 3 %	3 à 5	> 5 %
Présence	< 50 m	6	13	20	22	31	41	38	50	63
	50 à 150 m	9	17	24	27	37	48	46	59	72
	> 150 m	11	20	29	32	43	55	54	68	82
Absence	< 50 m	9	17	26	30	41	52	51	65	79
	50 à 150 m	12	22	31	36	48	60	60	75	90
	> 150 m	16	26	37	42	55	68	69	84	100

Tableau 1. *Tables des valeurs de l'indicateur de rang SIRIS*

[20] Source : Bocher, 2004, enquête sur les constructions bocagères en Bretagne.

Rappelons que ces facteurs de risques, les seuils et les modalités retenus « *ont été choisis en tenant compte du contexte régional et en privilégiant les mécanismes de contamination des eaux de printemps et de début d'été qui se produisent principalement par ruissellement après les désherbages du maïs* » (Aurousseau *et al.*, 1996).

Suite aux classements, plusieurs scénarii sont proposés à l'exploitant en fonction du niveau de risque et des caractéristiques de ses parcelles. Celui-ci peut :

- adapter ses pratiques de désherbage sur les parcelles à risque moyen et fort en utilisant des techniques alternatives tels que le désherbage mécanique ou bien en limitant le nombre de traitements,
- utiliser des molécules de substitution moins mobiles ;
- réaliser des aménagements paysagers et hydrauliques (talus, bande enherbée, fossé) qui auront pour objectif de bloquer ou de freiner les écoulements de surface.

Le classement des parcelles à risque est un outil de l'EPA (Engagement de Progrès Agronomiques). Il s'agit d'une procédure obligatoire dans le cadre d'un CAD (Contrat d'Agriculture Durable). Les EPA ont été mis en place à la demande de la région Bretagne pour disposer d'un outil intermédiaire, plus souple, qui permettrait aux agriculteurs ne souhaitant pas s'engager dans un CTE (Contrat Territorial d'Exploitation), de mettre cependant en place des pratiques respectueuses de l'environnement. Il s'agissait en réalité, d'une phase de transition afin de guider l'exploitant plus tard vers un CTE.

En dépit de la volonté affichée de réduire l'utilisation des produits phytosanitaires, de tendre vers des traitements plus équilibrés sur l'exploitation agricole, l'aménagement du milieu constitue bien souvent une solution alternative aux changements des pratiques. Les raisons sont nombreuses :

- principe de précaution chez les gestionnaires des Bassins versants qui en aménageant le milieu, outre le fait de limiter les fuites directes, se prémunissent ainsi d'éventuels changements de pratiques. Cela suppose bien sûr que l'aménagement réalisé soit suffisamment pérenne (talus versus bande enherbée).
- démarche volontaire de l'exploitant. Cette dernière étant facilitée par les aides accordées dans le cadre des MAE (Mesures agri-environnementales) ou des subventions des collectivités territoriales (programmes bocagers départementaux, aide directe des Bassins versants).

Aujourd'hui les gestionnaires des Bassins versants rivalisent d'ingéniosité pour aménager le milieu naturel. On retrouve ainsi :

- o les talus (hauteur minimum de 70 cm),

- les haies (bien que leur efficacité contre le ruissellement de surface soit contestée),
- les bandes enherbées (d'une largeur minimum de 20 m),
- les bandes boisées,
- les fossés classiques ou à étages,
- les bacs de rétention.

A ces derniers, il convient d'ajouter les petits travaux sporadiques, tels que le comblement d'une brèche, le détournement d'un fossé…

Pour illustrer la diversité et l'ampleur des aménagements du milieu réalisés dans les Bassins versants, nous avons retenu l'exemple du Bassin versant du Léguer. Situé au nord-ouest du département des Côtes-d'Armor, il s'étend sur une superficie de 480 km² pour une population de 32 000 hab (figure 13). Depuis 1998, il mène une opération de réduction des contaminations des cours d'eau par les produits phytosanitaires sur un sous-bassin versant prioritaire d'environ 1000 ha, le Kervulu, affluent du Min Ran. Ce programme a débuté par le classement des parcelles à risque à la suite duquel les gestionnaires ont décidé de concentrer les actions sur l'aménagement du milieu à travers l'élaboration d'un plan d'aménagement bocager.

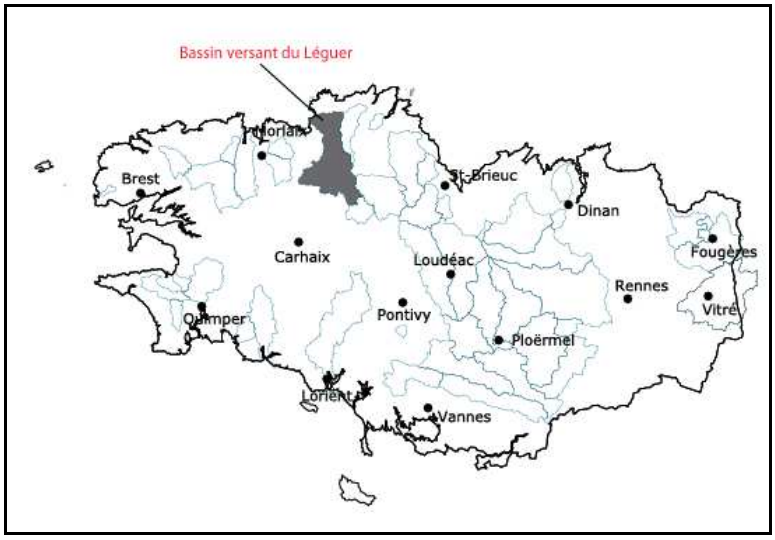


Figure 13. Localisation du Bassin versant du Léguer (Bocher, 2004)

Ce plan comprenait trois étapes :

1. Diagnostic de l'état du bocage existant et propositions d'améliorations (hiver *1998/1999*)
2. Rencontre des exploitants et validation d'un schéma d'aménagements (*hiver 1999/2000)*
3. Réalisation des travaux en fonction des conditions climatiques (*printemps – été 2001)*

Les travaux concernent principalement la reconstitution du bocage ou l'amélioration du bocage existant ainsi que d'autres travaux connexes (réalisation d'ouvrages hydrauliques). Ils ont été classés selon quatre types d'opérations (tableau 2).

Type d'opération	Exemples
1. Restauration et amélioration du bocage existant • Reboucher des brèches • Déplacer des entrées de champs • Aménager les entrées de champs (dos d'ânes)	 Fermeture d'une entrée de champ
2. Création de talus et de haies • Reconstitution de talus nus • Reconstitution de talus plantés • Plantation de haies à plat • Création de bandes boisées	 A gauche reconstruction d'un talus, à droite construction d'un talus Association d'un talus et d'un fossé
Valorisation de zones enherbées • Implantation de prairies • Conservation ou implantation de bandes enherbées	

Type d'opération	Exemples
<u>Création d'ouvrages hydrauliques</u> • Aménagement d'exutoires de fossés • Aménagement de fossés « en étages » • Aménagement de bacs de rétention	 Fossés à étage Bac de rétention Bac de rétention et fossé collecteur

Tableau 2. *Exemple de travaux réalisés sur le sous-bassin versant du Kervulu (Source : Bassin versant du Leguer)*

Le tableau 3 récapitule les travaux proposés avec ceux exécutés sur la totalité du Kervulu.

Types de travaux	Schéma d'aménagement théorique initial	Après 1ère rencontre des agriculteurs	Travaux réellement réalisés
Création : **Talus nus** **Talus plantés** **Bourrelets de charrue**	} 14 km	6,33 km } 11,97km 5,54 km	5,14 km } 7,20 km 1,18 km 0,88 km
Haies à plat (dont bandes boisées)	6,43 km	2 km	1,7 km
Brèches, entrées	237	21	17
Implantation prairies, bandes enherbées	Non proposés	9,6 ha	9 ha
Aménagements hydrauliques	Non prévus	17	13

Tableau 3. *Données (linéaire, surface et effectif) des travaux tous types confondus (source : Bassin versant du Leguer)*

Tous ces aménagements concourent à la recomposition du territoire agricole et par conséquent à la modification des dynamiques d'écoulement de surface au sein de la parcelle, du versant et du bassin versant. En effet, l'un des points importants de ces travaux est le territoire d'action. Les EPA et le classement de parcelles qui conduisent à proposer les scenarii d'aménagement sont conclus sur des bassins versants prioritaires d'une superficie de 1 500 à 2 000 ha pour une durée de 2 à 3 ans. Or à l'heure actuelle aucun dispositif, aucun indicateur, ne sont disponibles pour évaluer leurs impacts sur le cheminement de l'eau de surface à l'échelle du bassin versant et par conséquent sur les transferts de polluant.

Entre outre, il n'existe pas non plus à l'heure actuelle de données chiffrées disponibles permettant de connaître la nature et les superficies des travaux d'aménagements réalisés pour l'ensemble des bassins versants. Les informations sont dispersées sur différents supports. Aucun protocole de standardisation pour définir et structurer la donnée n'est en place. L'exemple le plus parlant est le linéaire d'éléments bocagers reconstruits (talus et haie). Les différentes typologies utilisées dans les bassins versants illustrent ce problème[21]. Trois typologies se distinguent :

- **Typologie 1 :** linéaire de talus et linéaire de haie reconstruit bien identifiés avec une typologie en trois classes. Talus, haie sur talus, haie à plat,
- **Typologie 2 :** linéaire de talus bien identifié mais les haies à plat sont indifférenciées des haies sur talus,
- **Typologie 3 :** linéaire de talus et de haie confondus sous le terme de bocage.

[21] Source : Bocher, enquête auprès des bassins versants bretons, 2004.

Le constat est identique en ce qui concerne les données géographiques. Celles-ci sont très hétérogènes, pour la plupart disponibles dans des rapports sous la forme de cartes. Lorsqu'elles sont présentes en format numérique leur utilisation est rendue délicate. La collecte des données souffre de l'absence de normalisation (pas de référentiel commun, de règles communes de numérisation, de nomenclature pour qualifier les objets relevés). Pourtant cette normalisation est d'autant plus importante que la majeure partie des Bassins versants fonctionne avec des prestataires de services (bureau d'étude, chambre d'agriculture, association…). Un même bassin versant peut donc se retrouver avec plusieurs producteurs de données[22]. Cette situation peut d'ailleurs se complexifier dans le temps en raison d'un turn-over important du personnel, souvent embauché pour des missions très courtes[23].

Malgré les études obligatoires menées dans le cadre de diagnostic, en amont d'une opération foncière ou des programmes départementaux de reconstitution du paysage, les données géographiques sur le linéaire de talus et de haies sont quasi inexistantes. Elles sont souvent traduites en synthèses statistiques, agrégées à l'échelle d'unité administrative, commune, canton, département. C'est le cas par exemple, des données de l'IFN (Inventaire Forestier National) produites par interprétation de photographies aériennes et qui sont distribuées sous la forme d'un linéaire total de haies et de talus à l'échelle du département.

D'une manière générale, c'est toute la thématique propre au paysage qui manque de données homogènes et fiables lorsque l'on se place à l'échelle de l'unité de gestion bocagère : la parcelle. Paradoxe pour un paysage qui en Bretagne a fait et fait encore l'objet de nombreux travaux. En 1996, Jegat (1996) soulignait ainsi que « la description des bocages à l'échelle régionale est un domaine où l'absence d'antécédents méthodologiques rend l'analyse difficile ».

Ces constats posent plus largement la question de l'efficacité de l'action publique. L'absence de base de données géographiques rend impossible le suivi post-aménagement des travaux réalisés. Dans la région de Loudéac, il a été ainsi estimé en 2004 que plus 1/3 des plantations de haies ou des constructions de talus subventionnées par des fonds publics ces 20 dernières années n'existait plus (entretien téléphonique[24]).

Pour le scientifique, cette carence nuit à la validation (ou l'invalidation) des résultats de recherche (Baudry et Jouin, 2003) en rendant difficile leurs transpositions sur d'autres territoires.

Des tentatives ont été faites pour améliorer le suivi et l'évaluation des politiques bocagères, notamment dans le département du Morbihan par l'observatoire départemental de

[22] Source : Bocher, 2004, enquête sur les constructions bocagères en Bretagne.
[23] L'essentiel du personnel des Bassins versants est recruté sous la forme de missions, aux durées très variables, au maximum de 3 ans.
[24] Source : Bocher, 2004, enquête sur les constructions bocagères en Bretagne.

l'environnement (ODEM). En 1994, à la demande du Conseil général, l'ODEM présentait une méthodologie pour un Schéma Départemental d'Aménagement du Bocage (S.D.A.B.). De l'avis même des auteurs, la méthode était perfectible mais son élaboration avait permis de dégager un certain nombre de problèmes liés à l'état des connaissances scientifiques, au niveau actuel des références méthodologiques et à la disponibilité des données environnementales aux échelles souhaitées (Grouazel, 2002). Malgré tout, celui-ci ne sera pas appliqué.

L'évolution récente des politiques européennes, Directive Cadre Eau, Convention européenne du paysage (dite Convention de Florence, 20 octobre 2000), les rapports d'enquêtes nationaux (Cour des comptes, 2002 ; rapports sur les observatoires) et le rapport d'évaluation du programme BEP 3 engagé par la Région Bretagne (Tro Breizh des Bassins versants) laissent entrevoir de possibles améliorations et capitalisation des méthodes et des outils de suivi du milieu naturel. D'ailleurs dans le département, des Côtes-d'Armor un groupe de travail sur le bocage réunissant les techniciens de Bassin versant a été élaboré[25].

Conclusion du chapitre 1

En 50 ans, avec la modernisation de l'agriculture, le paysage rural breton a connu de profondes transformations qui ont conduit à éclater la structure agraire traditionnelle. Les petites parcelles encloses par des talus ont laissé place à de grands blocs de cultures. Le regroupement parcellaire et la suppression des obstacles à l'écoulement des eaux ont mis à nu de grands impluviums continus et favorisé ainsi les transferts rapides entre les versants et le talweg.

L'intérêt pour la conservation du bocage s'est manifesté lors des années de remembrements effrénés nécessitant ainsi de repenser les méthodes d'aménagement pour tendre vers de meilleures pratiques : conservation des talus ayant une fonction hydraulique par exemple. Cependant, ce n'est réellement qu'à partir du milieu des années 1990 que le bocage, notamment le talus, est intégré dans des politiques de gestion équilibrées du milieu naturel. Les programmes publics de « rebocagement » passent ainsi progressivement d'une préoccupation paysagère (construction de haies) à une préoccupation environnementale plus large : qualité de l'eau et érosion des sols. L'opération régionale de reconquête de la qualité des eaux de surfaces et souterraines (BEP) portée par les Bassins versants place les actions d'aménagement du

[25] Un site internet résume les objectifs et travaux de ce groupe de travail : http://jaudy-guindy-bizien.dyndns.org/wikibocage

milieu, construction de talus, restauration de zones humides, au centre du dispositif de gestion de la ressource en eau. Des programmes incitatifs pour l'aménagement - ou le réaménagement - du milieu rural sont mis en place. Ils sont largement soutenus par les conseils généraux puis par le fond structurel européen FEOGA. Le bocage devient une préoccupation contemporaine permettant de répondre aux nouvelles exigences de gestion de l'espace rural.

Au début des années 2000, les travaux d'aménagement du milieu se renforcent nettement dans les Bassins versants, particulièrement dans le département des Côtes-d'Armor. Aujourd'hui, il ne s'agit plus de construire uniquement du talus mais de repenser la circulation des écoulements de surface dans le bassin versant afin de limiter au maximum les transferts rapides vers le cours d'eau. Un panel de dispositifs est ainsi mis en place dont l'exemple du Bassin versant du Léguer illustre la diversité et la complexité. Pour le scientifique ces aménagements soulèvent des questions essentielles :

Quelles sont les conséquences des aménagements actuels sur le parcours des écoulements de surface ? Peut-on les évaluer ? Peut-on définir les conditions de leur efficacité ? Si les réponses à ces questions constituent un enjeu important du point de vue scientifique, elles sont pour le gestionnaire tout aussi capitales. En effet depuis les années 1980 et plus récemment avec les programmes de reconquête de la qualité de l'eau, des efforts financiers considérables ont été réalisés par les pouvoirs publics pour réaménager les territoires agricoles. De tels investissements nécessitent des outils pour mesurer l'efficacité de l'action publique. Or nous avons signalé qu'il n'existe aucun dispositif pour en évaluer les effets, ni même de sources de données homogènes et fiables.

Chapitre 2. Impacts des activités humaines sur les écoulements de surface en territoire agricole : de la parcelle au versant

Désignés sous le terme de ruissellement de surface, les écoulements de surface sont une composante du cycle hydrologique. Ils sont associés à l'écoulement rapide de crue (Cosandey et Robinson, 2000). En milieu naturel, les flux d'eau transportés à la surface du sol résultent de deux types de situations (Cosandey et Robinson, 2000). La première se produit lorsque l'intensité des précipitations est plus forte que la capacité d'infiltration du sol. Il s'agit du ruissellement par dépassement de seuil d'infiltration (ruissellement hortonien). La seconde dépend de l'état hydrique de celui-ci. Elle se déclenche lorsque le sol est déjà saturé. Il s'agit du ruissellement par dépassement de seuil de saturation (mécanisme de Dunne).

L'évolution des pratiques et des paysages agricoles ont ces dernières années conduit à accentuer les mécanismes engendrant les écoulements de surface (ruissellement hortonien). L'agrandissement du parcellaire et la mise en œuvre de nouveaux systèmes de culture (abandon des prairies, introduction de cultures de printemps…) ont mis à jour de grands impluviums (une seule parcelle de culture sur un versant) qui, en l'absence de couvert végétal, favorisent la formation du ruissellement de surface au sein de la parcelle et/ou de groupes de parcelles (Bollinne, 1974 ; Neboit, 1983 ; Martin *et al.*, 1997).

Sur les parcelles et les versants cultivés, le ruissellement de surface tend à s'organiser en fonction des motifs linéaires d'origine agraire (traces de roues, fourrières, dérayures, sens du travail du sol) ou des aménagements anthropiques (réseau de voirie, fossés, talus, drainage souterrain) formant ainsi un réseau d'écoulement (Auzet, 1990 ; Souchère, 1995). Suivant l'organisation spatiale de ces motifs, le cheminement de l'eau de surface peut être freiné, stoppé ou dérivé, induisant ainsi des discontinuités hydrologiques (Moussa *et al.*, 2002). Ludwig *et al.* (1996) remarquent que les parcelles agricoles sont fréquemment isolées hydrologiquement. Néanmoins, dans des systèmes complexes, les écoulements de surface peuvent se réorganiser en présence d'aménagements linéaires ayant pour conséquence d'une part de connecter des unités spatiales parfois très éloignées et d'autre part de modifier les limites conventionnelles du bassin versant (Moussa *et al.*, 2002 ; Ludwig *et al.*, 1996 ; Mérot, 1999).

Dans ce chapitre, nous essaierons d'établir une synthèse des connaissances quant à l'impact des activités humaines sur les écoulements de surface en territoire agricole à l'échelle de la parcelle, du versant et du bassin versant. Le cheminement de l'eau de surface est envisagé comme l'emboîtement de lignes de ruissellement qui se structurent dans l'espace et le temps en fonction de la configuration et des caractéristiques physiques et anthropiques qu'elles rencontrent. Il s'agit du parcours emprunté par les eaux de ruissellement de leur point d'apparition à un exutoire final. Cet exutoire n'étant pas nécessairement relié directement au réseau hydrographique pérenne.

Les mécanismes d'apparition du ruissellement ne seront pas ici traités en tant que tels.

L'ambivalence des jeux d'échelle spatiale et temporelle dans la formation du ruissellement nous amènera à nous positionner tantôt à l'échelle de la parcelle et du versant, tantôt à l'échelle de l'évènement pluvieux et de l'année hydrologique.

1. Le couvert végétal

L'effet du couvert végétal sur le ruissellement de surface à l'échelle d'une parcelle est un fait acquis depuis longtemps. Feodoroff (1965) cite ainsi les travaux de Wollny (1880) qui a montré que, dans certains cas, seulement 45 à 88 % de la pluie atteignait le sol, le reste étant intercepté par les feuilles. Pour résumer, plus le couvert végétal est dense et plus les risques d'apparition d'un ruissellement de surface seront limités (Feodoroff, 1965 ; Bollinne, 1974 ; Neboit, 1983).

A l'échelle des versants, la question du couvert végétal a été posée en terme de continuité des aires de production, notamment avec le développement de la grande culture (Papy et Douyer, 1991). Cette évolution a conduit à s'intéresser à la répartition spatiale des cultures et à proposer des pratiques culturales moins érosives ou des aménagements de protection dans les secteurs à risque (Neboit, 1983 ; Boiffin et Papy, 1988 ; Auzet, 1990). De nombreuses expérimentations et simulations ont été réalisées pour évaluer les pertes en sol ou les volumes ruisselés à l'échelle de versants et de bassins versants (De Roo, 1998 ; Martin, 1996 ; Van Rompaey *et al.*, 2003 ; Souchère, 2003). Nous présentons ci-dessous un résumé des connaissances de l'effet du couvert végétal à ces différentes échelles spatiales.

1.1. A l'échelle de la parcelle

La couverture végétale intervient sur le ruissellement à deux niveaux (Bolline, 1974) :

- elle protège le sol de l'impact des gouttes de pluie,
- elle freine et filtre le ruissellement.

En système de grande culture et sur les sols à faible stabilité structurale, elle intervient dans la formation de la croûte de battance contrôlant ainsi l'apparition du ruissellement de surface (Boiffin *et al.*, 1988 ; Auzet, 1990). L'efficacité du couvert est conditionnée par la densité de la culture. Plus le sol sera couvert et plus le risque de déclenchement du ruissellement

sera limité. Dans les systèmes agricoles intensifs situés sur les terres limoneuses du Nord et de l'Ouest de la France, la couverture végétale conditionne très majoritairement la formation du ruissellement de surface et l'érosion hydrique des sols (Le Bissonnais *et al.*, 2002). Elle s'effectue principalement au cours de deux périodes : en fin d'automne et de l'hiver et au printemps (Boiffin *et al.*, 1988 ; Papy et Douyer, 1991 ; Martin *et al.*, 1997).

La période automne-hiver

A la fin de l'automne et au cours de l'hiver, les cultures d'hiver et les intercultures sans débris de végétaux constituent un impluvium privilégié pour les pluies automnales et hivernales qui, de faible intensité mais régulières, vont faciliter la formation d'une croûte de battance et par conséquent le ruissellement de surface (Auzet, 1990 ; Papy et Douyer, 1991 ; Martin *et al.*, 1997).

La période printemps-été

Le ruissellement pendant la période printemps-été est lié aux précipitations orageuses de forte intensité qui peuvent mobiliser des quantités importantes de terre. Il est facilité sur les semis tardifs de printemps tels que le maïs ou les betteraves et sur les cultures d'hiver dont le sol est déjà battant (Papy et Douyer, 1991). Cependant, les aires émettrices sont beaucoup plus réduites par rapport à la période automne-hiver et leur localisation plus aléatoires (Auzet, 1990).

L'efficacité des cultures

L'efficacité d'une culture sur le ruissellement est subordonnée à sa capacité de croissance et à la date de semis. Pour une culture couvrant rapidement le sol (moutarde blanche), Martin *et al.* (1997) montrent que ce n'est qu'avec un semis réalisé entre fin mai et début septembre que l'on peut couvrir le sol avant la formation de la croûte de battance. L'expérience est menée pour des parcelles sur sols limoneux dans le Pays de Caux. Les auteurs soulignent aussi que pour des cultures de printemps locales semées entre fin février et début mai, le développement d'une croûte de battance est fréquent avant la couverture du sol par la plante.

Parmi les différents couverts, les surfaces en herbe jouent un rôle particulièrement important. Une étude réalisée sur des parcelles expérimentales en jachère (moutarde et mélange de Ray-Grass-Trèfle) a montré que l'érosion par rapport à un sol nu était réduite d'un facteur 20 pour la saison, voire d'un facteur 100 pour un orage et ceci grâce à une limitation de la concentration en terre dans le ruissellement (Gallien *et al*., 1995). Ces résultats sont corroborés

par les travaux de Fullen (Fullen, 1998) qui après des suivis sur un site expérimental dans l'Est du Shropshire (RU) sur des placettes de 25 m², conclut que la mise en jachère fixe de type prairie permet de limiter considérablement le ruissellement et l'érosion. Cependant, celui-ci précise que le taux de recouvrement doit être supérieur à 30 % de la surface pour obtenir une réduction significative de l'érosion.

A l'échelle du versant, la répartition des cultures induit des discontinuités spatiales dans l'apparition du ruissellement et donc dans le temps réponse du bassin versant.

1.2. A l'échelle du versant et du bassin versant

Dans les programmes de gestion des ressources en eau, les prairies sont utilisées comme dispositifs de protection pour limiter les transferts de polluants par ruissellement de surface de la parcelle cultivée au cours d'eau. Elles prennent la forme de bandes enherbées. Comme le mentionne Lecomte (1999), de très nombreuses études ont été réalisées sur l'impact de ces dispositifs notamment aux Etats-Unis d'Amérique. Il réfère ainsi à Miller *et al.* (1997) qui ont observé entre les années 1970 à 1999, plus de 250 publications américaines traitant des dispositifs de contrôles des pollutions diffuses par l'implantation ou la conservation de végétation. Globalement, ces travaux montrent que les dispositifs enherbés peuvent intercepter de façon efficace le ruissellement de surface (Asmussen *et al.*, 1977). Toutefois, ces travaux montrent aussi que l'efficacité d'une bande enherbée est conditionnée par plusieurs facteurs comme le piétinement par les animaux, la saturation en eau du sol, la position topographique, l'organisation du ruissellement en amont du dispositif… (Lecomte, 1999). Lecomte (1999) qui a observé pour certains types d'événements pluvieux que les bandes enherbées permettent une réinfiltration du ruissellement de l'ordre de 80 % pour une largeur moyenne de 6 m, note aussi que la gamme de variation de l'efficacité peut être très importante de 7 à 100 % : l'efficacité étant réduite lorsque le ruissellement est concentré.

Sur le versant, l'influence de l'agencement des prairies par rapport aux cultures a été observée par Takken *et al.* (1999a). Les auteurs remarquent que des dépôts se forment aux zones de transition entre parcelle à sol nu et parcelle avec une culture couvrante. Ces dépôts peuvent contribuer pour plus de 18 % à la masse totale des particules sédimentées au sein d'un bassin versant (Takken *et al.*, 1999a).

A l'inverse, Delahaye (2002) montre à partir d'une modélisation spatiale l'effet néfaste des grands îlots cultivés qui augmentent les surfaces potentiellement ruisselantes et favorisent la concentration des écoulements de surface.

A l'échelle de deux bassins versants situés en Pays de Caux, Souchère *et al.* (2003) ont évalué l'efficacité des mesures de conversion des terres arables en prairie à l'aide du modèle STREAM (Sealing end Transfer by Runoff and Erosion related to Agriculture Management). Deux scenarii sont testés.

Le premier sur le Bassin versant de Bourville d'une superficie de 1 050 ha montre qu'une diminution de 17 % des prairies pour une simulation d'un évènement pluvieux de 21,6 mm durant 3 h 41 mn augmente de plus de 75 % le ruissellement et de 85 % les pertes de sol à l'exutoire.

Le second sur le Bassin versant de Blacqueville d'une superficie de 2 905ha occupé à 63 % de terres arables et à 30 % de prairie, 5 % de forêts, met en évidence l'importance de la localisation des prairies. La simulation est réalisée pour une pluie de 40 mm durant 6 heures. Ainsi pour une augmentation de 1 % de la surface en prairie mais localisée dans un axe majeur de ruissellement, le volume de ruissellement simulé atteint 49,970 m3 alors qu'en son absence il est de 92,330 m3. De plus, la même superficie de prairie (soit 29 ha) localisée au hasard donne des résultats insignifiants.

Transposé à une échelle régionale, le modèle STREAM appliqué à un événement pluvieux catastrophique confirme ces observations (King *et al.*, 2003). L'estimation des volumes ruisselés est réalisée sur le bassin versant de Villers Escalles en Haute-Normandie : bassin versant agricole dédié aux cultures intensives avec un paysage d'openfield, essentiellement composé de sols limoneux et caractérisé par un faible relief. Il apparaît que lors d'évènements hivernaux « normaux » la mise en herbe des zones de concentration du ruissellement réduit considérablement les volumes ruisselés. En revanche, leur effet est limité en cas d'événements orageux importants.

Or, depuis la Seconde Guerre mondiale, les contextes économiques et les politiques agricoles successives ont conduit, dans la plupart des pays européens, à la régression des surfaces en prairie. En France, en progression jusque dans les années 1970, elles ont diminué de 25 % depuis 1996 (Ifen, 1996). Le grand Ouest est particulièrement touché. Ainsi dans le département du Morbihan le recul des surfaces toujours en herbe atteint 53 %, dans l'Eure et Loir, il est de 62 %. Cette régression a été accélérée par l'introduction de quotas laitiers de 1984 avec la PAC (Politique Agricole Commune). Les éleveurs en limitant leur production de lait ont diminué les surfaces destinées à nourrir les bêtes pour les affecter à des cultures de vente (céréales, olégineux).

Ces recherches soulignent l'importance des surfaces en herbe dans le contrôle des flux de ruissellement et des transferts de particules. Elles donnent des éléments pour apprécier

l'impact de l'abandon des prairies au profit des cultures industrielles et permettent de faire des hypothèses sur les conséquences d'une réduction supplémentaire de leur surface dans les systèmes de production actuels (Souchère *et al.*, 2003 ; Joannon, 2004).

1.3. Dépendance spatio-temporelle : conséquence sur le ruissellement

Le temps est une notion complexe mais indispensable pour appréhender la formation du ruissellement et sa dynamique dans le bassin versant. Il donne une idée du rythme des changements, des évolutions et par conséquent de la réponse du milieu. En ce qui concerne l'occupation du sol, les échelles temporelles peuvent être distinguées selon trois niveaux.

- **l'échelle de la culture** qui caractérise les étapes de croissance de la plante et par conséquent le degré et le temps d'exposition du sol aux précipitations. Ainsi, l'effet d'un couvert végétal peut être limité si une dégradation du sol a eu lieu antérieurement au développement de celui-ci (Cros-Cayot, 1996).
- **l'échelle des systèmes de cultures** qui détermine les successions culturales et les itinéraires techniques qui leur sont appliqués (Monnier *et al.*, 1986). Elle permet par exemple d'anticiper les superficies des cultures potentiellement ruisselantes.
- **l'échelle des politiques (agricoles ou économiques)** qui influent sur l'orientation des productions (Souchère *et al.*, 2003). Papy et Douyer (1991) remarquent ainsi que pour le Pays de Caux sur une période de 30 ans (1960-1989) une concomitance entre la fréquence des inondations catastrophiques et l'évolution de l'occupation du sol se traduisant par une augmentation des surfaces aptes à ruisseler.

Les deux exemples suivants illustrent cette dépendance entre les échelles spatiales et temporelles et leur conséquence sur le ruissellement et l'érosion. Le premier expose l'impact d'un feu de forêt et le second celui de l'évolution d'un contexte politique.

Martin (1996) a étudié l'incidence d'un incendie de forêt sur l'érosion hydrique dans le sud de la France. Les mesures d'érosion ont été réalisées à l'exutoire du bassin versant du Rimbaud (1,46 km²) et sur une parcelle expérimentale (75,2 m², longueur de 12 m, pente de 19 %). Ce site fait partie du bassin versant de recherche et expérimental (BVRE) du Réal Collobrier géré par le Cemagref depuis 1966. L'incendie a eu lieu en août 1990 et a parcouru plus de 84 % du bassin versant. Avant l'incendie la végétation était constituée d'un maquis complanté de chênes lièges et de pins maritimes. A l'échelle de la parcelle, la mise à nu du sol a

provoqué une accentuation considérable de l'érosion. Les taux annuels atteignent 883 t/km² en 1990, 1634 t/km² en 1991-92, 835 t/km² en 1992-93. Après une reprise de la végétation, le taux n'est plus que de 31 t/km² en 1993-94. A l'échelle du bassin versant, l'incendie a nettement modifié le fonctionnement du bassin versant où le comportement du ruisseau est devenu fortement impulsionnel (montée de crue en 5 minutes). Cependant, à l'exutoire du bassin versant les mesures d'exportation de particules solides ne sont pas aussi tranchées que sur la parcelle. Elles indiquent des taux d'érosion spécifiques annuels de 569 t/km² en 1990-1991, 66 t/km² en 1991-92 et 76 t/km² en 1992-93. Pour l'auteur, ces résultats s'expliquent par un effet d'échelle. Plusieurs hypothèses sont avancées :

- La longueur des surfaces soumises à l'érosion et leur position dans le versant influent sur les temps nécessaires aux particules mobilisées pour atteindre un chenal d'évacuation.
- La parcelle analysée est très courte et fortement sensible aux fortes intensités de précipitations alors que sur le reste du bassin versant l'érosion nécessite des épisodes pluvieux suffisamment longs pour que les écoulements de surface se concentrent sur les versants et rejoignent les talwegs.
- L'hétérogénéité des reprises de végétation.

Dans les pays communistes de l'Europe de l'Est au lendemain de la Seconde Guerre mondiale un système reposant sur des coopératives agricoles et des fermes d'Etat a été imposé pour augmenter les productions agricoles (Van Rompaey *et al.*, 2003). Ce système a conduit à une réorganisation des structures agraires et des modes de productions :

- agrandissement des parcelles (champ atteignant des superficies de 100 ha, figure 14) ;
- conversion des prairies et des pâtures en des terres arables ;
- instauration de la monoculture.

Ces transformations ont accéléré l'érosion des sols, les transports de sédiments sur les terres arables et contribuées à dégrader la qualité de l'eau.

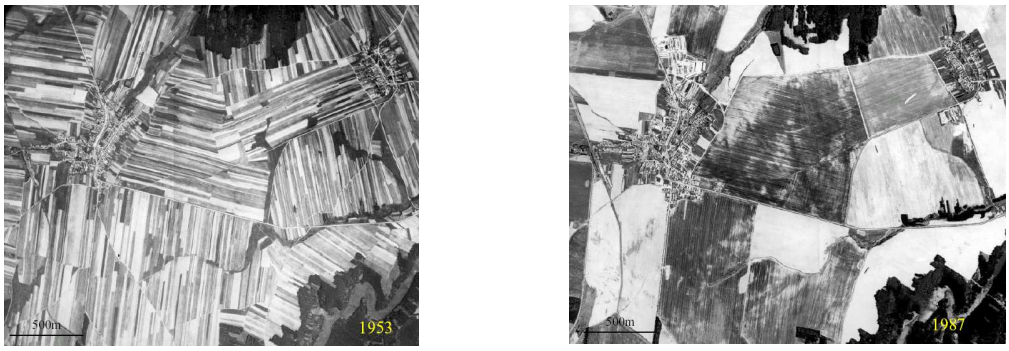


Figure 14. *Evolution du parcellaire dans le village rural de Cista situé au sud-ouest de la République Tchèque : à gauche avant la collectivisation en 1953, à droite après la collectivisation en 1987 (Source : Van Rompaey et al., 2003)*

Depuis la fin du régime communiste en 1990, les anciens propriétaires terriens et leurs successeurs se sont réapproprié leur parcelle. Les grands champs collectifs ont été fractionnés en plus petites unités spatiales et les terres qui n'ont pas été réclamées ont été laissées en jachère ou affectées en pâture. Cette nouvelle réorganisation du système agraire a eu un effet rétroactif positif sur l'érosion des sols et les transferts de particules vers les rivières. Van Rompaey *et al.* (2003) ont modélisé l'impact de ces transformations à l'aide du modèle WATEM (Water and Tillage Erosion Model). WATEM est un modèle spatialisé en deux dimensions qui permet de simuler l'érosion et les dépôts engendrés par le ruissellement de surface en prenant en compte l'occupation du sol et les structures linéaires[26]. Les transferts sont estimés à partir d'une version adaptée de l'équation RUSLE (Revised Universal Soil loss equation). WATEM permet entre autre de connaître en tout point de la zone étudiée les quantités de sédiments exportés. La figure 15 représente les résultats de la modélisation réalisée pour les années 1992 et 1998 sur le Bassin versant de Kvetonov (32 km²). La quantité de sédiment exportée à l'exutoire a été réduite par 2,5.

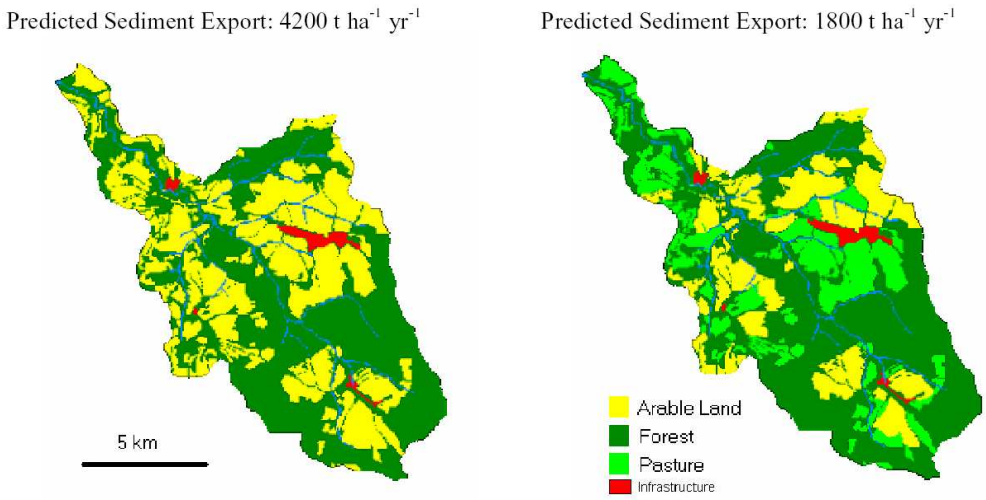


Figure 15. *Evolution de l'occupation du sol et des exports de sédiments sur le bassin versant de Kvetonov en Kamenice, République Tchèque.*
(Source : Van Rompaey et al., 2003)

Conclusion

Ces travaux mettent en évidence l'importance de la distribution spatiale des couverts végétaux qui conditionne l'apparition du ruissellement et le fonctionnement du bassin versant. Ils montrent la nécessité de prendre en compte l'emboîtement des échelles spatiale et temporelle pour appréhender le rôle des cultures sur le ruissellement de surface.

[26] Source : http://www.kuleuven.ac.be/facdep/geo/fgk/leg/pages/downloads/watem/introduction.htm, consulté en 2004.

2. Impacts des structures linéaires temporaires et pérennes

Les éléments linéaires influant sur la direction du ruissellement de surface peuvent être groupés en deux catégories :

- les éléments temporaires qui apparaissent ou disparaissent en fonction des pratiques agricoles : sens du travail du sol, fourrière, dérayure (Auzet, 1990 ; Souchère, 1995 ; Takken *et al.*, 1999a ; Takken *et al.*, 2001b ; Van Oost *et al.*, 2003).
- les éléments permanents ou pérennes tels que la voirie et ses éléments associés : fossés, buses, bac de rétention (Souchère *et al.*, 1998 ; Mérot *et al.*, 1999 ; Moussa *et al.*, 2002 ; Duke *et al.*, 2003).

Ces éléments modifient le gradient de pente imposé par la topographie du terrain et perturbent le parcours de l'eau de surface (Takken *et al.*, 1999a ; Mérot *et al.*, 1999).

2.1. Les motifs agraires

L'effet des motifs agraires sur les écoulements est complexe, en raison, d'une part de leur forte variabilité spatio-temporelle et d'autre part de l'échelle fine d'analyse qu'ils imposent (Monnier *et al.*, 1986 ; Ludwig *et al.*, 1995). Les motifs agraires se forment pendant les opérations culturales et induisent des modifications de l'état structural du sol plus ou moins localisées. Les principales opérations agissant sur le ruissellement sont effectuées après la dernière opération de travail du sol précédant l'implantation du couvert (semis, traitements phytosanitaires, fertilisation, chantiers de récoltes). Ces opérations imposent sur et entre les parcelles culturales une rugosité plus ou moins prononcée (dérayure, fourrière, sens de travail du sol). La rugosité à la surface du sol affecte le stockage de l'eau en créant des micro-dépressions qui peuvent réduire la vitesse des écoulements et modifie les conditions de circulation (Auzet, 1990 ; Govers *et al.*, 2000). Sur certaines parcelles cultivées, l'orientation du travail du sol peut ainsi se substituer à la topographie naturelle (figure 16).

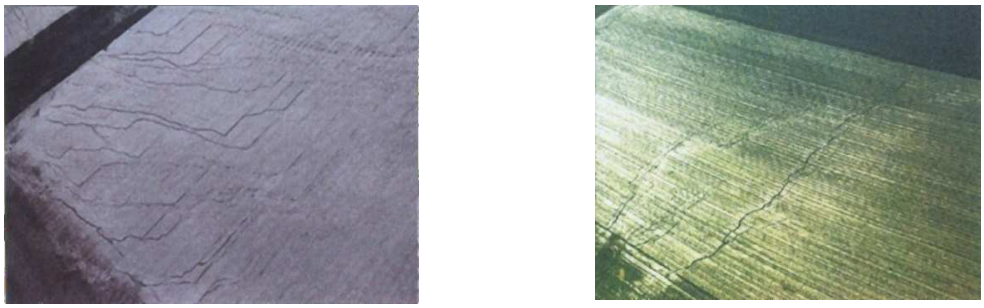


Figure 16. *A gauche réseau d'érosion influencé par le sens de travail du sol, à droite réseau d'érosion uniquement dirigé par la pente.*
(Source : Delahaye, 2002)

La trajectoire des écoulements peut être (figure 17) :

- dans le sens de la pente (1),
- en baïonnette par rapport à la pente (2),
- en baïonnette par rapport au sens du travail du sol (3),
- dans le sens du travail du sol (4).

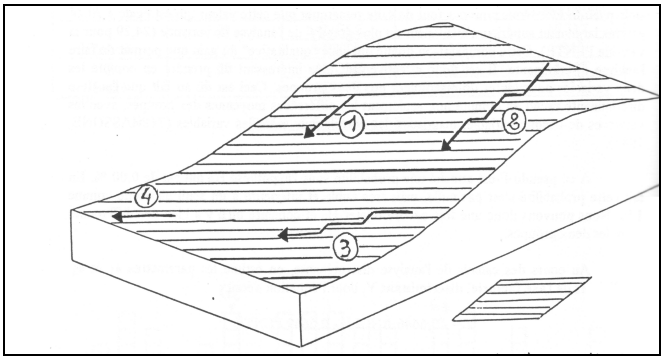


Figure 17. *Organisation des écoulements de surface sur une parcelle cultivée en fonction de la topographie et de la rugosité du sol*
(Source : Souchère, 1995)

Une proposition de classification de la rugosité à partir d'observations in situ a été réalisée par Boiffin *et al.* (1988). Elles ont été utilisées par Ludwig *et al.* (1995) pour estimer un gradient de rugosité de surface dans le sens de travail du sol (tableau 4).

Grading of soil surface roughness

Grade	Roughness index [a]	Typical agricultural situation
R0	0–1 cm	strongly crusted sown fields, harvested fields with intense compaction
R1	1–2 cm	sown fields with fine loosened or moderately crusted seedbeds
R2	2–5 cm	recently sown fields with a cloddy surface, crusted tilled fields without residues
R3	5–10 cm	stubble-ploughed fields recently sown fields with a very cloddy surface
R4	> 10 cm	ploughed fields

[a] Difference in the heights of the deepest part of the microdepressions and the lowest point of their divide.

Tableau 4. *Gradient de la rugosité de surface du sol*
(Source : Ludwig et al., 1995)

En le combinant avec deux autres paramètres, l'état du faciès et le pourcentage de la superficie des traces d'engins agricoles, Ludwig *et al.* (1995) ont évalué la capacité d'une

parcelle à produire un ruissellement. Ainsi une parcelle caractérisée par une rugosité R0, un faciès au stade F2 et/ou une superficie de tassage du sol de près de 50 % est très favorable au ruissellement. A l'échelle du bassin versant ces paramètres mettent en valeur les aires contributives au ruissellement.

Ces critères de rugosité définis par Boiffin *et al.* (1988) et Ludwig *et al.* (1995) sont exploités par Souchère *et al.* (1998) pour qualifier la rugosité parallèle et perpendiculaire par rapport au sens du travail du sol. Ils observent les chemins de ruissellement et mesurent les rugosités respectives sur un échantillon de 50 points localisés sur des versants limoneux du Pays de Caux pendant la période hivernale d'octobre à avril. L'analyse des données révèle que la direction prise par le ruissellement suit deux règles de décision (tableau 2-2):

- une première issue de la différence entre la valeur de la rugosité parallèle et la valeur de la rugosité perpendiculaire. Lorsque le résultat est supérieur à 2, le sens de travail du sol guide le ruissellement.
- une seconde fondée sur la différence entre les deux rugosités. Elle est formulée par une régression statistique entre deux variables : l'intensité de la pente (***Slope***) et l'angle (***Angle***) entre l'orientation du travail du sol et l'orientation de la topographie (direction de la pente descendante). Cette règle de décision est appliquée lorsque la différence entre les deux rugosités est inférieure ou égale à 2. La fonction s'exprime de la manière suivante :

$$D = -0{,}6646\ Angle - 0{,}6669\ Slope$$

Lorsque la valeur D est inférieure à 0,12 la direction du ruissellement est gouvernée par la topographie, autrement elle est imposée par le sens de travail du sol.

Types of objects		Runoff direction
Field crop (including headlands)	Difference between the two roughnesses > 2	Tillage direction
	Difference between the two roughnesses ≤ 2	Tillage or slope direction (decision as a function of statistical analysis)
Dead furrow		Furrow direction
Dirt tracks, roads		Direction of greatest slope

Tableau 2- 1*Direction du ruissellement en fonction du type d'objet*
(Source : Souchère *et al.*, 1998)

Ces deux règles de décision sont appliquées ensuite sur 23 bassins à l'aide du SIG ArcInfo pour modéliser spatialement l'organisation du ruissellement de surface. Trois jeux de données sont utilisés :

- un modèle numérique de terrain en format raster permettant de dériver les paramètres topographiques,

- une carte du parcellaire déterminant pour chaque parcelle l'orientation principale du travail du sol,
- des relevés de terrain définissant pour chaque parcelle les rugosités.

Les résultats de la modélisation montrent que pour 20 des 23 bassins versants, le parcours du ruissellement est imposé sur au moins 50 % de la surface totale du bassin versant par le sens de travail du sol. Pour 9 d'entres eux, c'est plus de 75 % de leur surface qui est influencée. L'étude plus approfondie d'un bassin versant met en évidence :

- une perturbation des conditions de circulation du réseau d'écoulement avec un déplacement des points de concentration des écoulements dans le talweg et l'existence d'apports supplémentaires.
- une modification de sa taille et de sa forme. La superficie du bassin topographique est de 45 ha tandis qu'avec la prise en compte des motifs agraires elle n'est plus que de 37 ha.

Ces observations sont confirmées sur les autres sites d'étude. Ainsi 16 bassins versants sont sujets à une variation de leur surface de l'ordre de 25 % et 9 de plus de 50 %.

Si pour Takken *et al.* (2001b) l'influence de la rugosité qu'il qualifie d'orientée constitue un facteur prégnant[27], en revanche, Takken *et al.* (2001b) considèrent que les paramètres retenus ne sont pas suffisants pour évaluer correctement son rôle dans la structuration du ruissellement. Son effet est aussi conditionné par la quantité d'eau qui arrive en amont. Selon les volumes d'eau des ruptures peuvent apparaître dans l'orientation imposée par le sens de travail du sol, formant des écoulements en baïonnette (cf. supra). Or ces volumes varient selon la position topographique. Dans le talweg, les concentrations sont très importantes, la rugosité pour être efficace doit être élevée. A l'inverse, les hauts de pentes constituent des zones de départ et une rugosité même faible influe sur le gradient topographique local. La figure 18 schématise cette relation entre la position topographique, l'orientation de la pente et le sens de travail du sol pour une parcelle cultivée.

De plus, Takken *et al.* (2001b) soulignent que les observations de Souchère *et al.* (1998) et le modèle ont été validés essentiellement pour des cultures d'hiver. Appliquée aux cultures de printemps telles que la betterave à sucre, la chicorée, le maïs et les pommes de terre, la méthode « Souchère » conduit à une sous-évaluation de l'influence du sens de travail du sol sur la direction du ruissellement. Pour ces quatre cultures, les simulations donnent des résultats

[27] Un suivi GPS des chemins d'écoulements sur le Bassin versant de Kinderveld en Belgique (250 ha) révèle que 70 % des directions d'écoulements sont imposées par le travail du sol (Takken et al., 2001b).

identiques. En conséquence, les auteurs proposent d'intégrer le paramètre rugosité orientée dans l'équation permettant de choisir la direction du ruissellement.

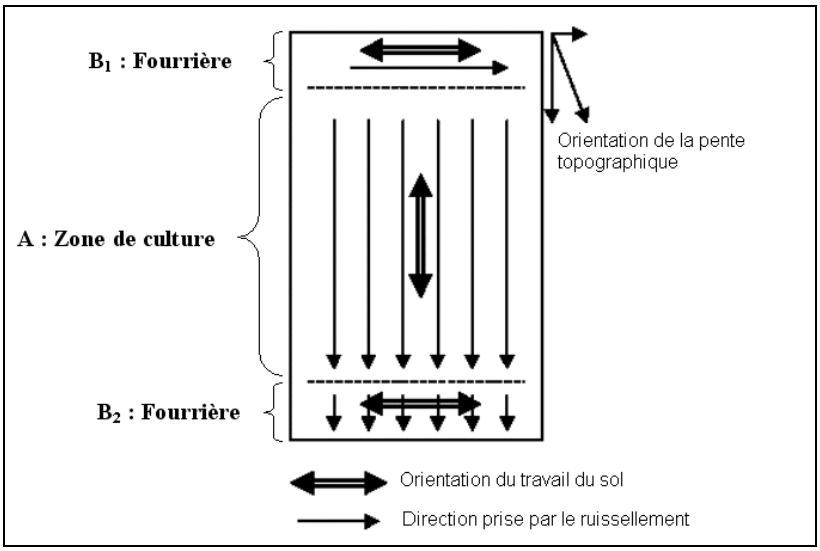


Figure 18. *Représentation schématique des directions d'écoulements observées dans une parcelle cultivée*
(Source : Takken *et al.*, 2001b)

2.2. Les dispositifs pérennes introduits par l'homme

Nous distinguons parmi les dispositifs pérennes introduits par l'homme la voirie et ses éléments connexes, des constructions paysagères talus et haie à plat.

2.2.1. Voirie et éléments connexes

2.2.1.1. L'effet de la voirie

L'effet de la voirie sur l'organisation des écoulements de surface en milieu rural a été particulièrement étudié en Amérique du Nord : aux Etats-Unis avec le Service des Forêts du Département de l'Agriculture (l'USDA United States Departement of Agriculture) et au Canada avec le Canadian Water Network. Ainsi, en 2003, les connaissances acquises depuis plus de 30 ans ont conduit à la réalisation en collaboration avec l'USAID (U.S. Agency for International Development), d'un guide sur les bonnes pratiques d'aménagement : *Best Management Practices* (Keller et Sherar, 2003). Le principal objectif de cet ouvrage est de proposer des techniques générales d'ingénierie afin de prévenir les impacts environnementaux des routes.

La route affecte significativement les processus hydrologiques et géomorphologiques. Elle est souvent identifiée comme la cause de l'accélération des transferts de surface et de l'augmentation des transports de sédiments vers le cours d'eau (Montgomery, 1994 ; Sun et McNulty, 1998 ; Sebbab, 2000 ; Wemple *et al.*, 2001 ; Moussa *et al.*, 2002). Dans un bassin versant, les routes sont structurées selon un ensemble de tronçons interconnectés ou non qui dessine un ou plusieurs réseaux de voirie. Pour le géomorphologue et l'hydrologue le tronçon de route s'appréhende à partir de caractéristiques géométriques, structurales et topographiques qui vont conditionner sa réponse vis-à-vis des processus physiques (Wemple *et al.*, 2001 ; Keller et Sherar, 2003). Trois paramètres sont utilisés : la nature du tablier, le profil du tablier et la topographique de la route.

a. La nature du tablier

La nature du tablier correspond au type de revêtement qui compose la route. Selon la nature de celui-ci les manifestations du ruissellement sont différentes. Une route goudronnée constitue un collecteur privilégié. La surface imperméable accroît la surface de ruissellement. Les routes goudronnées caractérisent le réseau national, départemental et vicinal. La structure du tablier est très stable et, en dehors d'évènements pluvieux intenses, l'écoulement de surface s'organise en nappe et/ou en filet généralement le long des bords de route. L'érosion se manifeste par la formation de ravines latérales et les accumulations de sédiments se produisent sur ces routes aux débouchés des parcelles agricoles (Sebbab, 2000 ; Bocher, 2003). Cependant, à l'inverse, une route sans revêtement ne signifie pas nécessairement une moindre capacité à engendrer un écoulement de surface dans la mesure où les sols sont compactés et leur capacité d'infiltration réduite (Cosandey et Robinson, 2000). De plus, l'absence de revêtement la rend plus sensible aux attaques du ruissellement et par conséquent au ravinement.

b. Le profil du tablier

Le profil du tablier se mesure dans sa largeur (profil transversal) et dans sa longueur (profil longitudinal). Théoriquement, le profil transversal permet de contrôler la répartition de l'écoulement sur le tronçon routier et de limiter l'impact des apports provenant du versant amont (concentration). La figure 19 représente trois types de profils transversaux :

- un profil divergent (A) où l'écoulement se repartit de chaque coté de la route,
- un profil rectiligne dans le sens de la pente du versant (B),
- un profil rectiligne opposé à la pente du versant (C).

Le profil longitudinal intervient dans la mise en mouvement de l'écoulement selon une direction linéaire imposée par le gradient topographique de la route (figure 20). La dynamique de l'écoulement est rythmée par l'alternance des valeurs de pente des tronçons routiers. Le chaînage des pentes détermine la vitesse de circulation de l'eau et par conséquent les temps de réponse à l'échelle du bassin versant (Wemple *et al.*, 1996).

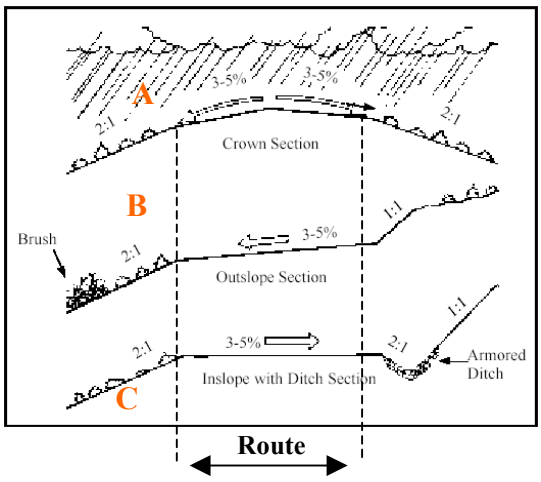


Figure 19. *Exemples de profils transversaux*
(Source : Keller et Sherar , 2003, adapté).

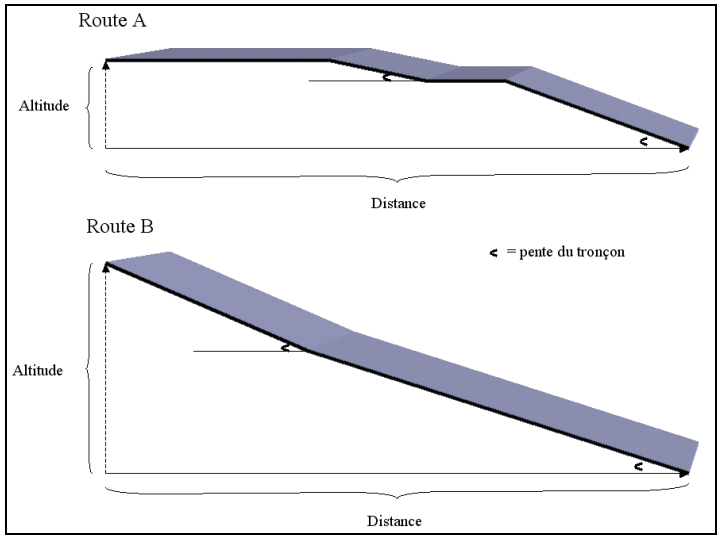


Figure 20. *Exemples profils longitudinaux*
(Bocher, 2004)

En dehors de la nature et du profil de la voirie qui définissent les conditions de circulation de l'eau sur celle-ci, l'impact d'une route sur les écoulements à l'échelle du versant et du bassin versant est aussi conditionné par son inscription topographique. On distingue l'effet du profil transversal de la position topographique par rapport au versant.

Le profil transversal est désigné par le terme de terrassement. La route lors de sa construction modifie la topographie naturelle soit par un décaissement, soit par un rehaussement de sa surface (figure 21).

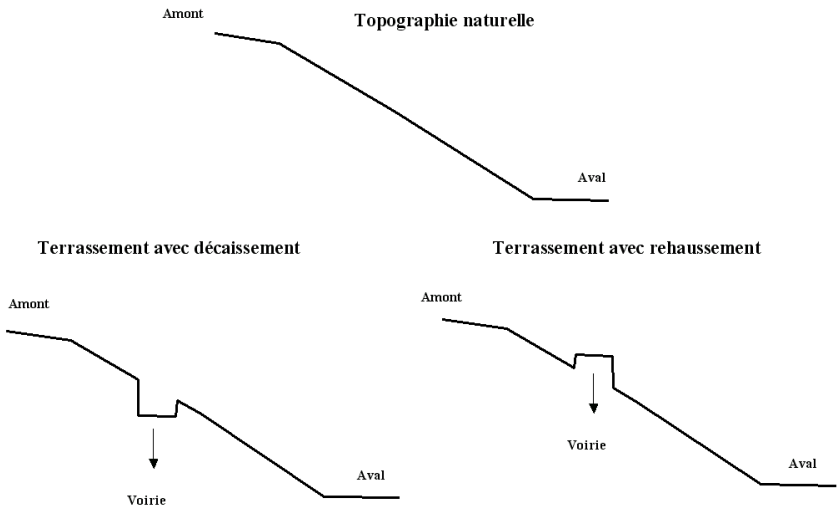


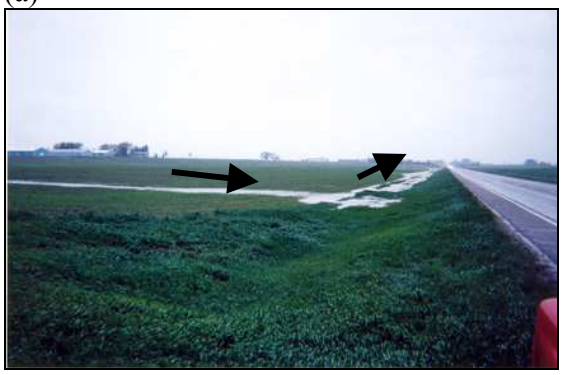
Figure 21. *Déformation du profil topographique du versant induite par le terrassement de la voirie (Bocher, 2004)*

c. <u>La position topographique de la route par rapport au versant</u>

La route peut être oblique ou perpendiculaire au sens de la pente générale, ou encore localisée en fond de vallée.

Pour résumer, si la voirie est dans l'axe de l'écoulement naturel, c'est-à-dire dans le sens de la pente, elle est conductrice et dans ce cas accélère ou dirige l'écoulement. Si elle est perpendiculaire à l'axe d'écoulement, elle pourra agir comme un obstacle en créant un cuvette artificielle sur l'un de ses bords (Robriguez, 1999 ; Sebbab, 2000 ; Keller et Sherar, 2003). La route, lorsqu'elle est décaissée, mobilise le ruissellement provenant des parcelles culturales et constitue un relais au réseau hydrographique naturel. A l'inverse, Duke *et al.* (2003) soulignent que lorsque sa surface est rehaussée, les écoulements qui s'y accumulent peuvent être réorientés le long de celle-ci en fonction de la pente (figure 22 a et b). Les écoulements sont cantonnés dans les parcelles et suivent l'obstacle linéaire jusqu'à ce qu'ils trouvent un exutoire (figure 22 b). Ces exutoires peuvent se situer en amont d'un aménagement (buse, fossé) qui force le passage de l'eau ou résulter d'un débordement (figure 22 b).

(a)



L'eau de surface s'est accumulée au pied de la route, puis au fil des volumes arrivés les écoulements se sont redirigés le long de la route rehaussée.

(b)

Les écoulements de surface provenant des parcelles en amont se sont concentrés dans un fossé bordant la route. Ils sont dirigés vers un point bas où une buse assure la connexion avec le versant aval (flèche noire).

Figure 22. *Impact des routes sur les écoulements de surface*
(Source : Duke *et al.*, 2003)

Pour Sun et McNulty (1998), la localisation spatiale des routes est un facteur majeur qui affecte la contribution sédimentaire des cours d'eau. Les auteurs montrent en utilisant l'équation universelle USLE (Universal Soil Loss Equation) qu'un mauvais aménagement des routes peut augmenter de façon très importante les transports de sédiments dans un bassin versant même forestier. Sur un bassin versant forestier de 1 140 ha au nord-ouest de la Caroline, ils testent l'impact de deux scenarii d'aménagement. L'un qu'ils considèrent comme favorable et l'autre comme défavorable. La qualification de l'aménagement est réalisée en ajustant les coefficients C et P de l'équation USLE. C représente le coefficient d'aménagement de la forêt et P le coefficient les pratiques de lutte contre l'érosion. Pour le premier scénario, les estimations des pertes de terre sont estimées à 727 t/an tandis que pour le second elles atteignent 3 452 t/an.

Pour Wemple *et al.* (1996), les routes modifient la densité de drainage en augmentant la longueur totale des chemins d'écoulements de l'eau de surface. En mobilisant ou en stockant les eaux de surface, elles changent la taille et la forme du bassin versant modifiant les temps de réponse. Jones et Grant (1996) remarquent ainsi que les variations brutales de débits, notamment lors d'orages dans les bassins versants de l'ouest de l'Oregon sont liées à la construction de nouvelles routes. L'impact des routes sur la modification du réseau de drainage naturel et la concentration du ruissellement est confirmé par les travaux de Sebbab (2000) sur la Champagne viticole. Ce dernier en calculant un arbre de drainage à partir d'un MNT modifié par l'introduction de la voirie montre que la voirie provoque une modification des trajectoires naturelles du ruissellement. Les lignes d'écoulement sont interrompues par les chemins transversaux qui les empêchent de progresser vers le bas du versant. La voirie concentre le ruissellement provenant des parcelles agricoles et connecte des parcelles éloignées au cours

d'eau. L'ordination de l'arbre de drainage à partir de la méthode Strahler montre que les chenaux d'ordre 1 et 2 se situent exclusivement sur les parcelles tandis que les chenaux d'ordre 5 et 6 sont principalement dans les chemins et dans les talwegs.

2.2.1.2. L'effet des fossés

En association avec le réseau de voirie ou bien intégrés au système agraire, les fossés interviennent eux aussi dans la structuration de l'écoulement de surface. Cependant si à l'échelle d'une parcelle, leur impact dans l'interception des écoulements de surface ne fait aucun doute, en revanche leur rôle et fonctionnement à l'échelle du bassin restent mal compris (Carluer, 1998 ; Adamiade, 2004). Ce constat s'explique pour deux raisons.

- la circulation de l'eau dans un fossé et sa capacité à intercepter les écoulements sont fortement liées à son état (présence ou non de végétation). Or l'état d'un fossé est une donnée très changeante.
- l'essentiel des exercices de modélisation qui ont été effectués concernent le régime permanent et n'ont, le plus souvent, été validés que sur des maquettes de laboratoire.

Globalement le rôle du fossé est dépendant de son orientation par rapport à la plus grande pente du terrain (Carluer, 1998 ; Adamiade, 2004 ; figure 23).

- pour un fossé en travers de la pente, la collecte du ruissellement et des écoulements subsurfaciques prédomine,
- pour un fossé parallèle à la ligne de plus grande pente, c'est le rabattement latéral de la nappe et le transfert vers l'aval qui l'emportent.

L'écoulement dans le fossé est ensuite mis en mouvement en fonction de la pente du tronçon.

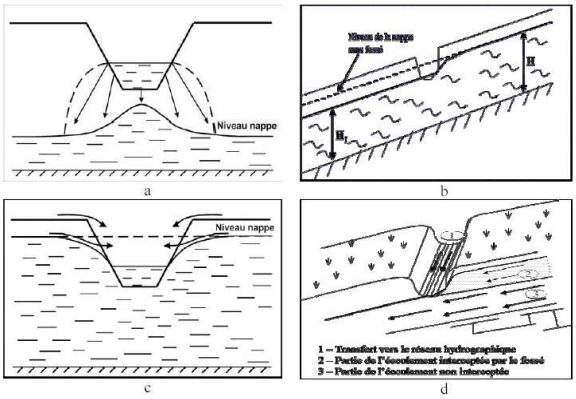


Figure 23. *Fonctionnement hydrologique d'un fossé*
a : fossé qui infiltre, b : fossé qui intercepte, c : fossé qui draine et d : fossé qui transfère
(Source : Adamiade, 2004)

Moussa *et al.* (2002) ont modélisé l'influence des fossés sur la circulation du ruissellement de surface dans un bassin versant agricole du sud de la France. L'outil utilisé est le modèle distribué MHYDAS (Modèle Hydrologique distribué pour les AgroSystèmes). Les résultats montrent que les fossés accélèrent le ruissellement en concentrant les écoulements. Ils facilitent les connexions entre les différentes unités hydrologiques du bassin versant.

2.2.2. Talus et haie

Le terme de haie est couramment utilisé au sens large pour caractériser aussi bien un alignement d'arbres et d'arbustes qu'un talus. Or vis-à-vis du ruissellement de surface, ces deux constructions paysagères n'ont pas le même comportement, notamment parce que la nature de l'obstacle diffère.

2.2.2.1. Les talus

Dans certaines sociétés agraires, les talus qualifient une levée de terre construite par l'homme entourant les parcelles (Bazin *et al.*, 1995). Organisés en réseaux linéaires ces talus forment un paysage typique de bocage comme celui présent encore en Bretagne (figure 24).

Figure 24. *A gauche un talus-nu à droite un réseau de talus-nus*
(Source : Gestin, 2004, Pays du Trégor (22))

Le talus lorsqu'il est situé en travers de la pente se comporte comme un écran vis-à-vis des écoulements de surface. Sur les parcelles sensibles au ruissellement, son rôle est immédiatement perceptible : accumulation d'eau et de sédiments (figure 25).

Figure 25. *Accumulation d'eau et de sédiments dans une parcelle d'artichauts en amont d'un talus*
(Source : Gestin, 2004, Pays du Trégor (22))

Dans les années 1970, le rôle du talus sur les transferts de surface a été particulièrement étudié, notamment en Bretagne. Les travaux de Pihan (1976) et Carnet (1978) ont montré qu'il existe une forte hétérogénéité spatiale des horizons de sols aux abords des talus. Pihan (1976) note d'après un suivi des particules d'argiles sur une parcelle agricole que ces dernières s'accumulent en bas de pente en amont du talus. Les mesures des taux d'argile sur la parcelle traduisent une répartition décroissante de l'amont vers l'aval. Sur les sommets, les taux sont entre 10 et 23 % tandis qu'en bas de versant, ils atteignent 14 à 30 %. Cependant, l'impact du talus sur les écoulements et l'érosion des sols diffère selon sa place par rapport à la topographie (Carnet, 1978 ; Mérot *et al.*, 1999). Il est admis que les talus parallèles aux courbes de niveaux jouent un effet de barrage tandis que les talus perpendiculaires favorisent la circulation des écoulements en les canalisant (Pihan, 1976). Ces deux variables sont intéressantes pour apprécier localement le rôle du talus, néanmoins à l'échelle des structures paysagères elles apparaissent insuffisantes (Carluer, 1998 ; Merot *et al.*, 1999) :

- les talus ne sont pas toujours continus. Leur distribution spatiale et leur organisation sont très variables. Le bocage est l'association d'une multitude de réseau de talus qui évoluent rapidement sous les pressions anthropiques.
- les talus ne sont pas toujours perpendiculaires ou parallèles aux courbes de niveau.

Zhang (1995) et Mérot *et al.* (1999) analysent la modification des cheminements de l'eau de surface induite par les réseaux bocagers. L'approche repose sur une modélisation spatiale des interactions entre la topographie naturelle, la position et l'articulation des réseaux de haie à l'échelle d'un bassin versant[28]. Les auteurs dérivent à partir d'un MNT matriciel et d'une carte des réseaux de haies quatre types de données : un arbre de drainage (ensemble des lignes d'écoulements sur le bassin versant), la densité de mailles puits (pixel où se concentrent les écoulements le long du bocage), la surface de bassin déconnectée de la rivière et la longueur de versant. Quatre bassins versants sont étudiés. Leurs caractéristiques sont rappelées dans le tableau 5.

Bassin versant	Superficie (km²)	Densité de bocage (m/ha)		
		En 1948	En 1992	En 1994
Coët-Dan	12	86	39	-
Pleine-Fougères A	2,2	-	-	196
Pleine-Fougères B	3,7	-	-	160
Pleine-Fougères C	3,8	-	-	69

Tableau 5. *Caractéristiques des bassins versants*
(Source : Mérot et al., 1999)

[28] Comme postulat de départ, les auteurs considèrent que les talus redirigent les écoulements.

L'arbre de drainage calculé uniquement à partir de la topographie est utilisé comme référent pour étudier l'effet de l'introduction des linéaires de talus sur le parcours de l'eau.

Pour l'ensemble des sites, les talus entraînent une modification (parfois profonde) de l'arbre de drainage. Sur le bassin versant Pleine-Fougères B 90 % des pixels voient leur place changer dans le réseau de drainage, drainant plus ou moins de pixels amont. Sur le bassin versant du Coët-Dan en 1992 où la densité de talus est la plus faible, près de 27 % des pixels sont concernés par un changement. Les talus en place ont donc encore une efficacité. Mais l'un des points majeurs de ces résultats est la mise en évidence de l'effet de structure du réseau bocager sur l'organisation du parcours des écoulements dans le bassin versant. Les connexions entre les talus induisent la formation de puits qui déconnectent certaines branches de l'arbre de drainage auparavant continues jusqu'au cours d'eau. Les proportions de pixels déconnectés du cours d'eau varient entre 14 et 40 % (tableau 6). Les talus puits fragmentent la dynamique de ruissellement sur le versant et contribuent à allonger les temps de transfert vers l'exutoire en retenant l'eau de surface. La relation entre l'articulation du réseau de haies et la topographie du bassin versant est aussi confortée par la faible proportion de surface déconnectée sur les bassins versants de Pleine-Fougères A et B qui pourtant connaissent les plus fortes densités bocagères (tableau 5).

Bassin versant	**Proportion de pixels déconnectés du cours d'eau sur l'ensemble des pixels du bassin versant topographique (%)**		
	En 1948	En 1992	En 1994
Coët-Dan	32,1	14,2	
Pleine-Fougères A	-	-	29,9
Pleine-Fougères B	-	-	15,5
Pleine-Fougères C	-	-	40,1

Tableau 6. *Pourcentage de surface déconnectée par bassin versant (Source : Mérot et al., 1999)*

2.2.2.2. Les haies

La haie est un alignement de végétaux au sol qui peut être composé d'arbres, d'arbustes et de plantes herbacées. Contrairement au talus où la levée de terre se comporte immédiatement comme un obstacle, l'impact de la haie sur le ruissellement et l'érosion hydrique est déterminé par sa densité et son emprise au sol (largeur). Pour schématiser, plus une haie est dense et large et plus sa capacité à résister aux attaques des processus de surface est accrue. Les haies, notamment les haies herbacées sont utilisées comme barrière végétale anti-érosive dans de nombreux programmes de conservation des sols, par exemples aux Philippines ou dans le *Middle West* américain avec le « *Conservation Reserve Program* » (Keller et Sherar, 2003 ; Dautrebande, 2003). Les barrières végétales anti-érosives (figure 26) sont des bandes étroites de

végétation dense installées selon les courbes de niveau ou en travers d'axes de concentration des eaux (*contour hedging*).

Figure 26. *Barrière végétale aux USA*
(Source : Dautrebande, 2003)

Elles sont composées généralement de graminées vivaces telle que le panic érigé (switchgrass) pour les climats aux hivers vigoureux ou le vétivier pour les climats chauds. De nombreux travaux ont été réalisés pour mesurer leur impact sur le ruissellement et l'érosion des sols. Ils ont conduit à définir les conditions de leur efficacité (Dautrebande, 2003). Il a été montré que pour un bon fonctionnement des barrières végétales outre la nécessité de les positionner perpendiculairement à la pente du terrain et de travailler le sol perpendiculairement aux courbes de niveau, l'emplacement doit être adapté à la pente du terrain et aux secteurs de concentration du ruissellement. Plus la pente du terrain est forte et plus l'espacement entre les haies devra être réduit (tableau 7).

Pentes en %	Distances en mètres
5-10	20
10-15	15
15-25	10
25-35	7
35-50	5
50-60	3

Tableau 7. *Distances minimales entre les rangées de haies placées selon les courbes de niveau*
(Source : Dautrebande, 2003)

Or, dans les systèmes de grandes cultures, ce type d'aménagement est une contrainte pour la mécanisation. De plus, l'utilisation de ces bandes végétales pose le problème de leur permanence dans le paysage. Le maintien du bon état de la végétation ainsi qu'une protection contre les dégradations (machines agricoles, piétinement animal,…) est essentielle pour garantir leur efficacité (Dautrebande, 2003).

Alberts *et al.* (2003) ont étudié les modifications entraînées par l'introduction de haies de panic érigé sur les transferts de sédiment dans un petit bassin versant de l'ouest de Iowa. Deux périodes servent de comparaison : 1975-1991 période sans haies et 1992-2002 période

avec haies. Le site s'étend sur un territoire de 6 ha caractérisé par un manteau loestique. Les haies suivent les courbes de niveau et sont espacées de 15,5 m (figure 27).

Figure 27. *Topographie du versant de l'Iowa et répartition des haies de panic érigé (source : Alberts et al., 2003)*

Les résultats montrent qu'en moyenne sur la période de mars à septembre (période de ruissellement) la réduction du transport de sédiment à l'exutoire est de l'ordre de 56 % après l'implantation des haies. Cette réduction peut atteindre plus de 80 % pour certains mois. Cependant, l'étude montre aussi que l'efficacité de ce dispositif est conditionnée par la position topographique de la haie et la durée des précipitations. Lorsque les volumes de ruissellement de surface sont trop importants, les haies ne parviennent pas à bloquer les flux et des brèches apparaissent. Ces brèches constituent ensuite des points de passages privilégiés pour les écoulements qui sont réorientés par le linéaire de haie.

Conclusion du chapitre 2

Ce chapitre nous a permis de dresser un tableau des principaux facteurs qui contrôlent le parcours des écoulements de surface. Les travaux montrent que les éléments linéaires pérennes ou temporaires influent sur l'organisation du cheminement de l'eau de surface à l'échelle de la parcelle, du versant et du bassin versant. Le parcours de l'eau est dépendant des rugosités induites par l'organisation spatiale des cultures (Papy et Boiffin, 1988 ; Takken *et al.*, 1999a), des pratiques culturales (Souchère *et al.*, 1998 ; Takken *et al.*, 2001b), des éléments du paysage (Pihan, 1976 ; Mérot *et al.*, 1999) et des aménagements hydrauliques ou viaires (Sun et McNulty, 1998 ; Sebbab, 2000 ; Moussa *et al*., 2002). Il s'en suit inévitablement à l'échelle du bassin versant une multitude de combinaisons possibles. Le linéaire :

- peut perturber la topographie naturelle,
- peut contenir ou dérouter le ruissellement de surface.

Ces travaux montrent que la réponse du linéaire au ruissellement est liée à sa position topographique et à son agencement géométrique (Keller et Sherar, 2003 ; Robriguez, 1999 ; Sebbab, 2000). Ainsi, comme le rapportent Le Bissonnais *et al.* (2002), l'influence par exemple d'un talus sur l'érosion hydrique est fortement liée à sa structuration dans le réseau global (connexion avec les autres talus). Au lieu de limiter le ruissellement, un élément isolé peut au contraire le favoriser en créant des ravines à ses extrémités. De plus, le temps apparaît comme une donnée non négligeable pour définir localement les conditions d'efficacité d'un linéaire (Takken *et al.*, 2001 b ; Alberts *et al.,* 2003) et à l'échelle du bassin versant la réponse du milieu (Papy et Douyer, 1991 ; Martin, 1996 ; Van Rompaey *et al.*, 2003).

Cependant, il faut noter qu'aucun de ces travaux n'apporte une vision globale de l'impact des activités humaines sur le cheminement des écoulements de surface. Les recherches se sont attachées à étudier certains compartiments respectifs (la voirie, les motifs agraires, les talus, l'occupation du sol) et ce pour des échelles d'analyse très différentes : parcelle, groupe de parcelles, versant, bassin versant. Or comme le souligne Neboit (1983), Ambroise (1999) et Cosandey et Robinson (2000) l'organisation des écoulements dans le bassin versant est la résultante d'une combinaison complexe d'interactions spatiales entre les caractéristiques physiques, les agents météoriques et les activités humaines. Il s'agit d'un tout, d'un système.

Cet état des connaissances permet donc de situer l'enjeu de notre recherche qui vise à apporter des éléments supplémentaires quant à l'incidence des activités humaines sur le cheminement des écoulements de surface sur la base d'un système plus général, capable d'intégrer et de traduire les relations entre plusieurs compartiments du bassin versant et ce à différentes échelles spatiales (parcelle, versant, bassin versant).

Chapitre 3. Méthodes et outils pour la spatialisation du cheminement des écoulements de surface

Depuis une quinzaine d'années de nombreux efforts ont été réalisés par la communauté scientifique pour le développement de modèles spatialisés en hydrologie (Puech, 1995, Clark, 1998). Ces modèles dits " distribués " ont permis d'approcher les processus selon leur localisation et leur agencement dans l'espace (Sebbab, 2000) et cela à divers niveaux d'agrégation (Puech, 1995, Delahaye 2002). Fondés sur l'utilisation de Modèles Numériques de Terrain (MNT), ils ont été particulièrement exploités pour modéliser les processus d'érosion et de transport de particules à l'échelle des bassins versants. Les plans dérivés (pente, direction, orientation…) obtenus à partir des MNT sont habituellement croisés avec des données thématiques telles que l'occupation du sol, les unités de sol ou des indicateurs de sensibilités pour produire des cartes de risque. Cependant, ce n'est que récemment que les dispositifs linéaires ont été pris en compte dans les schémas de modélisation du ruissellement à l'échelle des versants et des bassins versants.

Dans ce chapitre, après avoir replacé de façon générale et succincte l'objet de la modélisation spatiale en hydrologie, nous aborderons l'étude des méthodes et modèles de calcul de l'arbre de drainage topographique, pièce maîtresse pour la simulation du routage de l'eau. Cette étape nous permettra d'acquérir les bases nécessaires pour la compréhension des modèles permettant la spatialisation des écoulements sous l'effet des contraintes linéaires (talus, sens du travail du sol, route). A travers une sélection de modèles jugés représentatifs, nous tenterons de circonscrire les avantages et les inconvénients des méthodes actuelles de calcul d'un arbre de drainage modifié que nous avons qualifié ici d'arbre de drainage contraint.

1. La modélisation spatiale en hydrologie

La modélisation hydrologique a débuté dans les années 1960 avec l'utilisation des premiers ordinateurs. Les objectifs étaient alors de prédire les débits à l'exutoire de bassin versant en utilisant des données de précipitations (Storck *et al.*, 1998). Réalisée à différentes échelles spatio-temporelles, la modélisation numérique offrait la possibilité de simuler la réponse hydrologique du bassin versant et de la comparer à des évènements pluvieux observés (Storck *et al.*, 1998, Merrit *et al.*, 2003). Les capacités de la modélisation hydrologique numérique ont très tôt été mises à contribution pour le développement d'outils de surveillance du territoire et d'aide à la décision (« *making decision* [29]»). Elle a connu de nombreuses applications notamment la gestion des risques (par exemple les inondations). La modélisation

[29] Le concept de « making decision » a été appliqué dès les années 1970 par l'USDA dans le cadre des BMP's (Best Management Practices), opt-cit Keller et Sherar , 2003.

repose alors sur une interprétation globale du fonctionnement du bassin versant (système de casier). Dans un cas, les processus hydrologiques sont caractérisés par le traitement de séries chronologiques, c'est le cas pour les relations pluies-debits, dans l'autre le bassin versant est considéré comme un assemblage de réservoirs interconnectés qui représentent les différents niveaux de stockage de l'eau suivant une dimension verticale (végétation, surface, sol, nappe). « *Cette ébauche de spatialisation permet en principe de simuler les flux d'échange entre les réservoirs et non plus les seuls débits* » (Gineste, 1997). Qualifiées respectivement d'empirique et de conceptuelle, ces approches se sont heurtées à la difficulté de représenter et de prendre en compte la diversité du milieu (Gineste, 1997).

A partir des années 1970 de nouveaux espoirs sont mis dans le développement de modèles utilisant les équations fondamentales de la physique des écoulements pour modéliser les échanges dans le milieu. A partir de paramètres mesurés, elles servent à évaluer entre autres les volumes de ruissellement et les masses de sédiments transportés à l'exutoire d'un bassin versant (Merrit *et al.,* 2003). Cependant, à l'inverse des modèles globaux qui adoptent une approche simplifiée et élémentaire, ces modèles à bases physiques souffrent de l'inflation du nombre de données nécessaires pour leur fonctionnement. Beven (1989) relate ainsi que 40 paramètres sont utilisés pour appliquer le modèle SHE (Système Hydrologique Européen) sur le petit bassin du Wye (Beven, 1989). De plus, selon Beven (1996), la modélisation physique du bassin versant dans son acception la plus stricte est vouée quoi qu'il en soit à l'échec et ce pour plusieurs raisons :

- le système hydrologique réel est fortement hétérogène. Les connaissances des paramètres physiques du système sont parcellaires. Or ces informations doivent être étendues à la totalité des sous-ensembles du système, choisies de façon suffisamment vaste pour intégrer l'hétérogénéité du milieu.
- la géométrie du système est trop complexe pour être représentée dans sa totalité.
- les conditions initiales de tels systèmes sont en général méconnues ou partiellement identifiées ce qui rend délicat le calibrage des modèles et la validation des résultats.

Par conséquent, l'utilisation de modèles à bases physiques devient très vite limitée dans le cadre de recherches disposant de peu de données expérimentales ou bien encore dans une optique de démarche opérationnelle (Delahaye, 2002). Toutefois, depuis les quinze dernières années, la diversification des sources de données numériques (image à haute résolution), l'augmentation des capacités de traitement informatique et l'évolution des logiciels SIG ont repoussé ces limites. Il est possible aujourd'hui d'obtenir aisément, grâce à la télédétection, des données géographiques numériques tels qu'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) ou une image satellitaire qui permettent de dériver des paramètres fondamentaux pour la modélisation

(pente, type d'occupation du sol). Cette évolution a permis le développement d'une nouvelle génération de modèles, appelés modèles distribués ou encore spatialisés (Storck *et al.*, 1998). Ces modèles s'appuient sur une discrétisation plus ou moins fine de l'espace en unités élémentaires, pixel ou cellule. Le MNT constitue la pièce maîtresse pour faire fonctionner ces modèles. La distribution spatiale des altitudes y est représentée soit par une grille régulière (raster ou grille matricielle), soit par un ensemble de cellules irrégulières (réseau de triangles irréguliers, hexagones), soit par des courbes de niveau (MNT filaire) (Weibel et Heller, 1991).

Le MNT présente de nombreux intérêts dans le cadre de la modélisation hydrologique distribuée car il permet de calculer aisément les caractéristiques géométriques et morphomètriques d'un bassin versant (Bruneau, 1992). Quatre types d'information sont dérivés à partir d'un MNT (Depraeter et Moniod, 1991).

- l'information géomorphomètrique : c'est une mesure des formes du terrain (pente ou courbure par exemple). Elle caractérise la géométrie de la topographie – altitude, pente, convexité horizontale, convexité verticale, exposition, encaissement.
- l'information géomorphologique : Elle correspond à une classification des formes du terrain (sommet, col, pic, crête, dépression…). La qualification est en générale locale.
- l'information hydromètrique : elle qualifie une propriété de drainage (zone de concentration, direction des écoulements). Elle caractérise la géométrie du bassin hydrologique – longueur de drainage, distance à l'exutoire.
- l'information hydrologique : elle correspond à une classification en fonction d'un critère de drainage (bassin versant, arbre de drainage).

Ces informations sont traduites sous la forme de variables spatialisées ou statistiques.

- Les premiers correspondent à une cartographie des propriétés des cellules du MNT. Ces cartes peuvent ensuite être exploitées pour produire une nouvelle information géographique.
- Les seconds sont le résultat de l'agrégation des informations disponibles dans les cartes dérivées. Il s'agit par exemple de la superficie d'un bassin versant topographique. L'intérêt de ces indicateurs est de pouvoir appréhender globalement les spécificités du territoire étudié.

Les possibilités offertes par les données altimétriques numériques ont conduit à généraliser leur utilisation pour la modélisation des processus de surface. De nombreux modèles hydrologiques ont été adaptés pour intégrer cette nouvelle source d'information. Pour les modèles physiques, l'exploitation du MNT et des méthodes de production de l'information

géographique numérique ont été l'occasion d'une part de faciliter l'acquisition des données élémentaires pour faire fonctionner ces modèles et d'autre part de disposer de supports de représentation. Les cartes produites permettent de tenir compte des différences internes du territoire étudié et d'identifier spatialement la réponse du milieu au processus simulé. Parmi ces modèles citons l'adaptation du modèle Answers (Areal Non-point Source Watershed Environnement Response Simulation) ou le développement de Lisem (LImburg Soil Erosion Model) (De Roo *et al.*, 1998). En quinze ans, une multitude de modèles spatialisés a vu le jour. Ambroise (1999) souligne ainsi avec humour qu'il existe autant de modèles que d'hydrologues.

La plupart des modèles concernant les phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols ont en commun l'exploitation d'un arbre de drainage pour simuler les échanges hydriques à la surface du sol. L'arbre de drainage représente l'ensemble des chemins de l'eau de surface dans un bassin versant. Traduit sous la forme d'une ou plusieurs valeurs de direction pour chaque cellule du MNT, il constitue le point de départ de la modélisation hydrologique distribuée. L'arbre de drainage définit les conditions du routage de l'eau dans le bassin versant et sert de support pour dériver des variables secondaires telles que la distance au cours d'eau, les surfaces drainées, le bassin d'alimentation.

Partant du principe que la direction de l'eau est gouvernée par le gradient topographique de la surface du sol, l'arbre de drainage est produit à partir des données topographiques (Beaujouan *et al.*, 2000). Ainsi, en tout point de la surface, il est possible à partir de la comparaison des valeurs d'altitude voisines de déterminer la ou les zones réceptrices. Cependant, l'extrême hétérogénéité du bassin versant et notamment les objets de surface perturbent le drainage naturel. Pour prendre en compte ces perturbations, améliorer le calcul et par conséquent les simulations des chemins d'écoulements, certains auteurs ont procédé à des adaptations des méthodes de calcul du drainage topographique. Pour distinguer les deux approches nous utiliserons le terme de drainage topographique pour la première situation et de drainage contraint pour la seconde.

2. L'arbre de drainage

Il existe une grande variété de méthodes pour simuler le cheminement de l'eau à partir de données géographiques numériques. Certains auteurs prônent l'utilisation des MNT matriciels (Moore *et al.*, 1991 ; Souchère, 1995 ; Tarboton, 1997 ; Beaujouan *et al.*, 2000), d'autres les MNT à mailles irrégulières ou éléments finis (Agarwal *et al.*, 1996 ; Yu *et al.*, 1996 ; McAllister et Snoeyink, 1999 ; Langlois et Delahaye., 2002 ; Vivoni, 2004). D'autres encore proposent d'utiliser les courbes de niveau (Carluer, 1998). Toutes les méthodes reposent au préalable sur le calcul de l'arbre de drainage topographique. Nous appellerons arbre de drainage un ensemble de valeurs numériques traduisant les directions naturelles ou contraintes prises par l'écoulement de surface. Ces valeurs sont associées aux primitives graphiques. A partir d'un MNT raster, l'arbre de drainage est représenté par une grille de direction ; dans un MNT à mailles triangulaires (Triangular Irregular Network, TIN), par les vecteurs de plus grande pente. Ces derniers peuvent être visualisés par une couche géographique d'entités vectorielles simples : un ensemble de segments interconnectés.

2.1. L'arbre de drainage topographique

La majeure partie des modèles utilise des structures matricielles carrées pour extraire un arbre de drainage (O'Callaghan et Mark, 1984 ; Moore *et al.*, 1991 ; Tarboton, 1997). La structure carrée offre plusieurs avantages : disponibilité des algorithmes, facilité de reproduction des traitements (Moore *et al.*, 1991) mais aussi et surtout disponibilité des données (Beaujouan *et al.*, 2000). Ainsi, une grande partie des MNT diffusés aujourd'hui sur le marché sont sous la forme de matrice carrée. C'est le cas par exemple des MNT produits par corrélation stéréoscopique d'images de télédétection ou bien encore des levées laser réalisées par les capteurs aéroportés.

2.1.1. Le calcul de l'arbre de drainage à partir de données raster

Le modèle de données raster est un jeu de données numériques géoréférencées représenté par un tableau régulier à deux dimensions (Gatrell, 1991; Laurini et Thomson, 1992 ; Collet, 1992). Le tableau est ordonné selon (figure 28) :

- un nombre de lignes et de colonnes,
- une distance spécifique et régulière entre les cellules : résolution planimétrique,
- un système de coordonnées fixé au niveau de l'ordonnée à l'origine.

La primitive de base est la cellule ou pixel. La valeur est classiquement échantillonnée au centre de la cellule.

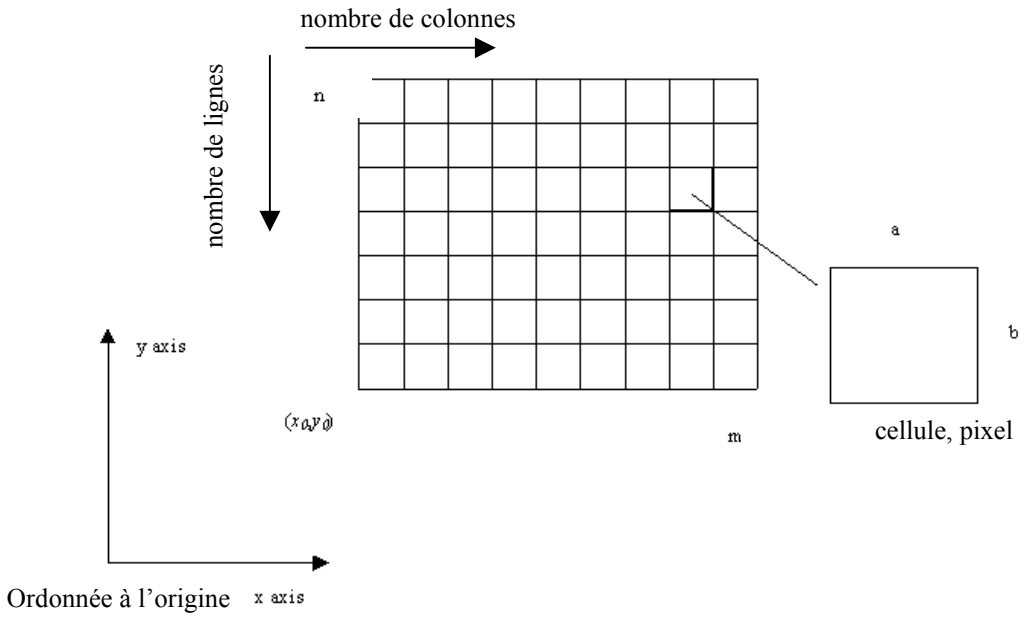


Figure 28. *Le modèle de données raster*[30]

2.1.1.1. La méthode mono-directionnelle

L'une des premières méthodes de production d'un arbre de drainage a été introduite par O'Callaghan et Mark (1984). Utilisée par Jenson et Domingue (1988), Mark (1988), Morris et Heerdegen (1988), Jenson (1991), Martz et Garbrecht (1992), elle est appelée mono-directionnelle (ou méthode D8). Elle consiste à affecter au pixel central la direction de plus grande pente de l'une des huit cellules voisines (fenêtre de 3*3). Les directions sont codées selon huit azimuts et permettent ensuite de connaître pour tout pixel de la matrice le nombre de pixels qui s'y déverse (figure 29). Neuf situations sont possibles (figure 29, tableau 8).

[30] Source : http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u055/u055.html, consulté en décembre 2003

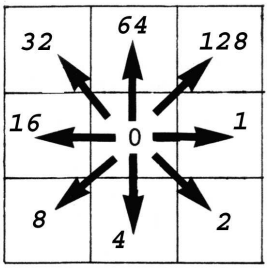


Figure 29. *Direction de drainage (Source : Depraeter et Moniod, 1991)*

Valeur encodée	Azimut correspondant
0	aucun[31]
1	est
2	sud-est
4	sud
8	sud-ouest
16	ouest
32	nord-ouest
64	nord
128	nord-est

Tableau 8. *Exemple d'encodage des directions et azimut correspondant*

Les codages affectés aux pixels du MNT sont stockés dans une grille de direction qui sert ensuite de support pour le calcul de la grille d'accumulation. La grille d'accumulation est une image des surfaces drainées par chaque pixel du MNT. Pour chaque pixel du MNT, le nombre de pixels qui s'y déverse est archivé. Un seuillage des valeurs des pixels permet ensuite d'extraire l'axe de concentration des écoulements : le réseau hydrographique potentiel (figure 30).

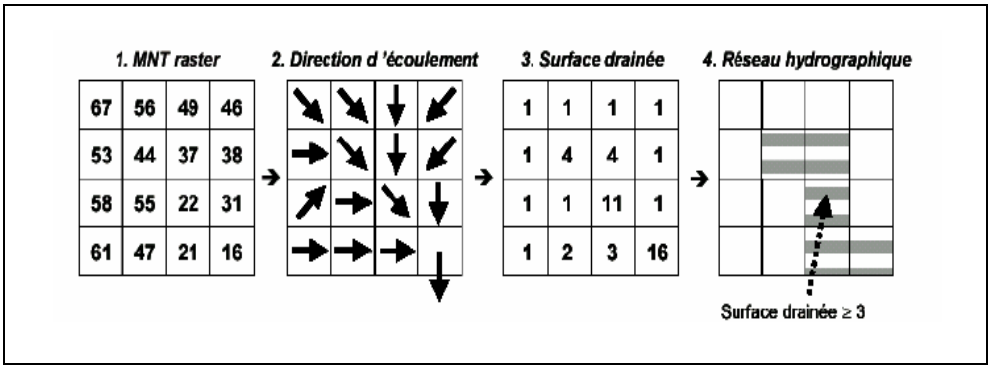


Figure 30. *Méthode de calcul des variables pour l'extraction du réseau de drainage (Source : Charleux-Demargne, 2001)*

De nombreux auteurs ont critiqué cette approche car elle repose sur l'hypothèse que le chemin de l'eau ne prendra qu'une seule direction (Quinn *et al.*, 1991; Freeman, 1991 ; Tarboton, 1997). Pour ces auteurs, il s'agit d'une simplification de la réalité qui conduit à biaiser le calcul de l'arbre de drainage. Depraeter et Moniod (1991) observent ainsi que des incohérences se produisent dans les zones de versant où les courbes de niveau sont parallèles. La direction topographique du pixel tend à se rapprocher vers une direction cardinale et ne

[31] Toutes les mailles voisines ont une altitude supérieure ou égale au pixel central.

correspond plus à celle que l'on peut visualiser par l'analyse des courbes de niveau. Les auteurs appellent cela un phénomène de dérive (figure 31).

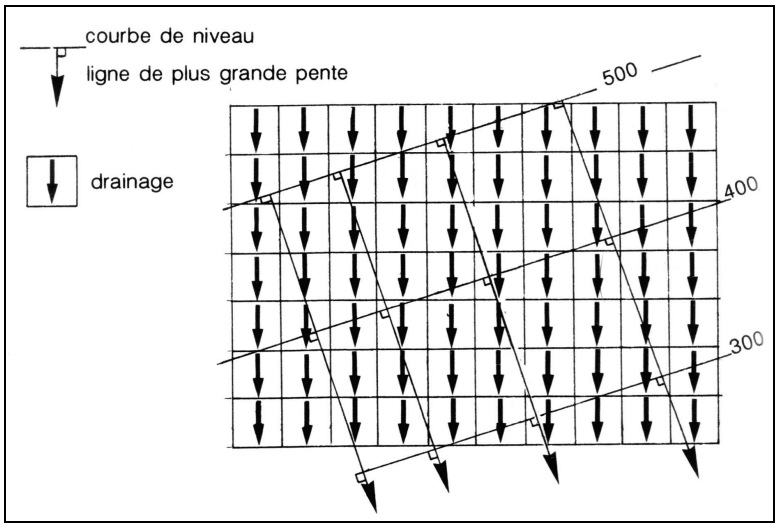


Figure 31. *Phénomène de « dérive » des lignes de drainage avec la méthode de la descente maximale* (Source : Depraeter et Moniod, 1991)

Pour palier les limites de la modélisation mono-directionnelle, des algorithmes plus ou moins sophistiqués ont été proposés (tableau 9).

Méthode - algorithme	Auteur	Répartition du flux
D8	O'Callaghan et Mark (1984)	Mono-directionnel
Rho4/Rho8	Fairfield et Leymarie (1991)	
Lea's	Lea (1992)	
FD8	Quinn *et al.* (1991)	Multi-directionnel (MFD)
FMFD	Freeman (1991)	
DEMON	Costa-Cabral et Burges (1994)	
D-Infinity	Tarboton (1997)	

Tableau 9. *Principales méthodes de calcul des directions d'écoulement sur un MNT raster*

2.1.1.2. Les méthodes multi-directionnelles

Lorsque pour un pixel amont plusieurs cellules aval sont candidates, O'Callaghan et Mark (1984) suggèrent de choisir arbitrairement la direction la plus proche du nord dans le sens horaire. Fairfield et Leymarie (1991) introduisent quant à eux une composante probabiliste pour casser le déterminisme imposé par le D8. Leur méthode appelée Rho8 consiste à multiplier par

une variable issue d'un tirage aléatoire *p* entre 0 et 1 les valeurs des pentes des diagonales et par 1-*p* les quatre autres pentes. En théorie, cette procédure créée des contre-pentes artificielles qui permettent de se rapprocher de la direction de pente naturelle (figure 32).

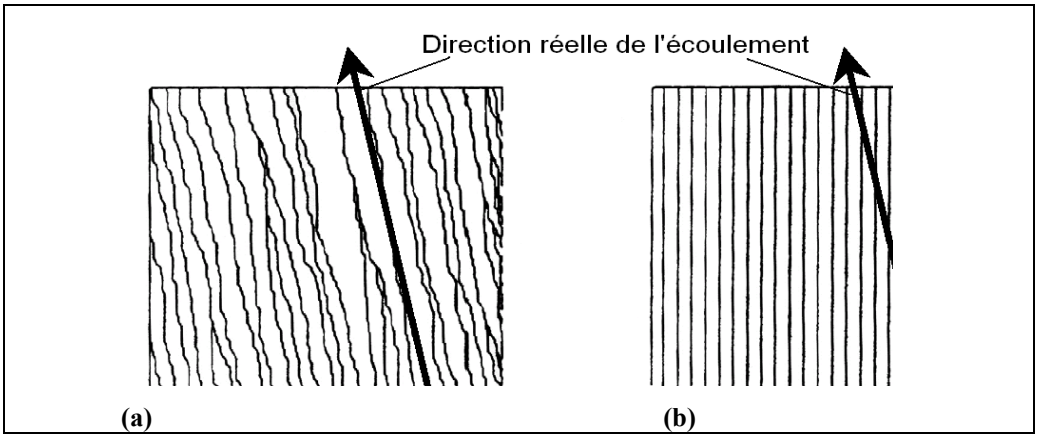


Figure 32. (a) *calcul des directions d'écoulement à partir de la méthode Rho8,*
(b) *à partir de la méthode D8*
(Source : Fairfield et Leymarie, 1991)

Cependant, Costa-Cabral et Burges (1994) font remarquer que l'utilisation de Rho8 provoque l'apparition de méandres et de confluences parasites dans des secteurs où les écoulements devraient être parallèles. Cela conduit à surestimer les surfaces contributives de ces pixels. De plus, l'un des handicaps majeurs de cet algorithme réside dans la non-reproductibilité du plan d'écoulement. Chaque grille de direction est le résultat d'une procédure stochastique, produite une seule fois.

Pour Quinn *et al.* (1991), Freeman (1991), l'amélioration de la simulation des écoulements de surface doit passer par une meilleure prise en compte de la répartition des flux entre les pixels du MNT. L'algorithme doit offrir la possibilité de répartir le flux sortant d'un pixel dans toutes les cellules candidates. Cette représentation de l'écoulement est intégrée dans les méthodes multi-directionnelles. Le flux est fractionné entre les cellules aval en utilisant des règles spécifiques (figure 33).

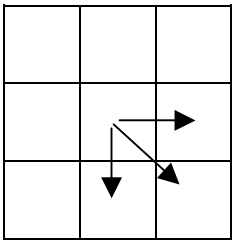


Figure 33. *Schématisation de la répartition du flux sur les cellules en aval selon la méthode multidirectionnelle*
(Source : Quinn et al., 1991)

Quinn *et al.* (1991) proposent de déterminer la répartition de la surface d'un pixel par la formule suivante :

$$f_i = \frac{S_i L_i}{\sum S_j L_j}$$

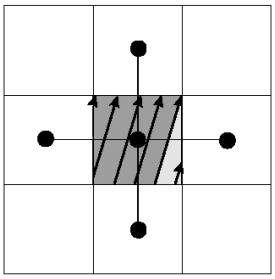
Où S est la pente topographique multiplié par un coefficient L correspondant à la direction prise par la pente. Les valeurs de L sont égales à 0,5 pour les cellules suivant les directions cardinales et 0,354 pour les cellules suivant les directions diagonales.

Freeman (1991) propose de repartir la proportion du flux dans chaque pixel aval i selon :

$$f_i = \frac{S_i^p}{\sum S_j^p}$$

Où S est la pente topographique et p est un paramètre non physique.

Cette méthode a été testée sur une surface topographique conique à partir de différentes valeurs de p. Selon l'auteur, une valeur de p de 1,1 permet d'obtenir des erreurs minimales sur les directions d'écoulement. Lorsque p tend vers l'infini l'écoulement est unidirectionnel. Pour obtenir un plan de drainage cohérent Freeman (1991) considère que p doit être ajusté en fonction de la morphologie (surface plane convergente, surface divergente). Pour Costa-Cabral et Burges (1994), les méthodes de Quinn *et al.* (1991) et de Freeman (1991) ne résolvent qu'en partie les limites des algorithmes mono-directionnels car des effets de bords et des problèmes de discontinuités sont identifiés dans le calcul de la surface amont drainée. Ces auteurs ont proposé d'utiliser un ensemble de procédures DEMON (Digital Elevation Model Networks) pour améliorer le calcul de la surface amont drainée. La direction des écoulements est calculée à partir d'un plan ajusté sur les valeurs d'altitude des pixels cardinaux (figure 34). Le contenu d'une cellule se déverse dans deux cellules voisines parmi quatre cellules potentielles (N, E, S ou O) si la direction n'est pas un multiple de **π/ 4.**



L'écoulement se répartit entre la cellule N et la cellule E selon la proportion de surface définie par la ligne de partage des eaux :

- la portion en gris foncé est drainée par la cellule N,
- la portion en gris clair est drainée par la cellule E.

Figure 34. *Répartition du flux selon la méthode DEMON*
(Source : Costa-Cabral et Burges (1994), in Sauquet, 2000)

Cependant, la méthode DEMON montre plusieurs inconvénients, notamment en raison de l'approximation d'un plan à partir de 4 points alors que seulement trois sont nécessaires. La combinaison de certaines valeurs d'altitude mène à la construction d'un plan contradictoire par rapport à la topographie naturelle et provoque l'apparition de contre-sens dans les directions d'écoulements (Tarboton, 1997). De plus, des exceptions morphologiques sont générées par cette approximation. Pour garantir une évaluation robuste des écoulements, DEMON utilise des algorithmes très complexes adaptés aux différentes situations morphologiques qui, d'après les auteurs, en font un programme trop délicat à utiliser (Costa-Cabral, 1995 in Tarboton 1997).

Selon Tarboton (1997), les méthodes multi-directionnelles posent des problèmes de réalisme pour la simulation des chemins d'écoulement de l'eau. Elles dispersent les flux et accentuent les surfaces drainées par les cellules du MNT : l'organisation des écoulements n'a plus une structure d'arbre (figures 35 et 36).

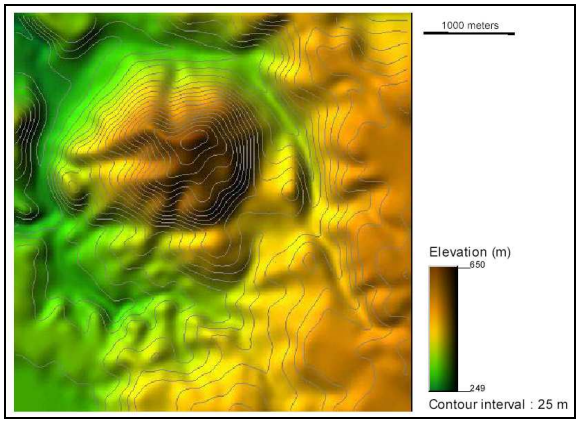


Figure 35. *Modèle Numérique de Terrain de référence*
(Source : Kiss, 2004)

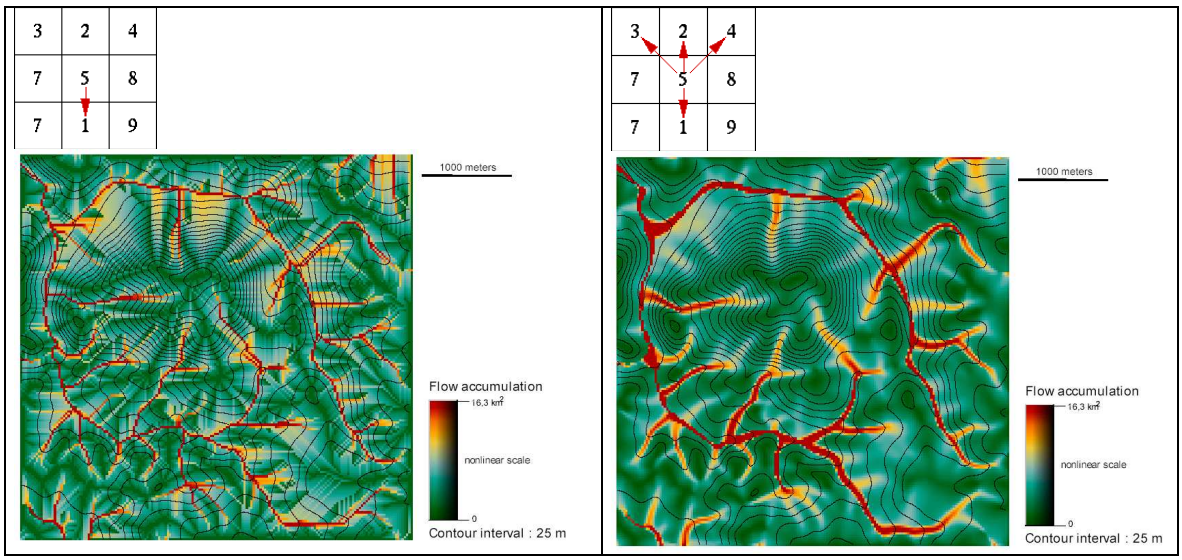


Figure 36. *Grille d'accumulation ou surface drainée par les pixels du MNT : A gauche D8, à droite MFD*
(Source : Kiss, 2004)

Pour Tarboton (1997), Vivoni (2004), la limite de ces méthodes réside principalement dans le choix du plan d'écoulement. Aucun de ces algorithmes n'exploite un plan réel : soit il est approché (Lea, 1992 ; Costa-Cabral et Burges, 1994), soit il est calculé sur la base d'une fenêtre de 3*3 (O'Callaghan et Mark, 1984 ; Quinn *et al.*, 1991). Dans ce dernier cas, qui est de loin le plus exploité, le flux est discrétisé dans seulement huit directions possibles séparées par un angle de 45° (Tarboton, 1997). De plus, l'utilisation des valeurs d'altitudes voisines conduit à s'éloigner de la pente topographique.

2.1.1.3. La méthode de Tarboton (1997)

Pour s'affranchir des limites exposées précédemment, Tarboton (1997) adapte le calcul des valeurs de pente en s'appuyant sur les triangles construits à partir des centres des huit cellules voisines (figure 37). Il calcule la ligne de plus grande pente à partir des huit facettes triangulaires. L'écoulement se repartit ensuite selon les proportions :

- pour la cellule N : $\alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2)$,
- pour la cellule N-E : $\alpha_1 / (\alpha_1 + \alpha_2)$.

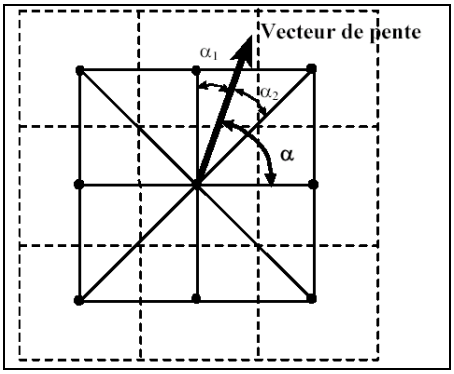


Figure 37. *Calcul des directions d'écoulement selon la méthode Dinf*
(Source : Tarboton, 1997)

La direction de l'écoulement est évaluée par rapport aux deux directions principales qui l'entourent (figure 37, N et E) et la dispersion est limitée à deux cellules au plus (Tarboton, 1997). Cette dernière méthode est en réalité une adaptation des méthodes élaborées pour les structures triangulaires qui consistent à calculer pour chaque triangle du TIN son vecteur normal. La méthode de Tarboton offre des résultats intéressants pour évaluer les surfaces amont drainées mais ne permet pas d'extraire un arbre de drainage pour l'ensemble du MNT : Les pixels pouvant avoir plusieurs directions. Avec ce type d'approche, la simulation du routage de l'eau dans le bassin versant devient très complexe lorsque l'on souhaite intégrer des obstacles anthropiques tels que des routes ou des talus.

2.1.2. Le calcul de l'arbre de drainage à partir d'un TIN

La structure TIN (Triangular Irregular Network) ou RTI (Réseau de triangles irréguliers) est une adaptation du modèle vectoriel pour la représentation de la topographie (Gatrell, 1991 ; Laurini et Thomson, 1992). Une couche TIN est un maillage régulier ou irrégulier composé d'un ensemble de triangles (figure 38). Les primitives géométriques qui composent le TIN sont les nœuds, les arcs et les faces.

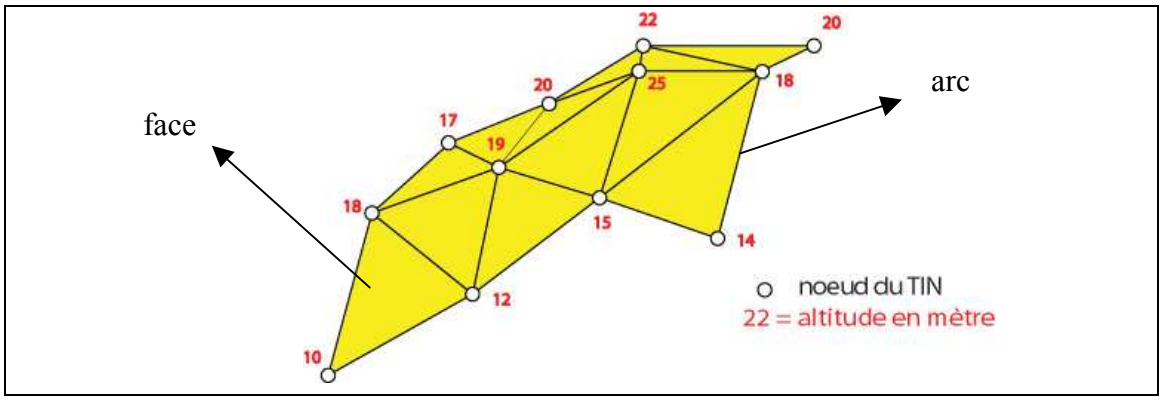


Figure 38. *Représentation d'une structure triangulaire (Bocher, 2004)*

Lorsque la structure TIN représente une surface topographique, les valeurs d'altitude sont stockées sur les nœuds (Weibel et Heller, 1991 ; Laurini et Thomson, 1992 ; Yu *et al.*, 1996). Les triangles sont généralement formés en connectant un échantillon de points selon la triangulation de Delaunay. La triangulation de Delaunay est une triangulation basée sur un critère de maximisation du plus petit angle des triangles. Chaque triangle est inscrit dans un cercle (figure 39). Elle permet de ce fait d'obtenir un réseau comportant le moins possible de triangles aplatis (Watson et Philip, 1984 ; Kaddour et Aissa Brahim, 1999 ; Tucker *et al.*, 2001). C'est pour cette propriété que la triangulation de Delaunay est actuellement la méthode la plus utilisée dans la constitution des structures TIN.

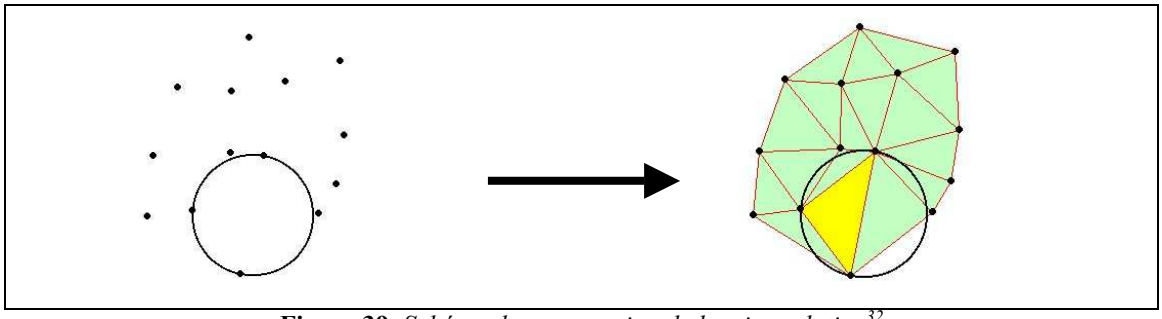
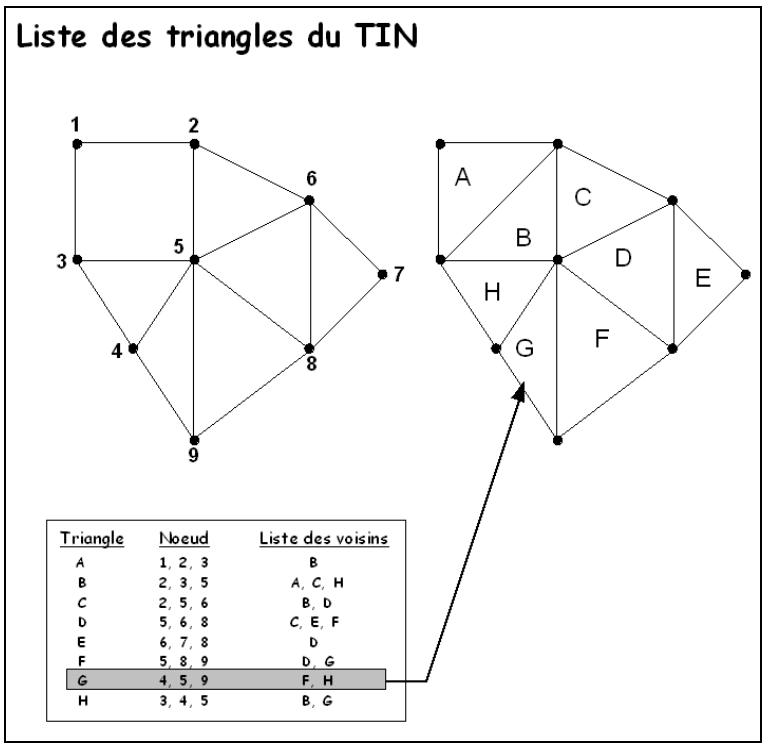


Figure 39. *Schéma de construction de la triangulation*[32]

[32] Source : http://www.ian-ko.com/ consulté en 2003.

Le TIN offre plusieurs avantages pour l'étude des processus de surface.

- La structure géométrique s'adapte aux formes du relief. Ainsi, le nombre de triangles peut être affiné dans les zones de rupture de pente ou au contraire diminué dans les zones ou le relief présente des régularités. Le TIN permet de se libérer d'une contrainte importante de la structure raster qui est la résolution planimétrique constante imposée par l'utilisation d'une cellule fixe : le pixel. Selon Vivoni, la structure TIN est par conséquent moins sensible aux effets d'échelle.
- Le modèle de stockage de la géométrie est topologique. Plusieurs variantes de modèles existent. Le plus simple est fondé sur le triangle (figure 40). Pour chaque triangle, les trois nœuds qui le composent ainsi que les triangles adjacents sont connus.



Triangle	Noeud	Liste des voisins
A	1, 2, 3	B
B	2, 3, 5	A, C, H
C	2, 5, 6	B, D
D	5, 6, 8	C, E, F
E	6, 7, 8	D
F	5, 8, 9	D, G
G	4, 5, 9	F, H
H	3, 4, 5	B, G

Figure 40. *Exemple d'une structure de données TIN*
(Source : *Bocher, 2005* adapté de Laurini et Thomson, 1992)

- La topographie de surface est qualifiée par un plan géométriquement cohérent, le triangle. La direction d'écoulement est déterminée par un vecteur unique, le vecteur de plus grande pente qui peut prendre n'importe quelle valeur angulaire. La valeur Z d'un point à l'intérieur d'un triangle est calculée par interpolation linéaire selon les trois nœuds de celui-ci.

Malgré ces atouts, les TIN sont peu utilisés car les algorithmes sont délicats à mettre en œuvre (Agarwal *et al.*, 1996). Contrairement au MNT matriciel où le cheminement de l'eau est appréhendé à partir d'un objet géométrique unique, sur un TIN il est nécessaire de prendre en compte les trois géométries qui le constituent (nœud, arc, face). En effet, comme le montre la figure 41, l'agencement de ces géométries caractérise les formes du relief or c'est principalement ces formes qui à l'échelle du bassin versant vont guider le routage de l'eau (Langlois et Delahaye, 2002).

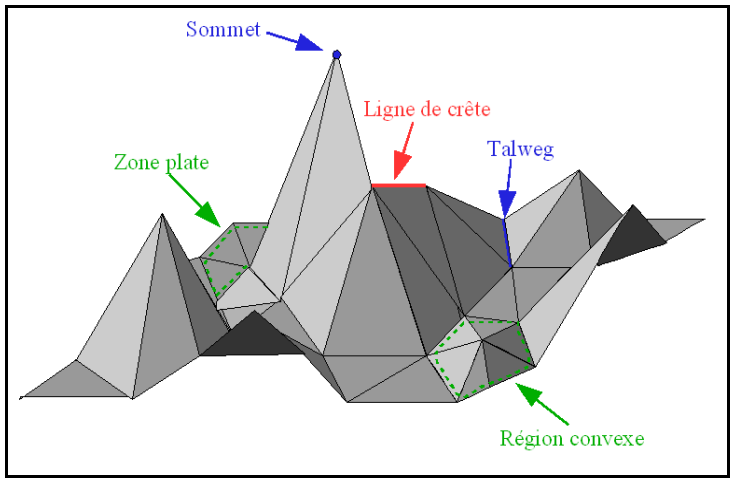


Figure 41. Géométries du TIN et formes du relief *(Bocher, 2005 adapté de Kreveld 1997)*

Pour obtenir un arbre de drainage à partir d'un TIN, les méthodes reposent sur l'étude des relations spatiales entre les arcs et les faces dans un espace supposé à 3 dimensions. Un nœud ne peut définir que deux formes topographiques un sommet (maximum local) ou un point bas (minimum local). Yu *et al.* (1996) proposent une partition morphologique du TIN en qualifiant les arcs à partir de la direction de plus grande pente des triangles adjacents. Trois situations sont distinguées (figure 42) :

1. Un arc e de la triangulation est « transfluant » s'il reçoit de l'eau d'un triangle adjacent et envoie vers l'autre,
2. Un arc e est une ligne de crête locale (diffluant) s'il envoie de l'eau de part et d'autre des triangles,
3. Un arc e est un talweg local (ou confluant) s'il reçoit de l'eau de part et d'autre.

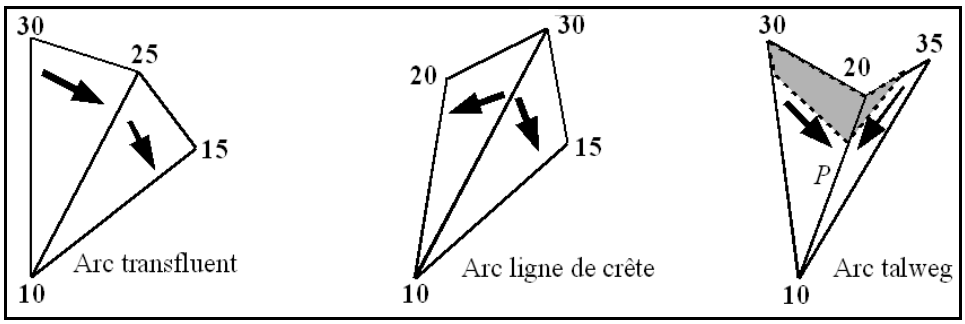


Figure 42. *Définition des arcs du TIN d'après Yu et al. (1996)*

Cette qualification locale est utilisée pour produire un chaînage des cellules. En tout point de la surface, à partir de la ligne de plus grande pente et des attributs morphologiques associés aux arcs, il est possible de simuler la trajectoire d'une goutte d'eau (figure 43) (Petzold *et al.*, 2001).

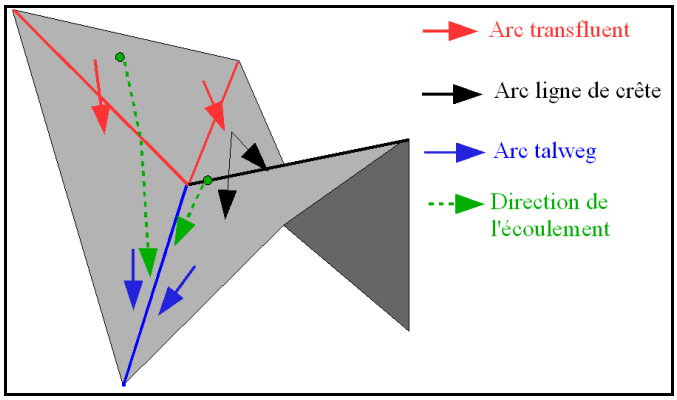


Figure 43. *Simulation théorique de la trajectoire de l'eau sur un TIN (Source : Petzold et al., 2001, modifié)*

Langlois et Delahaye (2002) utilisent la même démarche pour connecter les cellules du TIN entre elles et produire un graphe d'écoulement. Chaque arc est qualifié par un attribut morphologique qui est relatif à sa pente et à la pente des triangles adjacents. Trois critères d'orientation topographique sont retenus pour caractériser la pente des cellules arc et triangle : pente montante, pente descendante, pente plate. Ces notions de pente sont évaluées en fonction du sens topologique de stockage de la géométrie et des informations topographiques. Pour un arc, la pente est calculée en comparant les altitudes des deux nœuds (pôles) de celui-ci. Par exemple, un arc qui a son nœud d'arrivée plus bas que son nœud de départ est descendant. Pour un triangle, la pente est qualifiée suivant sa direction par rapport au sens topologique de l'arc. Un triangle est considéré soit à droite, soit à gauche d'un arc. Un triangle droit est considéré comme descendant lorsque sa ligne de plus grande pente pointe vers l'arc. La combinaison des critères de pente, donne, en théorie 27 cas possibles. Les différents cas sont agrégés pour ne retenir que les situations morphologiques indispensables pour le calcul du graphe d'écoulement. Par exemple, pour un arc correspondant à une ligne de crête, il n'est pas nécessaire de distinguer si cette ligne de crête est montante, descendante ou plate. 11 cas sont conservés, ils sont résumés dans le tableau 10. Cependant l'identification de ces formes ne suffit pas pour obtenir un graphe d'écoulement connecté pour l'ensemble de la surface du TIN. Le calcul de l'arbre de drainage suppose une transposition à l'échelle du TIN or ces formes sont qualifiées localement. Par exemple, il n'est pas assuré qu'un talweg local (talweg descendant ou talweg montant) puisse avoir une continuité morphologique. Celui-ci peut déboucher sur un triangle plat ou sur un minima local (cuvette). Le traitement de ces situations dépend ensuite du niveau de confiance que l'on accorde à la donnée d'entrée et des objectifs d'exploitation de l'arbre de drainage. Pour Langlois et Delahaye (2002), l'arbre de drainage (graphe d'écoulement) est utilisé pour

initialiser les cellules du TIN. Toutes les cellules sont connectées entre elles et l'écoulement est forcé dans les zones plates ainsi que pour les minima locaux. Ce choix n'est pas sans conséquence car il conduit à considérer que ces situations constituent un artefact dans le MNT. La présence de zones plates ou de cuvettes dans un MNT est problématique quelle que soit la structure de données (raster ou TIN) car elles créent des ruptures dans l'arbre de drainage. Elles sont généralement dues à un manque de précision ou d'échantillonnage de l'information altimètrique. Cependant, nous verrons aussi qu'elles peuvent être la conséquence de choix de modélisation (structure de données, introduction de nouvelles sources d'information).

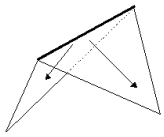
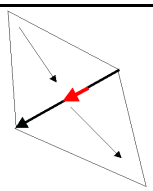
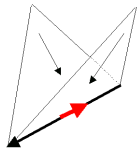
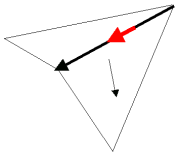
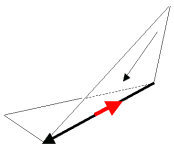
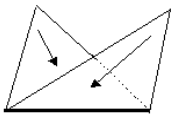
Nom	Pente arc	Triangle gauche	Triangle droit	Exemple graphique
Crête	montante	montant	montant	
	plate	montant	montant	
	descendante	montant	montant	
Pente à gauche	montante	montant	descendant	 pente à droite
	plate	montant	descendant	
	descendante	montant	descendant	
Pente à droite	montante	descendant	montant	
	plate	descendant	montant	
	descendante	descendant	montant	
Talweg montant	montante	descendant	descendant	 talweg montant
Talweg descendant	descendante	descendant	descendant	
Rebord gauche	montante	montant	plat	 rebord gauche
	plate	montant	plat	
	descendante	montant	plat	
Rebord droit	montante	Plat	montant	
	plate	Plat	montant	
	descendante	Plat	montant	
Fond gauche	montante	Plat	descendant	 fond gauche
	plate	Plat	descendant	
	descendante	Plat	descendant	
Fond droit	montante	descendant	plat	
	plate	descendant	plat	
	descendante	descendant	plat	
Plat	plat	Plat	plat	
	plat	descendant	descendant	
Limite externe	Utilisé pour l'identification des bords du TIN			
Légende	Orientation topologique de l'arc			
	Direction de la pente topographique			

Tableau 10. *La qualification morphologique des arcs d'un TIN selon Langlois et Delahaye (2002)*

2.2. L'arbre de drainage contraint

L'arbre de drainage contraint est un arbre de drainage topographique qui a été modifié pour tenir compte des caractéristiques du territoire sur l'apparition et l'organisation de l'écoulement de surface. La production d'un arbre de drainage contraint s'appuie sur l'intégration de données exogènes au MNT. Il peut s'agir d'éléments de sur-sol tels que les talus ou les routes, ou de variables surfaciques tels que le type de sol ou le type de culture. Les approches reposent sur l'exploitation des techniques de l'analyse spatiale propres au SIG et qui consistent à mettre en relation verticalement et horizontalement plusieurs informations localisées afin de traduire les interactions entre les composants d'un territoire. Les méthodes de calcul d'un arbre de drainage contraint peuvent être classées en deux catégories, celles qui se fondent sur une ré-ingénierie du MNT (Charleux-Demargne, 2001) et celles qui nécessitent une algorithmie spécifique.

2.2.1. La méthode de ré-ingénierie du MNT

Le terme de ré-ingénierie des MNT a été introduit par Charleux-Demargne (2001). Il consiste à modifier le plan altimétrique pour satisfaire à des critères de qualité d'ordre hydrologique (Aurouseau et Squividant, 1996). A cette fin des données exogènes sont introduites telles que le réseau hydrographique ou encore les limites des bassins versants, le but ultime étant d'approcher un MNT dit hydrologiquement cohérent (Puech, 2000 ; Charleux-Demargne, 2001). Nous présentons quelques exemples d'applications de la méthode de ré-ingénierie pour la prise en compte de l'effet des aménagements dans le calcul d'un arbre de drainage.

2.2.1.1. Application sur un MNT raster

Cette technique a été utilisée par Sebbab (2000) pour modéliser l'impact de la voirie sur l'organisation des écoulements de surface. Le MNT raster qui sert de référence pour le calcul des directions topographiques à partir de la méthode Rho8 est creusé au niveau des routes. Le seuil de creusement est évalué en fonction du profil transversal de la route et de la résolution du pixel. Les directions d'écoulement sont ensuite calculées sur le MNT modifié. Cette technique, simple d'utilisation, offre de bons résultats lorsqu'il s'agit d'objets qui se soustraient à la

topographie naturelle (canal, route décaissée, fossé). A contrario, lorsqu'il s'agit d'objets surélevés par rapport à la topographie, la modélisation des directions d'écoulements peut présenter des irrégularités.

Pour étayer notre propos nous appliquons la méthode proposée par Sebbab (2000) sur un MNT extrait de la Bd Alti de l'IGN et rééchantillonné linéairement avec un pas de 10 mètres (figure 44a). L'objectif est d'étudier son influence sur la modélisation de l'arbre de drainage en retenant deux scenarii d'aménagement des routes : l'un où elles sont creusées, l'autre où elles sont rehaussées. La localisation des routes est théorique (figure 44b).

La démarche de modélisation est divisée en 3 séquences :

1. rasterisation des routes,
2. intégration des routes au MNT,
3. calcul des grilles de direction selon la méthode D8 (méthode de plus forte pente) et des grilles d'accumulation.

Les traitements sont réalisés conjointement dans deux logiciels de SIG : Idrisi Kilimanjaro et ArcGIS 8 X étendu du module spatial analyst.

1. Rasterisation des routes

La première étape consiste à réaliser une transformation de géométrique. Les routes représentées sous la forme de polylignes sont converties en une succession de pixels. Lors de cette procédure de rasterisation, une grille raster est produite en utilisant les propriétés géométriques du MNT : taille de cellule, nombre de lignes et de colonnes, ordonnées à l'origine (DeMers, 2002). Les pixels routes sont codés avec la valeur 1. L'emprise de la route est marquée par un seul pixel.

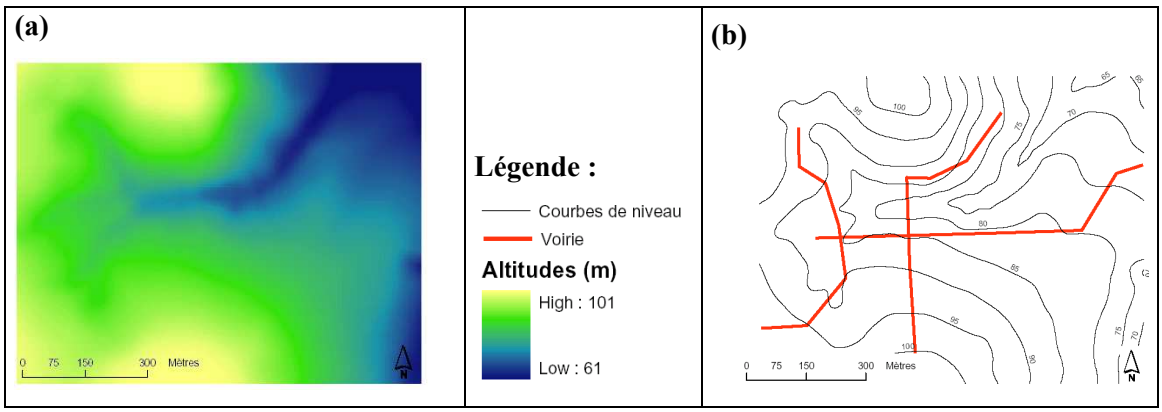


Figure 44. *Données d'entrée : à gauche le MNT raster, à droite les routes.*
(Bocher, 2005. Source : BD Alti de l'IGN)

La figure 45 expose les résultats de la rasterisation sur un tronçon de route. On remarquera que les deux logiciels utilisent un algorithme différent : ArcView sélectionne tous les pixels traversés par une entité route tandis qu'Idrisi procède à un lissage géométrique.

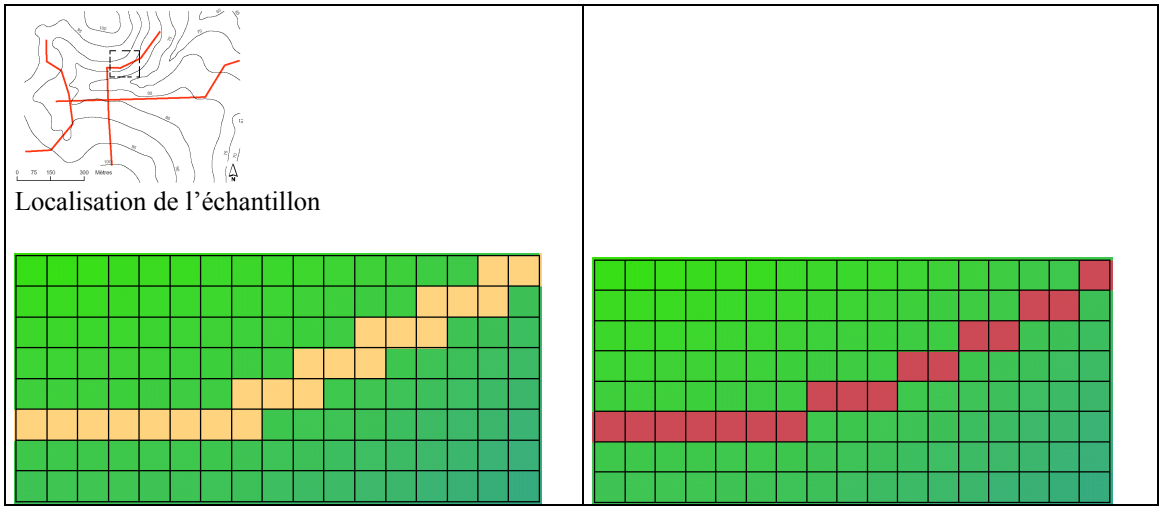


Figure 45. *Extrait de rasterisation de la voirie : à gauche algorithme utilisé par ArcView à droite algorithme utilisé par Idrisi (Bocher, 2005)*

2. Intégration des routes au MNT

L'intégration des routes dans le MNT se réalise à partir d'opérateurs spatiaux arithmétiques et conditionnels. Ces opérateurs satisfont une grammaire spécifique (Map Algebra) pour la combinaison, la comparaison, l'analyse de grille raster (DeMers, 2002).

Le protocole est le suivant :

- Pour le scénario où les routes sont creusées, les pixels du MNT correspondant à des routes sont décaissés d'une hauteur de 1 m.
- Pour le scénario où les routes sont rehaussées, les pixels du MNT correspondant à des routes sont augmentés d'une hauteur de 1 m.

En conséquence quatre MNT modifiés sont produits.

3. Calcul des grilles de direction et d'accumulation

Pour chaque MNT, une grille de direction puis une grille d'accumulation sont dérivées. L'analyse des grilles d'accumulation produites à partir des MNT creusés montre que le rôle de capture et de concentration des écoulements par les routes est bien simulé dans les deux cas (Idrisi et Arcgis). Les pixels routes ressortent avec de fortes valeurs (figure 46). La méthode de discrétisation n'influence pas le calcul des directions d'écoulements aux abords des routes. Les pixels topographiques pointent vers les pixels routes (figure 47).

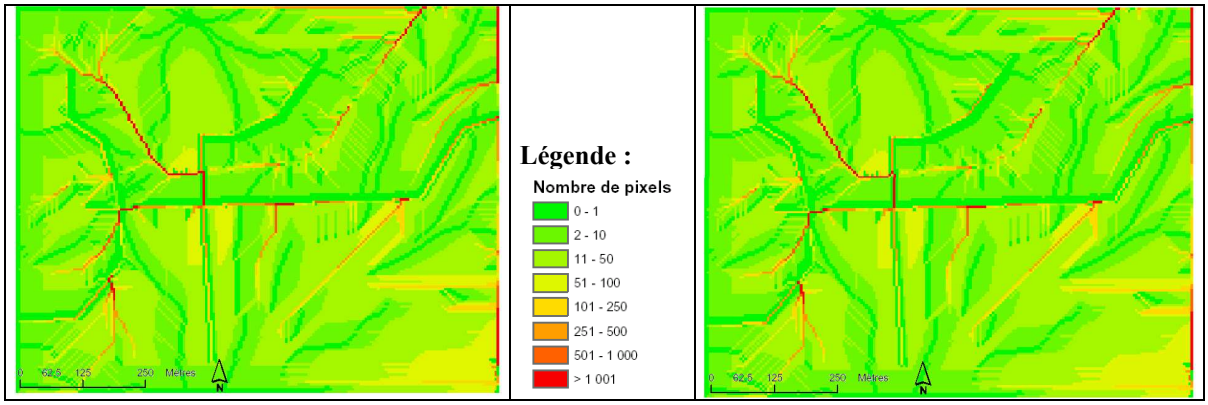


Figure 46. *Grille d'accumulation « décaissée »: à gauche avec ArcGIS, à droite avec Idrisi (Bocher, 2005)*

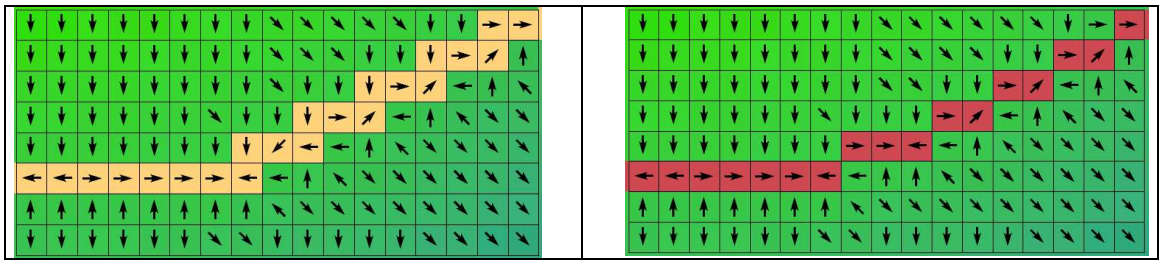


Figure 47. *Direction des pentes selon la méthode D8 calculé sur les MNT creusés à gauche avec ArcGIS, à droite avec Idrisi (Bocher, 2005)*

En revanche, lorsque les routes sont surélevées, il apparaît de profondes divergences dans le calcul des directions des pixels. La grille d'accumulation produite avec Idrisi traduit des ruptures en amont des pixels routes alors que la grille créée avec ArcGIS modélise correctement l'impact de l'obstacle (figure 48). Dans le cas d'Idrisi, l'effet de l'obstacle est minimisé par des franchissements topographiques entre les pixels amont de la route et les pixels aval (cercle rouge sur la figure 49).

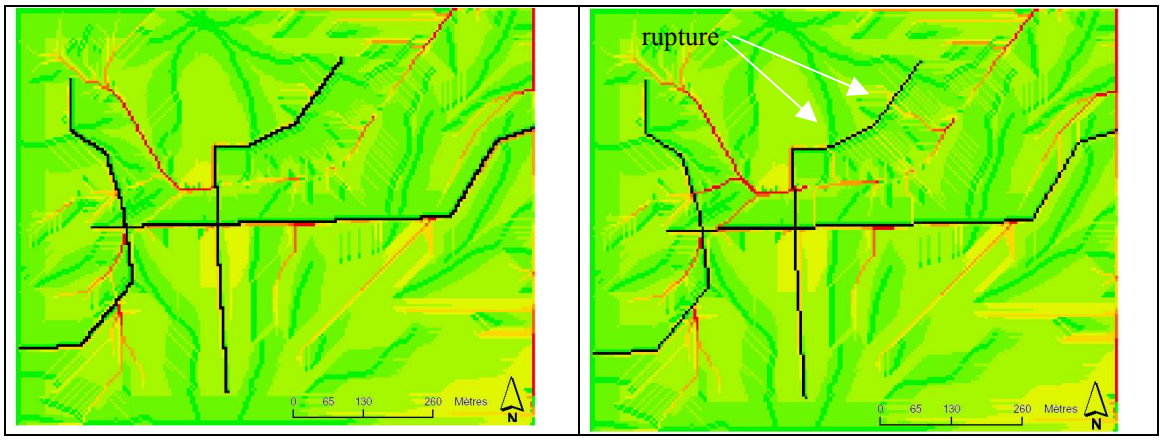


Figure 48. *Grille d'accumulation « rehaussée » : à gauche avec ArcGIS, à droite avec Idrisi (Bocher, 2005)*

Ces résultats sont inhérents à la méthode de calcul des directions. Le calcul réalisé sur une fenêtre de 3*3 ne reconnaît pas la continuité géométrique entre deux pixels de routes diagonaux (figure 49, cercle rouge).

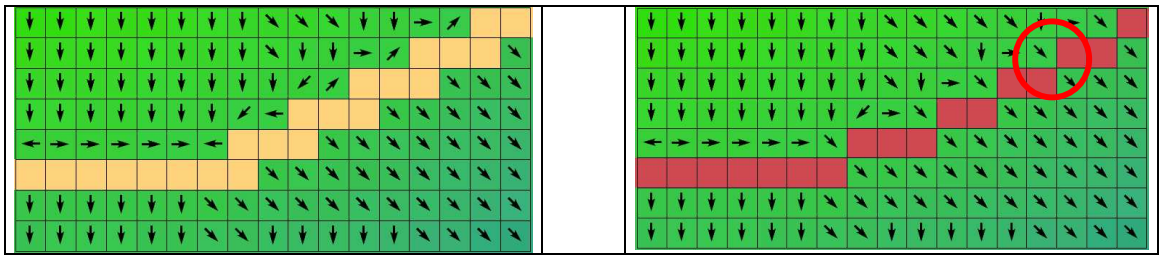


Figure 49. *Direction des pentes selon la méthode D8 calculé sur les MNT rehaussés*

Ces constats soulèvent un point important de la méthodologie utilisée qui est sa transposabilité d'un logiciel à l'autre. Il apparaît clairement que la cohérence des simulations est dépendante des fonctions de traitements disponibles dans le SIG.

Notons enfin que la méthode « Sebbab » ne s'applique qu'à une seule composante thématique du territoire, les routes et pour des configurations paysagères particulières, l'impact de la voirie sur l'érosion hydrique des sols viticoles de Champagne. Or, le parcours des écoulements à la surface du sol est contraint par une distribution fragmentée d'objets dans le paysage. Pour parvenir à une simulation spatiale des écoulements de surface plus proche de la réalité, l'apport de nouvelles sources d'information est indispensable (Souchère, 1995 ; Ambroise, 1999 ; Cerdan, 2001).

Cependant, les démarches d'enrichissement du MNT sont délicates car la primitive graphique de référence est unique et sa taille fixe (Shortridge et Clarke, 1999). La figure 50 illustre un problème classiquement rencontré : l'effet de voisinage. La rasterisation de la couche talus (vignette b) induit un recouvrement total de l'espace représentant la route (vignette c). Les talus sont jointifs et les déconnexions sur les entités vectorielles sont estompées. Lors de l'intégration de la couche route les pixels talus aux abords de la route n'offrent plus de continuité.

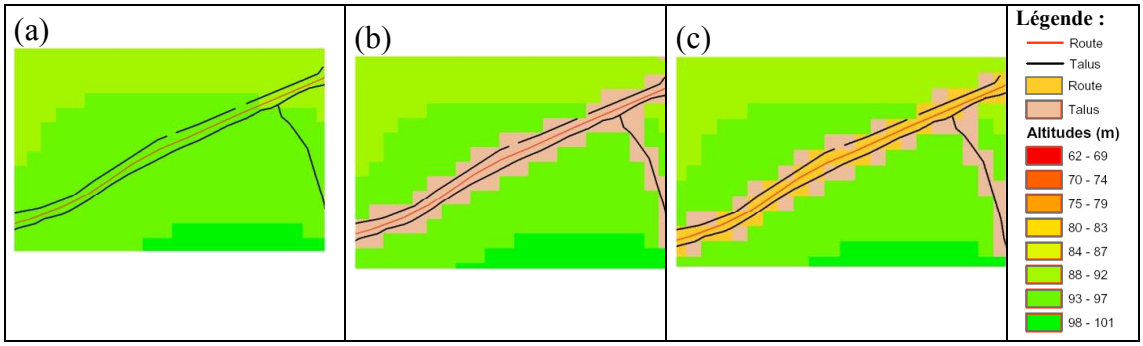


Figure 50. *Le problème de l'intégration de plusieurs sources de données dans le MNT (Bocher, 2005)*

Pour corriger ces conflits, Mérot *et al.* (1999), Souchère *et al.* (1998) , Taken *et al.* (1999a, 2001a), proposent de procéder à un ajustement des pixels représentant les objets intégrés. Cet ajustement se réalise en utilisant des règles de priorités et les techniques de la morphologie mathématique. Mérot *et al.* (1999) limitent ainsi la largeur de la maille-haie à au plus une maille en utilisant un algorithme de squelettisation (procédé qui consiste à éroder par itération un ensemble de pixels, figure 51).

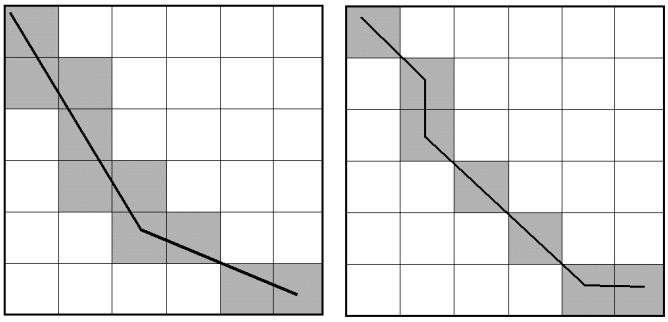


Figure 51. *Exemples d'adaptation morphologique des pixels haies.*
A droite avant traitement, à gauche après traitement (Source : Mérot et al., 1999)

Souchère (1995) utilise des règles de priorité lorsqu'un arc vectoriel qui doit être rasterisé est partagé par plusieurs motifs (route, dérayure, fourrière, fossé). Par exemple si un pixel appartient à la fois à une fourrière et à un fossé, lors de la rasterisation le pixel fossé est prioritaire sur le pixel fourrière.

2.2.1.2. Application sur un TIN

Rognan *et al.* (1998) ont utilisé un MNT triangulaire pour modéliser les couloirs d'une avalanche et positionner en conséquence un obstacle pour protéger une zone urbaine. L'approche est décomposée en quatre étapes :

- construction d'une triangulation contrainte par les lignes caractéristiques du relief (talweg, ligne de crête). La triangulation contrainte consiste à introduire dans la structure du TIN des éléments linéaires sur lesquels les triangles vont trouver appui. Il s'agit d'une opération de raffinement (figure 52 a et b),
- calcul dynamique du chemin de l'avalanche à partir de points localisés manuellement sur le TIN. Le parcours de l'avalanche est recomposé en connectant d'amont en aval les vecteurs de plus grande pente des faces et arcs du TIN (figure 52 b).
- estimation du meilleur emplacement pour positionner un talus protecteur,

- intégration du talus protecteur dans la triangulation de départ et nouvelle simulation des couloirs d'avalanche (figure 52 c). Le processus est itératif tant qu'il existe un risque le modèle continu à rechercher de nouvelles protections.

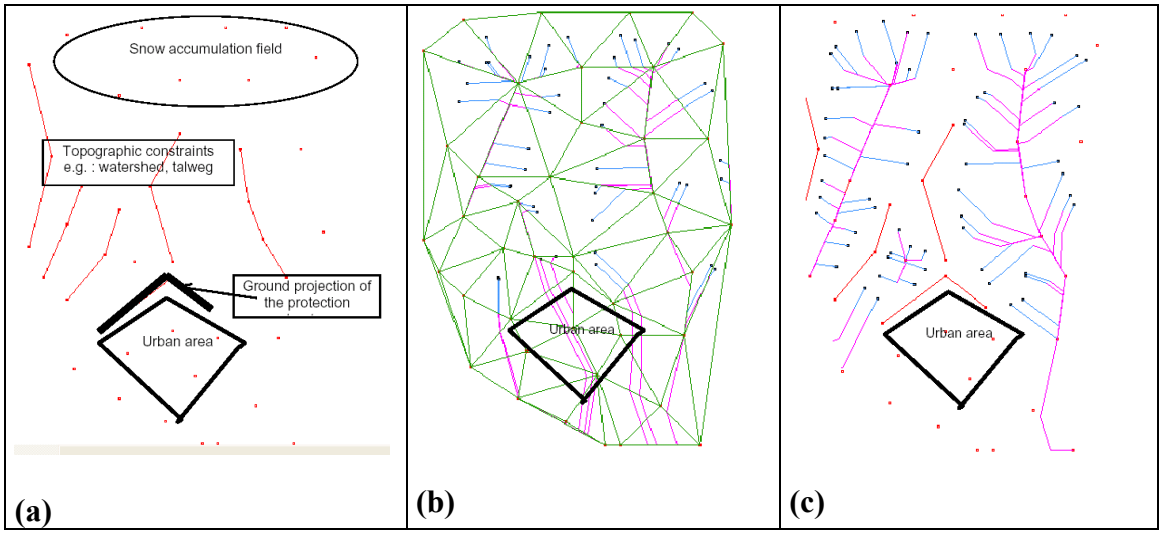


Figure 52. *(a) Données intégrées à la triangulation : courbes de niveau, lignes caractéristiques du relief, aire urbaine et localisation potentielle d'un talus de protection, (b) triangulation contrainte, localisation de la zone urbaine et couloirs d'avalanche, (c) simulation des couloirs d'avalanche après intégration du talus de protection*

Bocher (2003) a utilisé une approche similaire avec un MNT triangulaire contraint par un réseau de talus afin d'identifier les segments de talus pouvant potentiellement bloquer les écoulements de surface (figure 53).

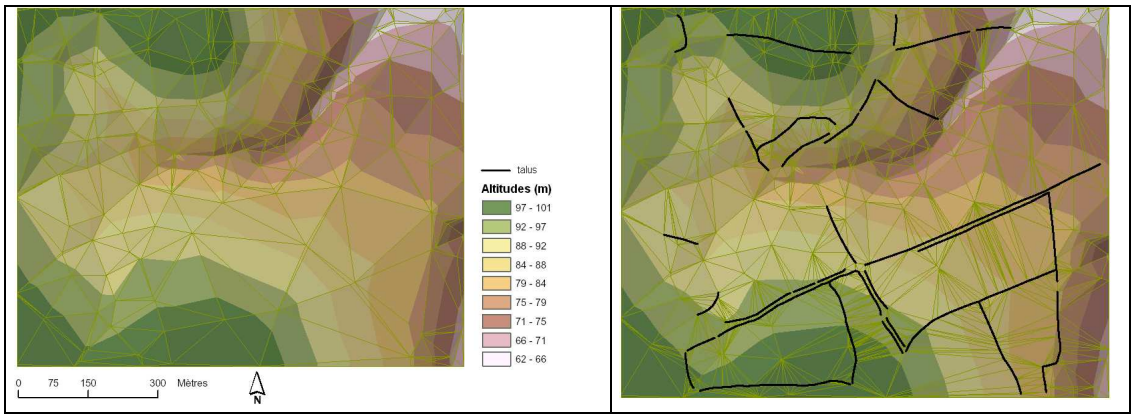


Figure 53. *à gauche une triangulation de Delaunay sans talus, à droite une triangulation contrainte par les talus (Bocher, 2002)*

La démarche se déroule en 5 étapes :

- production d'une triangulation topographique,
- intégration des éléments talus représentés par des lignes dans la triangulation topographique,
- extraction des centroïdes des triangles du TIN contraint
- pour chaque centroïde calcul du chemin parcouru par l'écoulement de surface selon la ligne de plus grande pente. Cette procédure est réalisée itérativement jusqu'à ce que l'écoulement au départ du centroïde parvienne à un exutoire. Le résultat final produit un arbre de drainage (figure 54).

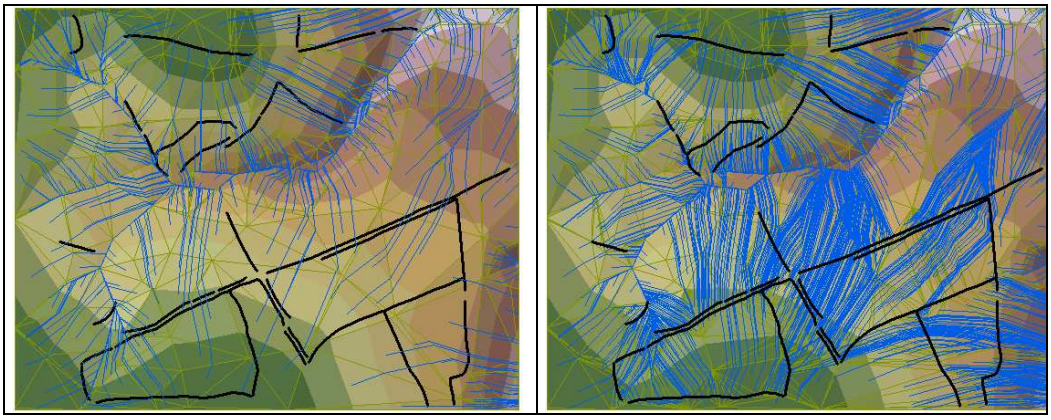


Figure 54. *Calcul de l'arbre de drainage*

A droite triangulation de Delaunay, à gauche triangulation contrainte par les talus (Bocher, 2002)

- lors de la triangulation les lignes de talus sont décomposées en segments uniques correspondant à des arcs de triangles (figure 55).

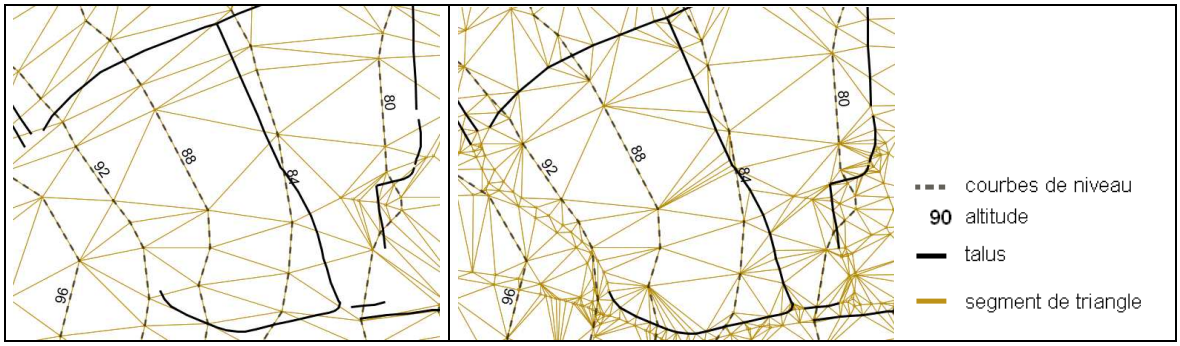


Figure 55. *Décomposition des talus en segments : à droite l'entité talus avant la triangulation, à gauche les segments après la triangulation (Bocher, 2002)*

Pour chaque segment, l'auteur calcule l'angle qui est formé à l'intersection avec un tronçon de l'arbre de drainage. Un seuil angulaire est ensuite retenu pour qualifier les segments de talus potentiellement « bloquants » de ceux « passants » (Bocher, 2003).

L'intérêt de cette approche réside dans la structure de données utilisée qui outre le fait de produire un arbre de drainage cohérent, permet aussi de conserver les caractéristiques géométriques des objets de départ. Cependant, la qualification de l'efficacité des talus ne repose que sur une valeur angulaire qui ne prend pas en compte la pente de celui-ci. L'arbre de drainage produit n'est pas contraint mais affiné en fonction du nombre de triangles du TIN. Le flux qui pointe vers un talus n'est pas redirigé lorsque l'arc du talus est en pente. Le nombre de segments de talus efficaces est donc surestimé.

2.2.2. Les méthodes algorithmiques spécifiques

Les méthodes algorithmiques spécifiques correspondent à un chaînage plus ou moins complexe d'un ensemble d'opérations informatiques, appelé aussi procédure. Ces procédures se basent sur des règles logiques ou mathématiques qui définissent les interactions entre les éléments introduits dans la modélisation. Plusieurs modèles reposent sur l'utilisation d'algorithmes spécifiques pour calculer un arbre de drainage contraint, parmi lesquels on peu citer : le modèle STREAM (Souchère, 1995 ; Cerdan, 2001), le modèle TCRP (Takken *et al.*, 2001a), le modèle RIDEM (Duke *et al.*, 2003), le modèle WATEM (Van Oost *et al.*, 2003), le modèle CHILD-TIAP (Tucker *et al.*, 2001) ou encore le modèle « TORTRAT » (Tortrat, 2004. Les schémas de modélisation sont très diversifiés. Les plus complets exploitent des structures matricielles et prennent en compte les obstacles linéaires. Les modèles utilisant des TIN sont peu représentés et lorsqu'ils sont exploités, les conditions de production de l'arbre de drainage sont définies au sein d'unités spatiales surfaciques élémentaires (Ivanov *et al.*, 2002 ; Vivoni *et al.*, 2004). Ces unités spatiales élémentaires peuvent s'apparenter à des unités de sols dans lesquelles la réponse hydrologique est supposée homogène (Vivoni *et al.*, 2004) ou bien encore à des types d'occupation du sol (Langlois et Delahaye, 2002 ; Delahaye, 2004, communication personnelle). Dans cette section, nous porterons notre attention sur le fonctionnement de trois modèles : le modèle TCRP (*Tillage-Controled-Runoff-Pattern*), le modèle RIDEM et le modèle TORTRAT.

2.2.2.1. Le modèle TCRP (Takken et al., 2001a)

Le modèle TCRP est un modèle spatialisé qui simule les chemins de l'eau en prenant en compte la topographie et les motifs agraires. Le modèle de données utilisé par TCRP est unique et basé sur une structure raster. TCRP permet de produire une grille de direction des écoulements selon deux approches.

- La première TCRP(a) admet l'hypothèse que les directions d'écoulement sont imposées par le sens de travail du sol dans les parcelles cultivées,
- La seconde TCRP(b) affine la première approche en introduisant le paramètre rugosité du sol dans le calcul de la grille de direction. Les écoulements sont dirigés selon la direction du travail du sol, la topographie et la rugosité induite par le type de culture.

Cinq grilles rasters sont nécessaires pour faire fonctionner TCRP (a). Pour TCRP (b) une grille supplémentaire est introduite (tableau 11). Elle qualifie la rugosité de la parcelle en fonction du type de culture. Par la suite, nous présenterons uniquement la démarche de modélisation des écoulements de surface utilisée par TCRP (b).

Modèle	Grille raster d'entrée
TCRP (a et b)	Une grille d'altitudes.
	Une grille du parcellaire dans laquelle les pâtures et les forêts doivent avoir un identifiant séparés. Les identifiants 0 et 1 sont à éviter pour les parcelles.
	Une grille qualifiant le sens de travail du sol pour chaque parcelle : les valeurs sont comprises en 0 et 180 et donnent l'orientation principale. Les pixels qui n'ont pas d'orientation sont marqués à –1. La direction 0 correspond au nord et est mesurée dans le sens des aiguilles d'une montre.
	Une grille localisant les rivières et les routes. La valeur 1 est affectée aux rivières, 0 pour le reste. Si les rivières ne sont pas connues les valeurs de la grille sont à zéro.
	Une grille avec les directions des rivières. Si les rivières ne sont pas connues, la grille ne contient aucune valeur.
TCRP (b)	Une grille renseignant en centimètres la rugosité du sol par type de culture. Cinq classes sont utilisées : 0, 2,3, 5, 10, 25 cm.

Tableau 11. *Liste des grilles rasters utilisées par TCRP (a) et (b)*

Le schéma de modélisation avec TCRP (b) est scindé en quatre étapes :

- calcul d'une grille de direction topographique selon la méthode mono-directionnelle de plus forte pente,
- production d'une grille de direction des écoulements selon le sens de travail du sol,

- application de règles de décision pour déterminer pour chaque cellule si l'eau s'écoule dans le sens topographique ou dans le sens de travail du sol,
- combinaison de la grille de direction topographique et de la grille de direction calculée lors de l'étape 3 afin de produire une grille de prédiction des directions des écoulements.

Au cours de ces quatre étapes une succession de procédures complexes, traduites dans le langage de la librairie PC Raster est exploitée pour obtenir une représentation des écoulements au plus proche de la réalité. Elle suppose de prendre en compte de nombreux cas particuliers (artefacts) provoqués lors de l'intégration de données exogènes à la topographie ou inhérents à la structure raster. Pour Takken *et al. (2001a)*, la détection et l'élimination de ces artefacts sont nécessaires sous peine d'obtenir une prédiction des écoulements erronée.

Les artefacts « induits » sont observés au niveau des frontières entre les pixels des grilles « parcellaire » et « rivière ». Il s'agit de franchissements entre deux pixels adjacents dont les directions de drainage sont diagonales et convergentes (figure 56).

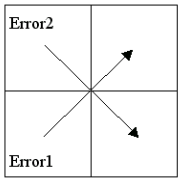


Figure 56. *Exemple de franchissement de direction*
(Source : Takken, 1999b)

La figure 57 représente les trois situations principales où des franchissements sont rencontrés et les corrections adoptées par TCRP.

- **Cas A :** les pixels blancs représentent une rivière, les pixels gris une parcelle boisée ou une pâture.
- **Cas B :** les pixels blancs représentent une parcelle culturale. Les directions d'écoulement imposées par le sens du travail du sol gomment l'effet du talweg (pixels orientés sud/sud-est nord/nord-ouest).
- **Cas C :** les pixels gris représentent une parcelle boisée ou une pâture, les pixels blancs une parcelle culturale.

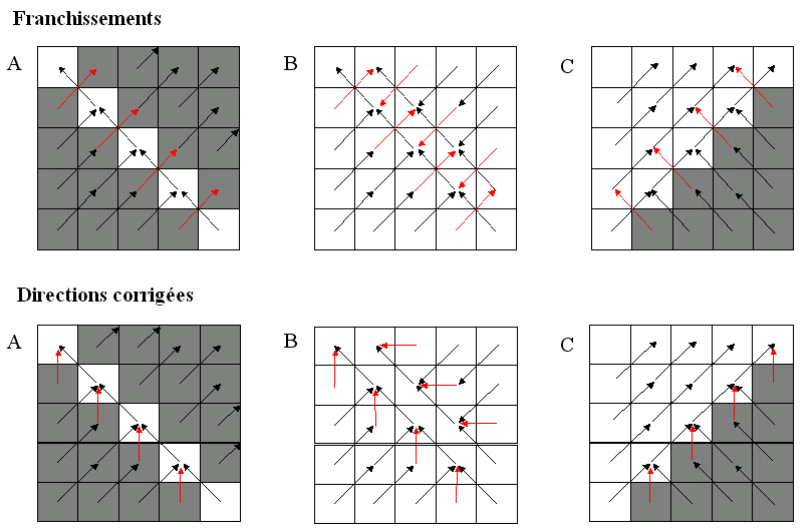


Figure 57. *Situations de franchissements et corrections des directions apportées par TCRP (a) et (b) (Source : Takken et al., 1999b)*

En dehors de ces artefacts, Takken *et al.* (2001a) sont confrontés aux limites de la structure matricielle carrée lors du calcul de la grille de direction selon le sens du travail du sol (tillage direction). Le calcul consiste à reproduire dans la structure matricielle les lignes imposées par le travail du sol et à les orienter en fonction de la pente descendante. Cependant cette méthode exposée dans la figure 58a pose deux problèmes majeurs. Le premier survient lorsque la direction n'est pas un multiple de **π/2**. Dans ce cas, une approximation par rapport à la direction réelle est effectuée. Par exemple, si la direction observée sur le terrain est de 23°, dans la structure raster elle prendra la valeur de 45°. Le second est une conséquence indirecte du premier. Plus la longueur du champ est importante et plus les directions du travail du sol calculées s'éloignent de la direction réelle (figure 58 a).

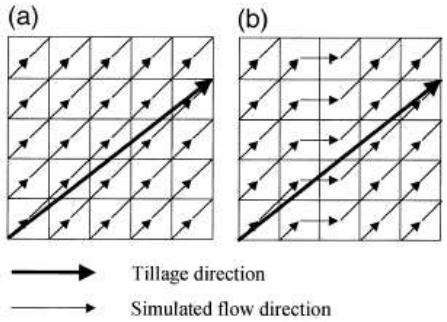


Figure 58. *Grilles des directions de travail du sol (Source : Takken et al., 1999b)*

Pour corriger ces problèmes, Takken *et al.* (2001a) introduisent une procédure spécifique qui consiste à adapter l'orientation des pixels pour limiter les pertes angulaires (figure 58 b). Les lignes de pixels qui représentent le sens de travail du sol sont sélectionnées au

cours de trois étapes (figure 59). Lors de chaque étape les pixels des lignes sont orientés dans le sens descendant du travail du sol (figure 58 b).

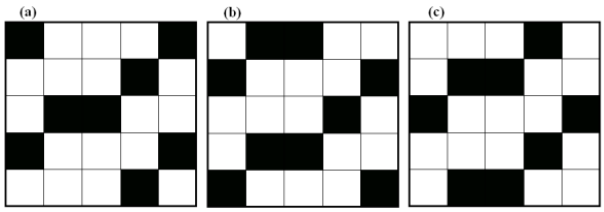


Figure 59. *Sélection des pixels pour l'adaptation de la grille de direction du travail du sol*

En dépit de ces corrections, les directions de drainage peuvent toujours présenter des incohérences. Il s'agit par exemple de pixel sans exutoire ou de boucles sans fin. Ces artefacts apparaissent principalement dans les zones plates. Ils sont eux aussi supprimés.

Au final TCRP produit une grille de direction des écoulements supposée hydrologiquement cohérente. Le chainage de l'eau de surface est continu de l'amont vers l'aval. Cette grille est ensuite combinée avec la grille de rugosité du sol pour affiner la prédiction des directions dans les parcelles culturales. Le paramètre de rugosité est intégré dans une fonction discriminante permettant de prédire la « meilleure direction » du ruissellement. La fonction proposée par Takken *et al.* (2001b) est une adaptation de celle de Souchère (1995).

Elle s'exprime de la façon suivante :

$$\text{logit}(p) = -5.92 + 0.133S + 0.102\lambda - 0.417R_o$$

S = pente topographique en %

λ = angle formé entre l'orientation du travail du sol et l'aspect.

R_0 = valeur de la rugosité orientée

Lorsque logit(p) est supérieur à 0,5 le ruissellement est guidé par la topographie ; lorsqu'il est inférieur la direction de ruissellement est imposée par le travail du sol.

L'étude du modèle TCRP illustre la complexité des techniques qui doivent être mises en œuvre pour aboutir à la production d'un arbre de drainage qui intègre les interactions spatiales. Pour rester cohérente, la modélisation nécessite de faire évoluer les objets représentés ainsi que les processus élémentaires décrits au risque quelques fois de falsifier le parcours de l'eau (correction des artefacts). On peut s'interroger ici sur le choix de la structure raster pour appréhender l'effet d'entités dont l'emprise au sol et la distribution spatiale y est par nature

délicate à représenter. Une bonne qualité de simulation suppose inévitablement un niveau de résolution planimétrique élevé. Or Takken *et al.* (2001b), utilisent un MNT au pas de 5 m pour un territoire de 144 ha. Cette interrogation sous-tend un thème récurrent en géographie, traité lors de nombreux travaux : la notion d'échelle (Wood 1996 ; Winter, 1998 ; Puech, 2000). Quel niveau d'abstraction doit-on retenir pour que l'échelle de la modélisation numérique soit cohérente avec l'échelle du processus et des objets observés ? Puech (2000), Park *et al.* (2003) relèvent ainsi qu'il existe une forte dépendance d'échelle dans les analyses distribuées, notamment celles qui exploitent des modèles de données à mailles fixes. « Par exemple la pente change non seulement de valeur mais aussi de signification quand on change la résolution de calcul. Une forte dérive s'observe, mais on utilise toujours le même terme pente pour ce qui est mesuré, en résolution 20 m ou 1 km. » (Puech, 2000). Ces remarques de Puech s'appliquent notamment au modèle TCRP. Ainsi, on peut s'interroger sur la pertinence du lien entre des directions d'écoulements estimées à partir d'un MNT au pas de 5 m et des mesures terrain réalisées au GPS différentiel qui servent d'ailleurs de données de validation. Le passage de l'un à l'autre implique forcément une approximation. Certes en matière de modélisation la perte d'informations est incompressible. Par conséquent, il s'agit de trouver le bon compromis entre les objectifs recherchés, la précision de la description des phénomènes, la capacité de mise en oeuvre et la lourdeur du modèle (Balayn, 2001).

Malgré tout, Takken *et al.*(2001b) soulignent que les directions d'écoulement sont correctement simulées dans 89,3 % des cas par rapport aux observations terrain.

2.2.2.2. Le modèle RIDEM (Duke et al., 2003)

Le Modèle RIDEM (*Rural Infrastructure Digital Elevation Model*) a été développé par Duke *et al.* (2003) afin de reproduire l'impact des aménagements linéaires (routes et fossés associés) sur l'organisation du parcours des écoulements de surface. Quatre grilles rasters sont nécessaires :

- un MNT,
- une grille de direction topographique des écoulements (algorithme D8),
- une grille d'accumulation,
- une grille localisant les routes,

Une grille localisant les buses peut être utilisée en option pour forcer le franchissement des routes.

La démarche de modélisation s'appuie sur l'identification de trois situations (figure 60):

- (a) La route sur-élevée bloque les écoulements du versant amont et induit des dépressions locales. L'écoulement en amont de la route est dirigé le long du profil longitudinal de la route selon la pente topographique et le volume d'eau qui s'y accumule.
- (b) Les fossés adjacents à la route canalisent les écoulements topographiques en amont de celle-ci ; en aval, ils récupèrent les eaux de la route et les eaux de pluies.
- (c) Les routes qui ont des profils plats, c'est-à-dire qui épousent la topographie, n'influencent pas les écoulements.

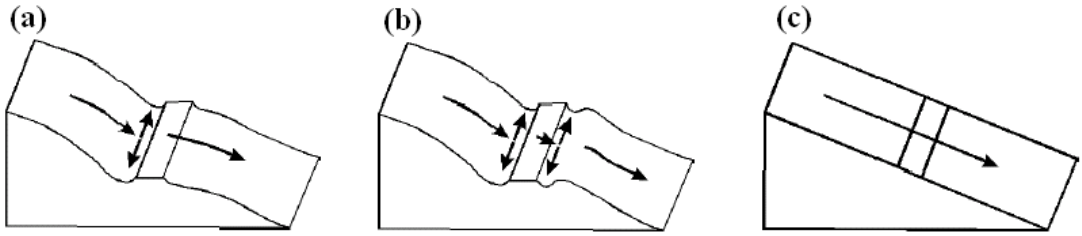


Figure 60. *Schématisation de l'effet du couple route-fossé sur les écoulements de surface (Source : Duke et al., 2003)*

Seules les situations (a) et (b) sont retenues dans le schéma de modélisation.

Pour reproduire le parcours de l'eau selon les situations observées, RIDEM utilise un algorithme baptisé REA (Road Enforcement Algorithm). Le fonctionnement de REA est décomposé en quatre étapes :

1. extraction du réseau de concentration du ruissellement,
2. assignation d'une direction d'écoulement aux pixels convergents,
3. réorganisation des directions dans le réseau de concentration du ruissellement,
4. suppression des artefacts (boucle sans fin).

Les deux premières étapes consistent à produire une matrice de direction continue dans laquelle les écoulements sont orientés le long des routes et les points de convergences identifiés. Seul les pixels dont la direction topographique d'écoulement est perturbée par la présence d'un pixel route sont réorientés. Ces pixels correspondent au réseau de concentration du ruissellement. Les artefacts artificiels induits lors de la procédure d'orientation des pixels « perturbés » (dépression, boucle sans fin) sont éliminés en utilisant des règles logiques ou en les remplaçant par les valeurs de la grille de direction topographique. Par exemple, pour un pixel convergent (dépression) caractérisé par un seul pixel entrant et un seul pixel sortant, la direction affectée à ce pixel sera celle du pixel sortant (figure 61).

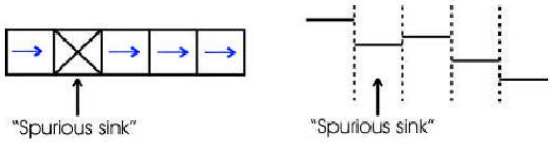


Figure 61. *Règle logique appliquée pour la suppression des pixels de dépression « unique » (Source : Duke et al., 2003)*

Les autres pixels convergents sont marqués comme des points où l'écoulement peut potentiellement déborder sur la route ou dans un champ. Ils sont définis comme des points de rupture. La rupture est simulée par REA lorsque la différence d'altitude entre les deux lignes de crête et le pixel convergent est supérieure à la hauteur de la route (figure 62 a). Si la différence d'altitude d'une seule ligne de crête est inférieure à la hauteur de la route, les directions d'écoulement sont alors inversées (figure 62 b).

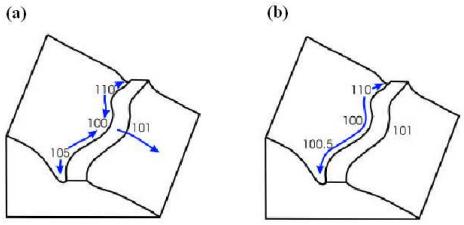


Figure 62. *Schématisation des conditions de rupture (Source : Duke et al., 2003)*

Ce procédé est reconduit itérativement pour tous les points de rupture potentiels jusqu'à ce qu'un débordement soit simulé (figure 63).

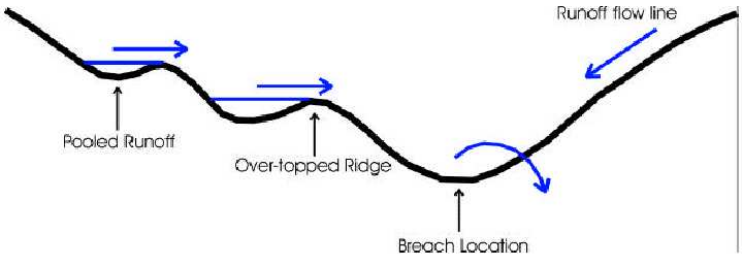


Figure 63. *Schématisation de la procédure de comblement des dépressions (Source : Duke et al., 2003)*

Une fois tous les débordements simulés, la qualité de la grille de direction modifiée est vérifiée une ultime fois. Les artefacts restant (boucle sans fin) sont supprimés

Contrairement au modèle TCRP, l'approche proposée par RIDEM a pour avantage de modéliser la dynamique de l'organisation des écoulements le long d'un obstacle. Dans TCRP, les écoulements sont modélisés essentiellement à partir d'une règle de décision qui utilise des

paramètres statiques (angle, direction du sens de travail du sol, rugosité…). Or l'effet d'un obstacle sur le cheminement de l'eau est dépendant de la quantité d'eau qui arrive en amont et de sa capacité à la retenir ou la rediriger. Lorsque le volume devient trop important, des ruptures se produisent, frayant ainsi le passage de l'eau. RIDEM en intégrant le franchissement des routes permet de fixer avec plus de réalisme les conditions d'efficacité de celle-ci. Les échanges entre le versant amont d'une route et son aval ne se produisent que lorsqu'un seuil critique de débordement est atteint. Le chaînage des écoulements entre les principaux talwegs est conservé, y compris lorsque la géométrie des routes est plus complexe (figure 64).

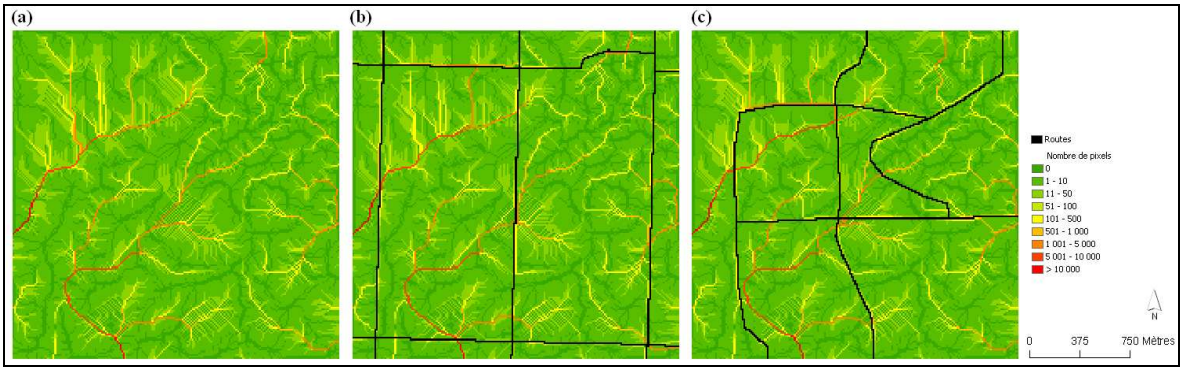


Figure 64. *Impact des routes sur les écoulements de surface (a) : grille d'accumulation topographique, (b) et (c) grilles d'accumulation calculées avec RIDEM.*

(Source : Jeux de données exemples fournis par RIDEM (a et b) et modifiés (c))

Toutefois, malgré ces résultats encourageants, la méthode proposée par RIDEM reste d'application limitée. RIDEM a été mis en œuvre pour simuler l'impact d'éléments dont la distribution spatiale et le maillage régulier, notamment sur le territoire concerné (grande plaine du sud d'Alberta) est relativement faible, comparé par exemple à des territoires bocagers où l'on trouve une multitude de routes secondaires et de chemins. Or ce sont précisément ces deux critères, densité et géométrie, qui rendent délicate la modélisation d'un arbre de drainage. Plus les formes dessinées par les éléments introduits dans le modèle sont nombreuses et plus le nombre de cas particuliers à traiter est élevé. Takken *et al.* (2001b) proposent ainsi d'améliorer la prédiction du parcours des écoulements de surface avec TCRP en prenant en compte les superficies drainées par les pixels, calculées à partir de la topographie et celles modifiées par le sens du travail du sol. Cependant, au regard des résultats obtenus et face à la complexité du modèle, Takken *et al.*(2001b) choisissent de ne pas l'exploiter. Les temps de calcul sont considérablement augmentés et le compromis entre complexité du modèle et précision des résultats ne constitue pas un argument suffisant pour la généralisation de la méthode.

2.2.2.3. Le modèle TORTRAT (Tortrat et al, 2004)

Tortrat *et al.* (2004) proposent une méthode originale pour spatialiser et comprendre l'influence des aménagements et des pratiques agricoles sur les transferts de l'eau et des pesticides par ruissellement. L'approche repose sur le calcul d'un arbre de drainage simplifié où les échanges d'une parcelle à l'autre sont représentés par la connexion de différentes surfaces contributives (figure 65). Cet arbre que les auteurs nomment arbre de parcelle est utilisé parce qu'il permet :

- d'identifier et visualiser les contributions des parcelles entre elles par le biais de leur exutoire,
- de s'affranchir de l'handicap de la résolution raster qui alourdit les temps de traitement notamment lorsque l'on extrapole le modèle à des territoires plus grands (1 à 50 Km²).

L'arbre de drainage « parcelle » est construit par agrégation des aires contributives situées à l'intérieur de chaque parcelle. Une aire contributive est qualifiée en fonction de son exutoire et de son emprise spatiale. Par exemple, un exutoire dont toute l'aire contributive est comprise dans la parcelle où il se trouve est représenté en bleu foncé et son aire d'alimentation en bleu clair (figure 65). Les auteurs aboutissent à un marquage des pixels des parcelles selon cinq situations (tableau 12, figure 65).

Type d'exutoire	Type de surface contributive	Description
Bleu	Bleu foncé	Maille sortante dont toute l'aire drainée est comprise dans la parcelle où elle se trouve
	Bleu	Maille dont toute l'aire drainée est comprise dans la parcelle où elle se trouve
Vert	Vert foncé	Maille sortante dont la surface contributive est en partie alimentée par des eaux de ruissellement venant de parcelles plus en amont
	Vert	Maille dont la surface contributive est en partie alimentée par des eaux de ruissellement venant de parcelles plus en amont
	Jaune	Maille alimentant une surface contributive verte mais dont l'aire drainée est comprise dans la parcelle où elle se trouve

Tableau 12. *Typologie des exutoires et des aires contributives (Source : Tortrat et al., 2004)*

Les aires contributives sont calculées à partir d'une grille de direction des écoulements modifiée (arbre de drainage contraint). En dehors du MNT raster, six couches d'information géographique vectorielles sont utilisées pour créer cette dernière (tableau 13).

Couche géographique	Modèle de données	Géométrie	Contenu
MNT	raster	pixel	Echantillon de valeur d'altitude en format double.
Parcelles culturales	vecteur	polygone	Couche représentant les types d'occupation du sol. Un champ dans la table attributaire de la couche définit en degré le sens de travail du sol.
Fourrière	vecteur	polyligne	Couche représentant les fourrières. Elles doivent être situées sur les limites des parcelles culturales.
Réseau bocager	vecteur	polyligne	Couche représentant les haies et talus. Ils doivent être situés sur les limites des parcelles culturales.
Réseau de fossés	vecteur	polygone	Couche localisant les fossés. Un fossé ne peut avoir qu'un seul exutoire.
Exutoire des fossés	vecteur	point	Couche localisant les exutoires des fossés.
Réseau hydrographique	vecteur	polyligne	Couche représentant le réseau hydrographique ici relevé sur le scan 25.

Tableau 13. *Données géographiques utilisées pour produire la grille de direction des écoulements modifiée selon la méthode Tortrat (Source : Tortrat et al., 2004)*

Contrairement à TCRP dont les données sont supposées déjà disponibles en format raster, ici la démarche nécessite une phase de transformation de géométrie. Pour limiter les conflits d'appropriation des pixels et de voisinage, les auteurs imposent l'utilisation de règles de priorité lors de la rasterisation. Ainsi, un type rivière est prioritaire sur un type fossé qui est lui-même prioritaire sur un type parcelle. De la même façon un type haie est prioritaire sur un type fourrière. A l'issu de la rasterisation, chaque maille du MNT porte un ou plusieurs attributs (n°de parcelle, type réseau hydrographique, type fossé). Les attributs des mailles servent ensuite de support pour affecter les directions.

Trois traitements spatiaux sont réalisés :

1. L'arbre de drainage est corrigé sous la contrainte du réseau hydrographique et des fossés. Pour chaque maille rivière et fossé, les directions d'écoulement sont forcées jusqu'à leur exutoire. De plus, les mailles adjacentes sont modifiées afin que leurs directions d'écoulement soient identiques à la direction d'écoulement naturel de la maille rivière ou fossé vers son exutoire (Aurousseau *et al.*, 1996).
2. Les directions d'écoulement des mailles parcelles sont déterminées à partir de la fonction discriminante proposée par Souchère *et al.* (1998).
3. Pour les mailles « bord de parcelles », qui qualifient une fourrière, la direction est affectée en utilisant la fonction discriminante (2). Le sens de travail du sol retenu est la direction de la fourrière parallèlement au bord de la parcelle. Pour les mailles

qui qualifient une haie ou un talus, les directions sont calculées en prenant en compte la pente descendante de la maille haie et son coté (figure 65).

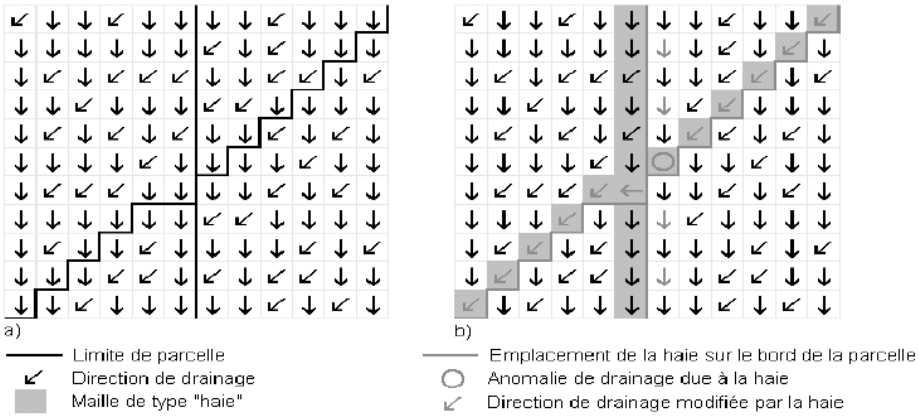


Figure 65. *Modification du réseau de drainage par les haies (Source : Tortrat et al., 2004)*

Ce dernier traitement requiert une attention particulière. La haie ici n'est pas représentée explicitement par son emprise au sol, mais c'est son impact qui est matérialisé en s'appuyant sur les bords de mailles haies qui sont aussi des bords de parcelles (figure 65). « Les haies sont assimilées en partie à un microrelief redirigeant l'eau et en partie à une surface pouvant ruisseler » (Tortrat *et al*., 2004). L'intérêt de cette technique est d'éviter les contraintes d'une représentation raster des haies qui entraîne un déplacement du calcul de l'arbre de drainage. De plus, cette méthode est bien adaptée pour des modélisations qui utilisent des MNT avec une faible résolution spatiale comme c'est le cas pour le territoire sur lequel Tortrat *et al.* (2004) ont testé ce modèle (Bassin du Frémur avec un MNT au pas de 20 m). Ces démarches sont intéressantes en terme de réflexion théorique mais leur caractère opérationnel reste confronté à un problème d'échelle. Comme accepter la représentation par un carré de 20 m d'un fossé qui le plus souvent ne fait pas plus de 1,5 m sur le terrain ?

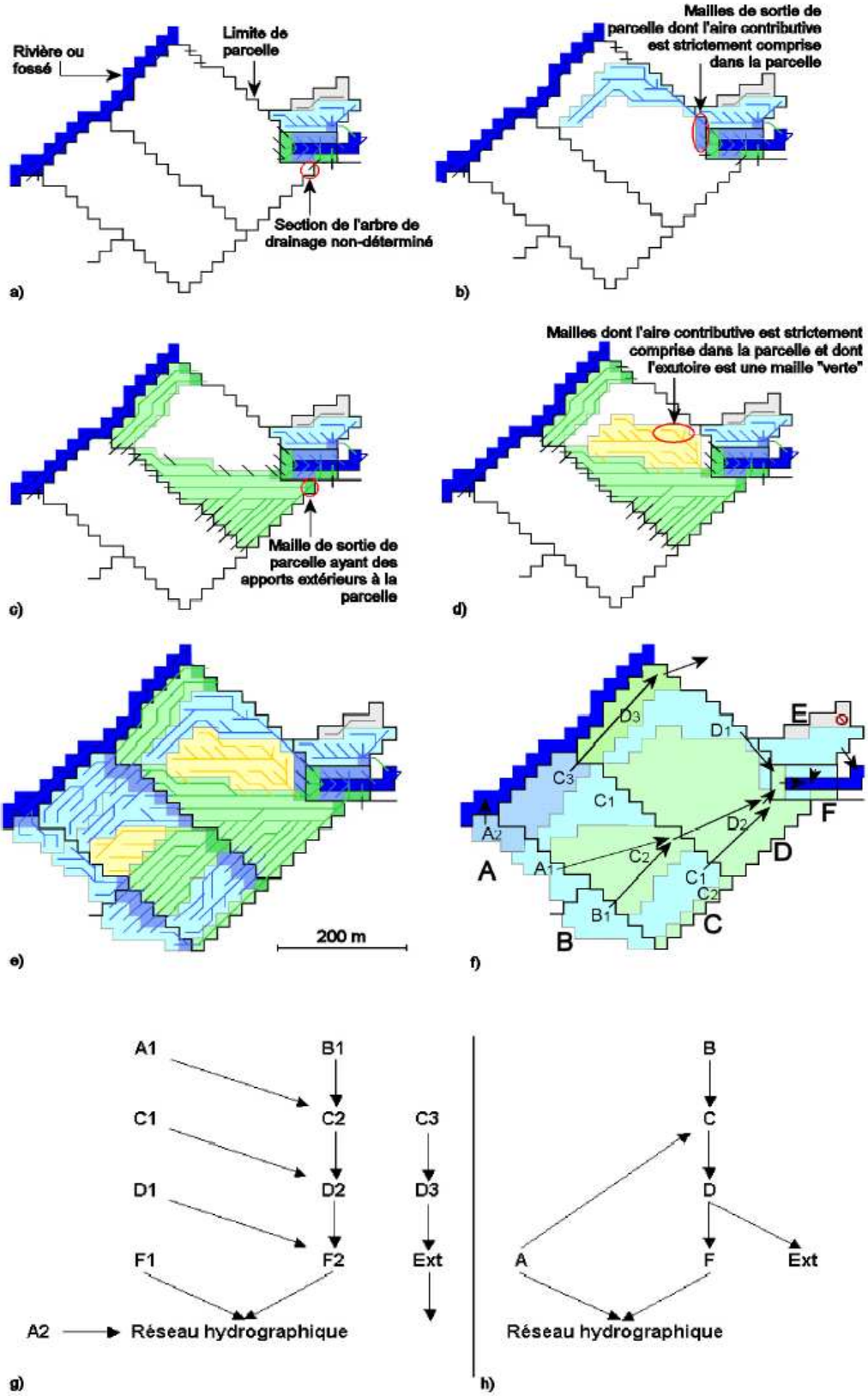


Figure 66. *Etapes de production d'un arbre de drainage « parcelle »*

(Source : Tortrat et al., 2004)

Conclusion du chapitre 3

Cette synthèse des méthodes de calcul d'un arbre de drainage à partir d'un Modèle Numérique de Terrain montre combien il est difficile de modéliser spatialement le parcours de l'eau de surface, notamment des que l'on prend en compte plusieurs composantes de la matrice territoriale. L'intégration de données exogènes à la topographie telles que les routes ou bien le sens de travail du sol nécessite d'adapter les méthodes classiques de calcul des directions d'écoulements et de procéder à des ajustements sous peine d'obtenir un arbre de drainage erroné. Ces adaptations débouchent sur des traitements spatiaux avec des niveaux de sophistication très importants. Cependant, cette sophistication est discutable. En effet, la majeure partie des modèles actuels utilisent un modèle de données à maille régulière pour simuler les directions d'écoulements, or plusieurs auteurs ont souligné qu'il ne peut pas exister de représentation acceptable des écoulements à partir de ces structures. Le plan de modélisation est une surface implicite qui n'a pas d'interprétation géométrique (Rognan *et al.*, 1998). De plus, l'utilisation du raster entraîne une approximation dans la représentation spatiale des objets. Il est délicat de maintenir une cohérence géométrique entre l'objet observé et sa traduction numérique à moins de travailler avec une haute résolution planimétrique. La donnée est indubitablement simplifiée. Cette simplification de l'information est d'ailleurs parfois rendue nécessaire pour exploiter les modèles qui intègrent des données géographiques de sources variées. C'est le cas par exemple de la méthode proposée par Mérot *et al.* (1999) qui applique une procédure morphologique afin de limiter le nombre de pixels occupés par une haie. Malgré ces limitations, le modèle raster est indéniablement le format le plus utilisé.

Nos recherches bibliographiques ne nous ont pas permis de mettre en avant des expériences de calcul d'un arbre de drainage contraint par des obstacles de sur-sol avec un TIN. Pourtant, le TIN semble une structure beaucoup plus adaptée pour modéliser de façon réaliste le parcours des écoulements de surface :

- d'une part car les directions de pente sont calculées à partir d'un véritable plan topographique (3 points),
- d'autre part car les primitives graphiques qui composent le TIN (nœud, arc, face) permettent de bien individualiser la morphologie du terrain,
- enfin le TIN peut être affiné pour assimiler des données extérieures à la topographie. Cette dernière propriété en fait une structure très exploitée pour modéliser des environnements aux géométries complexes (Greene et Cruise, 1995).

On peut ainsi citer des applications :

- dans la modélisation de la propagation des ondes acoustiques (projet ONDES : http://www-rocq.inria.fr/ondes/index.php),
- dans la conception de systèmes et technologie mécanique par exemple simulation de l'aérodynamique des ailes d'avion (http://www.onera.fr/),
- dans la modélisation de nappe de pétrole (Institut Français du Pétrole http://www.ifp.fr/IFP/fr/fa.htm).

Pour ces avantages et parce que l'objectif de notre recherche est d'intégrer plusieurs éléments de l'organisation du territoire dans le calcul d'un arbre de drainage, nous avons décidé de modéliser spatialement les écoulements de surface à partir d'un MNT triangulaire. Nous avons notamment comme objectif de mettre à profit les capacités d'adaptation de la structure géométrique (multi-résolution) aux spécificités des paysages bocagers ou les linéaires de talus mais aussi de voirie (chemins creux) subsistent en quantité très variable, dessinant des configurations géométriques complexes. L'arbre de drainage devra prendre en compte les interactions qui s'établissent entre les éléments de ce type de territoire et servira de support pour dériver des variables spatialisées ou statistiques.

Chapitre 4. L'organisation des écoulements de surface sur un bassin versant bocager : de l'observation à la conceptualisation

Ce chapitre a pour objectif de préciser à partir d'observations in-situ l'organisation des écoulements de surface et leurs conséquences dans un bassin versant bocager. Nous entendons, à partir d'un territoire expérimental, identifier et décrire les interactions spatiales qui s'opèrent entre la topographie naturelle et les activités humaines. De ces observations découlera le choix d'une démarche de modélisation.

L'échelle d'étude est la totalité du sous-bassin versant du Sterenn (1 500 ha), situé au nord-ouest du département des Côtes-d'Armor dans le Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien (figure 67).

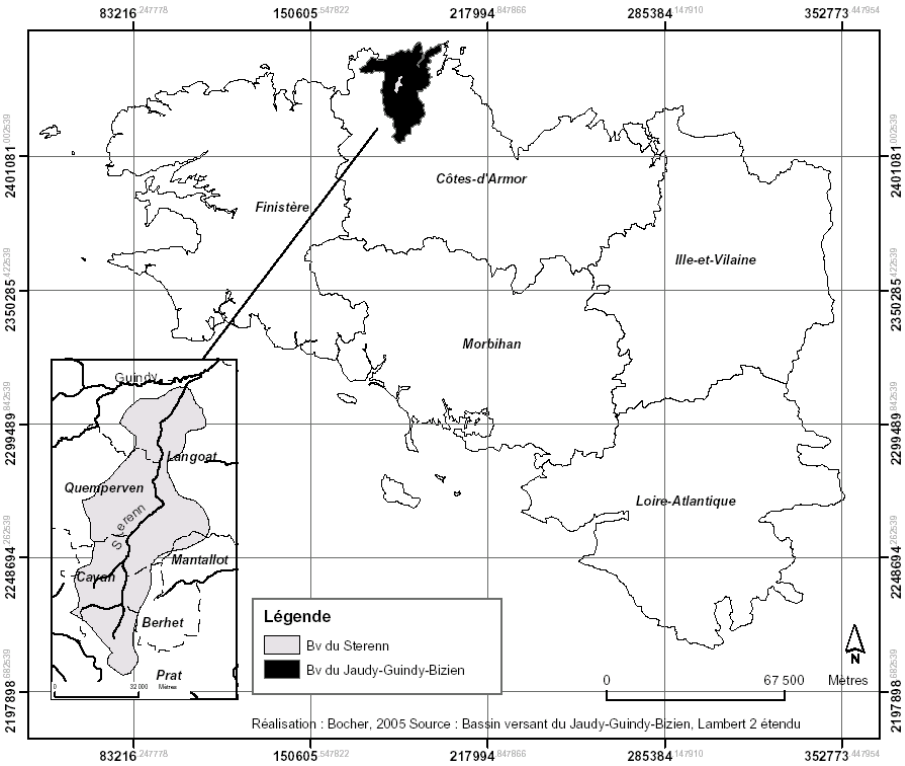


Figure 67. *Localisation du sous-bassin versant du Sterenn*

1. Présentation du site d'étude

Le sous-bassin versant du Sterenn a été retenu comme site d'étude pour la diversité de situations paysagères qu'il offre, son caractère agricole marqué et les conditions pédologiques qui permettent d'y observer des phénomènes de ruissellement.

1.1. Le Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien

Le territoire du Sterenn fait partie intégrante de l'opération de reconquête de la qualité de l'eau du Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien. Cette opération a été engagée en 1999 avec l'aide du Conseil Général des Côtes-d'Armor dans le cadre du programme « Bassin versant d'Alimentation en Eau Potable » (BV AEP) suite à l'augmentation des concentrations en nitrate sur les prises d'eau destinées à la consommation humaine. En 2004, la totalité du BV du Jaudy-Guindy-Bizien intègre le programme régional BEP 3.

1.1.1. Les enjeux de la qualité de l'eau

L'une des particularités majeures du Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien réside dans le fait que l'alimentation en eau potable de ses communes (52 communes au total) provient pour moitié de trois prises d'eau superficielles et pour moitié de huit captages souterrains (annexe 2). L'ensemble des bassins d'alimentation en eau potable (amont des prises d'eau superficielles et aires d'alimentation des nappes souterraines) représente une superficie de 22 000 hectares. Au total 4 millions de mètres cubes sont prélevés annuellement pour alimenter environ 50 000 habitants. L'exploitation est réalisée par 7 syndicats.

Depuis le milieu des années 1980, la qualité de l'eau au niveau des prises d'eau potable mais aussi dans les cours d'eau n'a cessé de se dégrader. La situation de la ressource sur le Jaudy-Guindy-Bizien nécessite l'adaptation des moyens de production pour la distribution d'une eau de consommation aux normes. Dès lors, les enjeux économiques sont importants. La filière pour le traitement de l'eau est coûteuse. Elle constitue une part importante des budgets des collectivités qui ne cesse de croître avec l'évolution des concentrations et du nombre de matières actives qui impose d'améliorer continuellement les procédés de traitement. Les traitements de base tels que l'ozonation ne sont plus suffisants. En 2004, le Syndicat Intercommunal d'Adduction d'Eau du Trégor (SIAET) s'est ainsi équipé d'un filtre à charbon

actif pour éliminer notamment les produits phytosanitaires. Le coût de cet équipement s'élève à 1 000 000 d'Euros.

Trois polluants sont particulièrement suivis : le nitrate, les triazines et l'isoproturon.

Le nitrate :

Les concentrations en nitrate au niveau des prises d'eau potable ont augmenté jusqu'au milieu des années 1990 où elles se sont stabilisées autour de la valeur seuil des 50 mg/l. Sur la prise d'eau du Guindy à Plouguiel, le suivi réalisé par la DDASS depuis 1984 montre que la valeur moyenne de 37 mg/l en 1984 est passée à 56 mg/l en 1999. Depuis 1994, la concentration maximale observée n'est jamais descendue au-dessous des 50 mg/l. Dans les cours d'eau du bassin versant, les suivis sont beaucoup plus récents et ne permettent pas d'avoir un historique suffisant pour retracer leur évolution. Cependant, les cartes des concentrations en nitrate construites à partir de la méthode SEQ-EAU (annexe 1) pour les années 2000 et 2003 permettent de se faire une idée de la situation récente (figure 68). Globalement, l'eau est de qualité médiocre avec un gradient sud-nord très net. De 2000 à 2003 celle-ci a peu évolué. Les cours d'eau les plus touchés sont les rivières côtieres : Lizildry, Sterenn et Trépas. Certains ruisseaux côtiers à l'est du Jaudy ont atteint ponctuellement des valeurs de 100 mg/l.

La présence de triazines et de l'isoproturon a été détectée à partir du début des années 1990 par les services de la DDASS au niveau des prises d'eau. Depuis 2000, ces matières actives font l'objet d'un suivi dans les cours d'eau du Bassin versant selon la méthode ELISA (Gillet *et al*, 2002). Le peu d'années de référence conduit comme dans le cas du nitrate à être prudent sur l'analyse des tendances observées.

Les triazines :

En 2000, on observe de très fortes concentrations en triazines, jusqu'à 38 fois la norme autorisée sur le cours d'eau du Donant et de fréquents dépassements de celle-ci, jusqu'à 10 dépassements sur 12 prélèvements (figure 69). Cependant, entre 2000 et 2003 le nombre de dépassements a baissé: 50 % des mesures sont au-dessus de la norme en 2000 contre 13 % en 2003. Néanmoins, certains cours d'eau continuent de connaître des pics importants, c'est le cas du Sterenn jusqu'à 10 fois la norme ou encore du Donant jusqu'à 23 fois (figure 69).

L'isoproturon :

Pour l'isoproturon, on trouve également des teneurs maximales extrêmes (jusqu'à 170 fois la norme en 2001) :

- En 2000, un maximum de quatre dépassements sur 12 prélèvements,
- En 2001, un maximum de quatre dépassements mais sur 8 prélèvements.

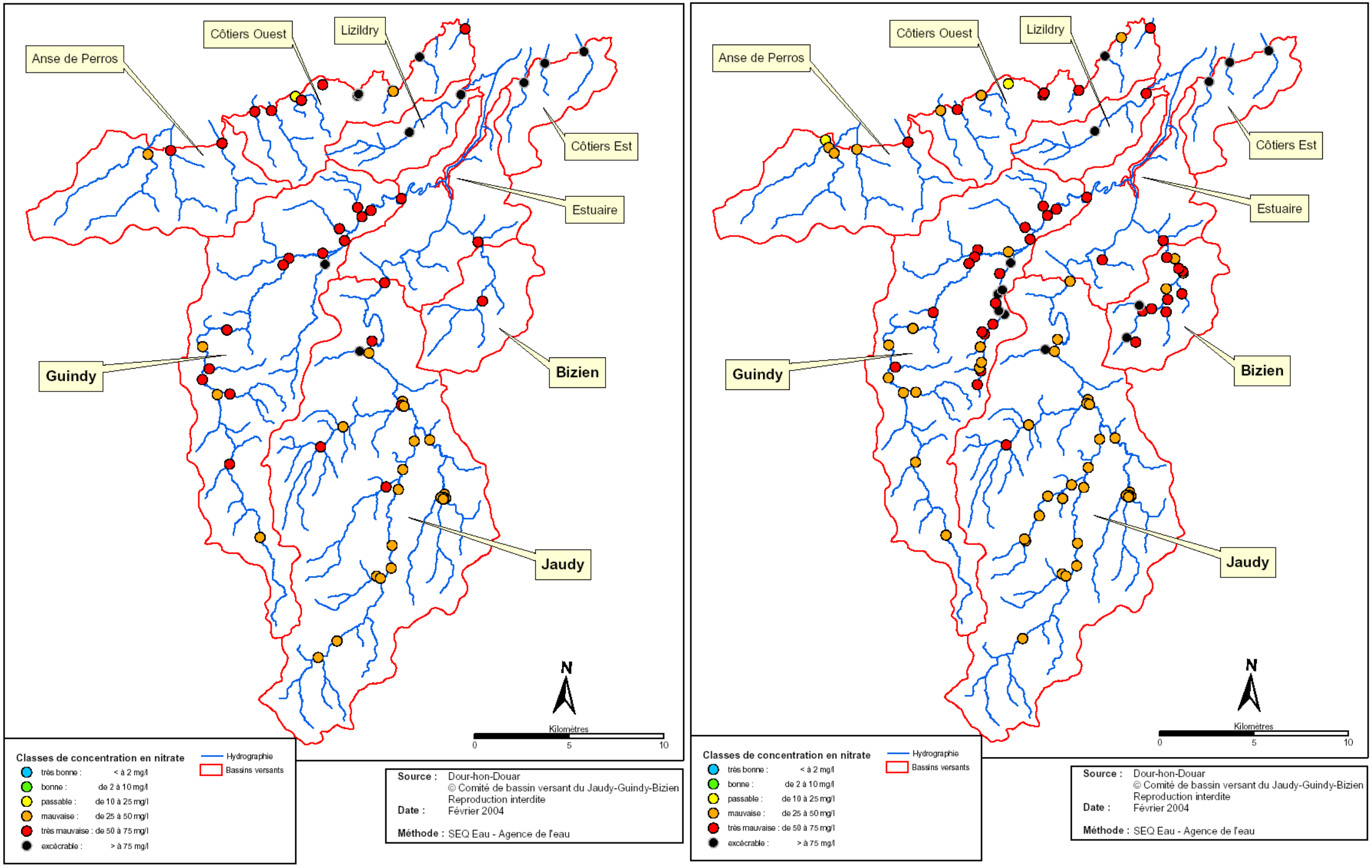


Figure 68. *Concentration en nitrate des cours d'eau du Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien.*

Carte de gauche : données du 24/01/2000 au 13/12/2000 ; carte de droite : données du 01/01/2003 au 31/12/2003

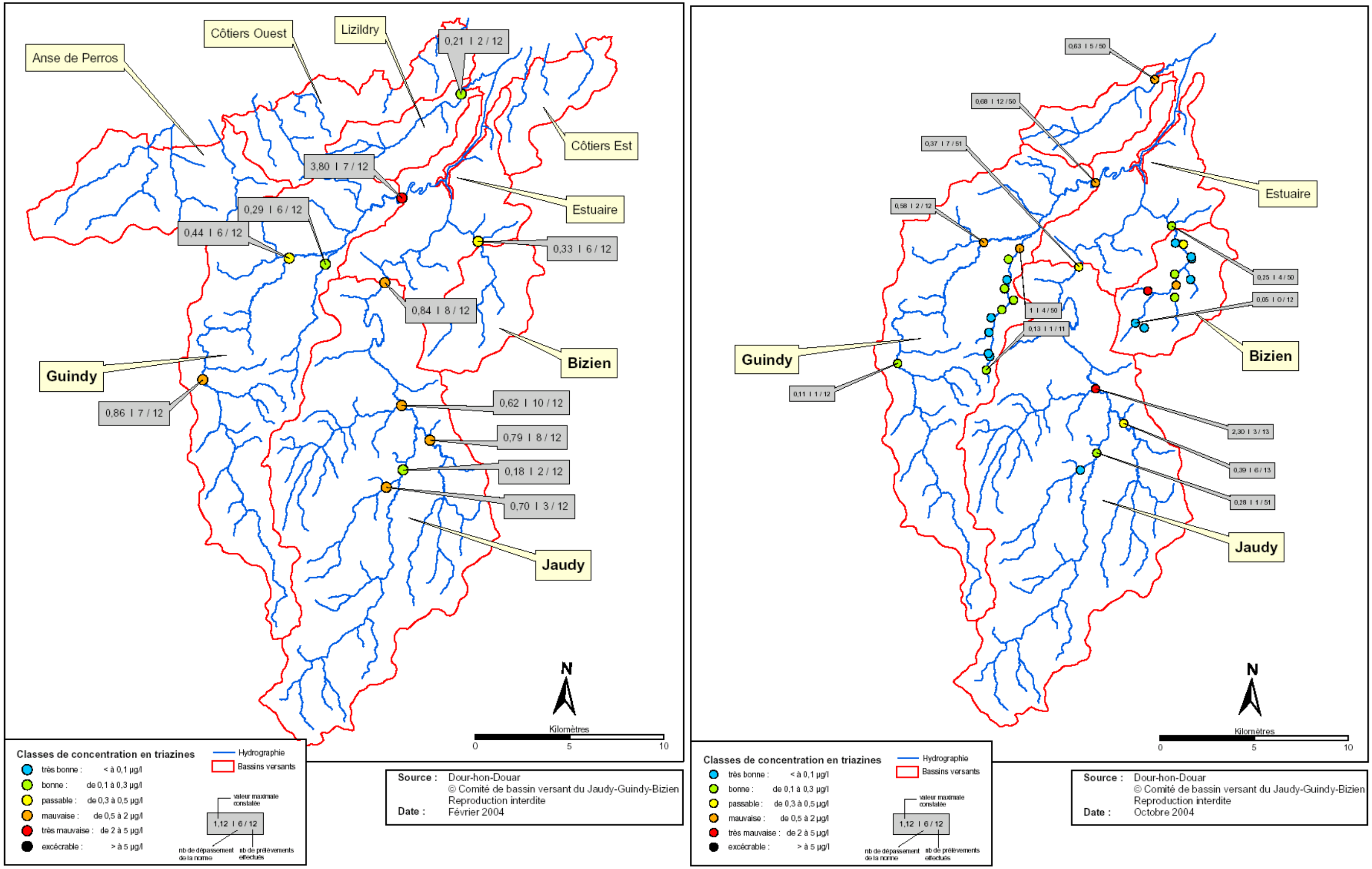


Figure 69. *Concentration en triazines des cours d'eau du Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien.*

Carte de gauche : données du 01/01/2000 au 31/12/2000 au 13/12/2000 ; carte de droite : données du 01/01/2003 au 31/12/2003

1.1.2. Situation climatique

Le Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien est caractérisé par un climat de type océanique. Les températures annuelles sont douces et les variations saisonnières peu contrastées. Au nord, la pluviométrie annuelle est relativement faible (750 mm) pour une température moyenne de 11,7 °C, alors qu'en amont, la pluviométrie se rapproche de 1 050 mm pour une température de 10,6 °C. Les précipitations sont réparties régulièrement au cours de l'année avec un maximum en automne[33].

1.1.3. Un territoire fortement agricole

Le bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien s'étend sur superficie de 52 000 ha. Il comprend les cours d'eau du Jaudy, du Guindy, du Bizien ainsi que les ruisseaux côtiers (annexe 3). La Surface Agricole Utile (SAU) représente approximativement 35 000 ha soit près de 70 % de sa surface totale. En 2000, cette dernière regroupait 900 exploitations dont 778 élevages (Loudec, 2000).

Trois grandes zones de productions agricoles sont présentes (figure 70) :

- **Au sud, en amont des bassins versants du Jaudy et du Guindy**, une zone d'élevage à dominante laitière dont le sol est principalement consacré aux prairies,
- **Au centre du bassin versant**, moitié aval des bassins versants du Jaudy et du Guindy, moitié amont du bassin du Bizien, une zone d'élevage à dominante hors-sol (élevage porcin), dans laquelle le maïs et les céréales sont les cultures majoritaires,
- **Au nord, sur le littoral et le long de l'estuaire**, une zone agricole à dominante légumière, où l'on trouve essentiellement du chou-fleur, de l'artichaut, des haricots et de la pomme de terre.

En 2000, sur l'ensemble du bassin versant, le maïs et les céréales représentaient respectivement 28 % et 25 % de la SAU. Les prairies ne représentaient que 31 % de la SAU contre 41 % pour l'ensemble du département ; 90 % des prairies sont temporaires et seulement 10 % sont naturelles. Le nombre important d'élevages entraîne une production notable d'azote organique. Il a été estimé à 4 500 t d'azote par an en 2000. La production se répartit selon les proportions suivantes : bovins : 46 %, porcins : 35 %, volailles : 19 % (Loudec, 2000). Depuis

[33] Source : données pour la période 1970-2004 Météo-France.

l'arrêté préfectoral du 1er août 2002, 27 des 52 communes du Bassin versant sont classées en zone d'excèdent structurel (ZES, annexe 4). Concernant, les produits phytosanitaires, il est intéressant de mentionner ici les résultats d'une enquête réalisée par la Chambre d'Agriculture des Côtes-d'Armor sur la saison culturale 2000-2001. Cette enquête portait sur les pratiques phytosanitaires et les motivations des exploitants agricoles à minimiser les risques de pollution. Cent agriculteurs ont été interrogés. Deux points sont à retenir.

Au niveau de la gestion des produits :

- aucun agriculteur n'a d'aire spécifique de remplissage de cuve,
- 29 % des fonds de cuve sont déversés dans la cour de la ferme,
- 67 % des bidons sont brûlés.

Au niveau des molécules utilisées :

- Pour la campagne 2000-2001, 65 % des agriculteurs ont traité les parcelles et les bords de talus avec du glyphosate. En moyenne, ce sont 7 ha qui ont été traités par exploitation, principalement pour la destruction des prairies et des couverts végétaux,
- 83 % des surfaces cultivées en céréales ont été traités avec de l'isoproturon à une dose moyenne de 1 170 g/ha pour une dose homologuée maximale de 1800 g/ha.
- 92 % des surfaces cultivées en maïs sont traités avec de l'atrazine à une dose moyenne de 810 g/ha (dose maximale autorisée : 1 000 g/ha). Rappelons que ce produit est maintenant interdit par arrêté préfectoral depuis fin septembre 2003.

Les espaces non-cultivés correspondent aux zones urbaines et boisées. Excepté dans la partie sud avec l'agglomération de Bégard, les zones urbanisées sont surtout présentes sur la façade littorale. Les zones boisées sont localisées majoritairement en fond de vallée. Elles bordent notamment le cours d'eau du Jaudy et ses affluents dans la partie centrale du bassin versant. De petits bois sont distribués aléatoirement sur le reste du bassin versant.

1.1.4. Une répartition des cultures à relier avec les caractéristiques physiques

Les fortes pentes sont principalement localisées le long des principales rivières du Jaudy, du Guindy et du Bizien (figure 71).

Sur le Guindy, elles sont peu importantes, localisées à l'aval près de l'estuaire et sur une courte section où le cours d'eau se décroche vers l'est. Les pentes sont discrètes, cependant

la forte hydromorphie en fond de vallée réduit les secteurs cultivables. Les parcelles à proximité du cours d'eau sont occupées le plus souvent par des prairies permanentes (Saloum, 2003), exceptés pour les affluents où les pentes moins marquées permettent une mise en culture des parcelles en fond de vallée.

Sur le Jaudy, les fortes pentes longent la quasi-totalité du réseau hydrographique. Les fonds de vallées sont occupés majoritairement par des boisements et des prairies permanentes.

Sur le Bizien, les fortes pentes sont moins nombreuses, distribuées principalement sur la rive gauche. Toutefois, dans les fonds de vallée, l'hydromorphie très importante limite l'activité agricole. De nombreuses parcelles ont cependant été drainées pour permettre leur mise en culture.

1.1.5. Le linéaire bocager

Le linéaire bocager (talus et haie confondus), cartographié à partir de photographies aériennes, apparaît comme relativement dense et bien conservé (figure 72). Il totalise 4 565 km pour les Bassins du Jaudy, du Guindy et du Bizien, soit en terme de densité 118 m / ha. Cependant, ce constat doit être modéré car il existe de profondes disparités spatiales (Bocher, 2003). L'organisation du maillage bocager est caractérisée par une alternance d'espace tantôt clos et tantôt ouverts. Dans la partie centrale, le maillage est beaucoup plus lâche et présente de grandes ouvertures (figure 72, rond noir B en pointillés). Les densités de linéaire bocager sont proches de 90 m/ha. A l'opposé, à l'aval du bassin versant et dans la partie amont du Guindy, l'armature bocagère est plus dense et le territoire moins segmenté (figure 72, ronds noirs A et C en pointillés). Les densités de linéaire bocager avoisinent les 180 m/ha.

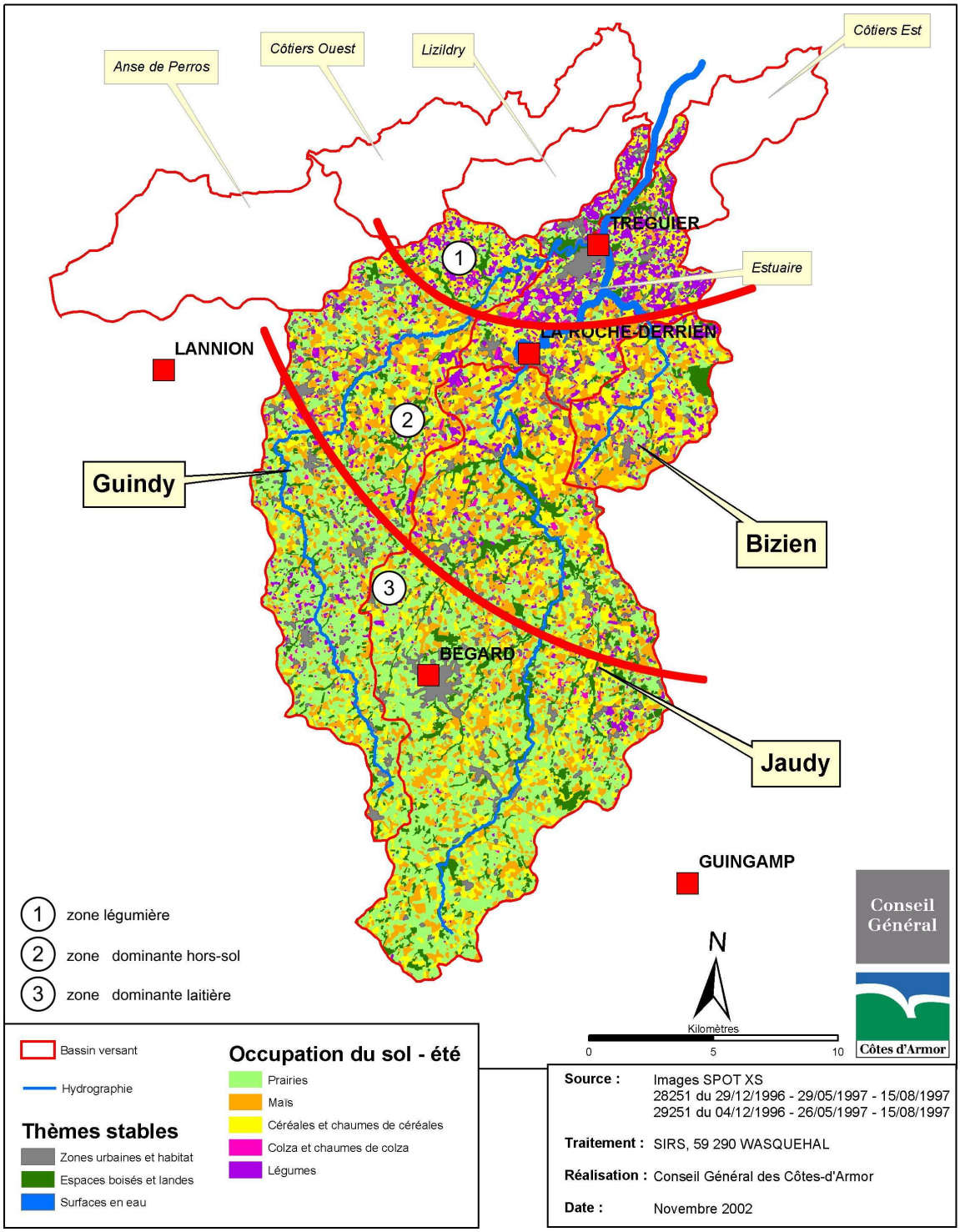


Figure 70. *Les grandes zones agricoles sur le Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien*

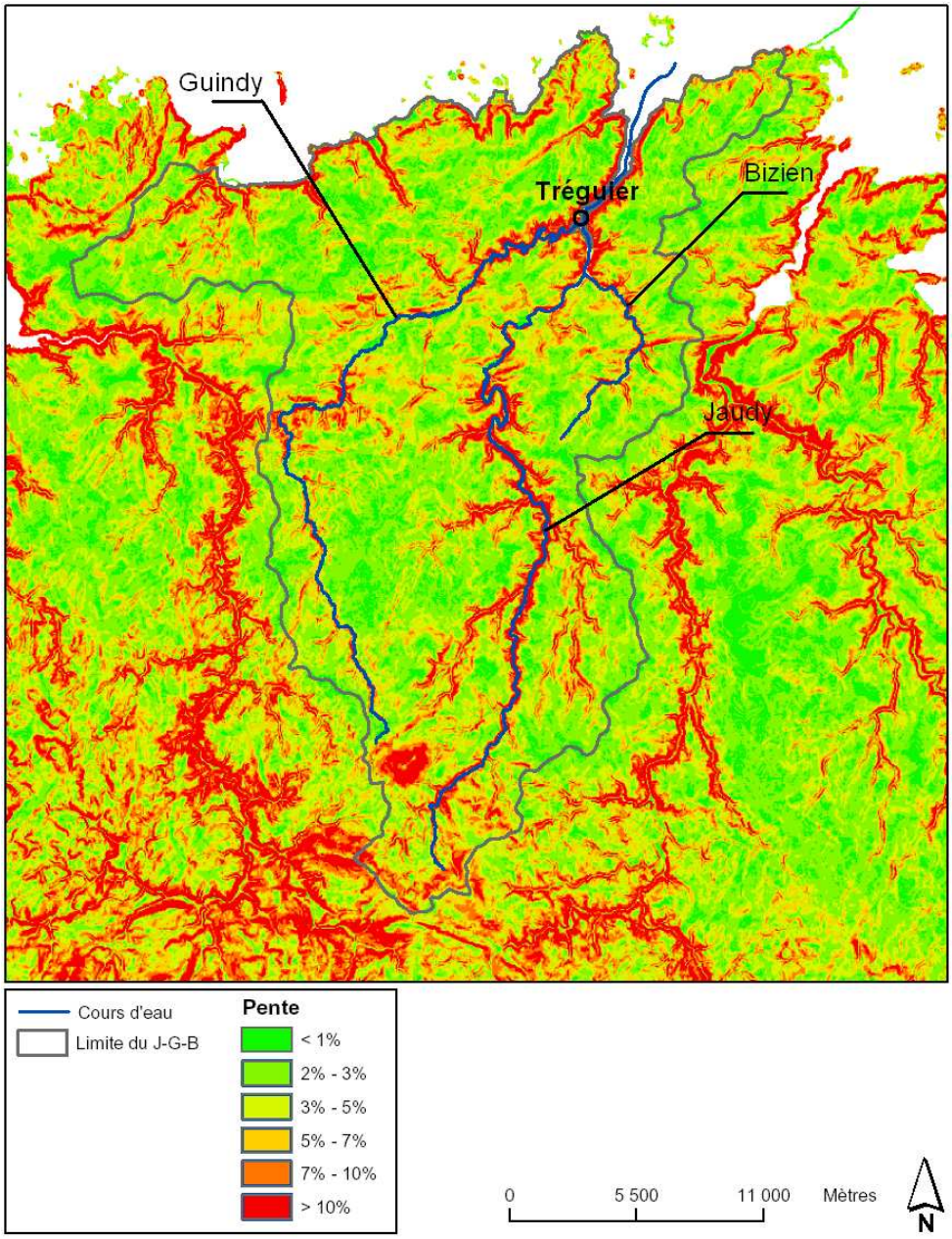


Figure 71. *Répartition des pentes sur le Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien (Source : BD Alti IGN)*

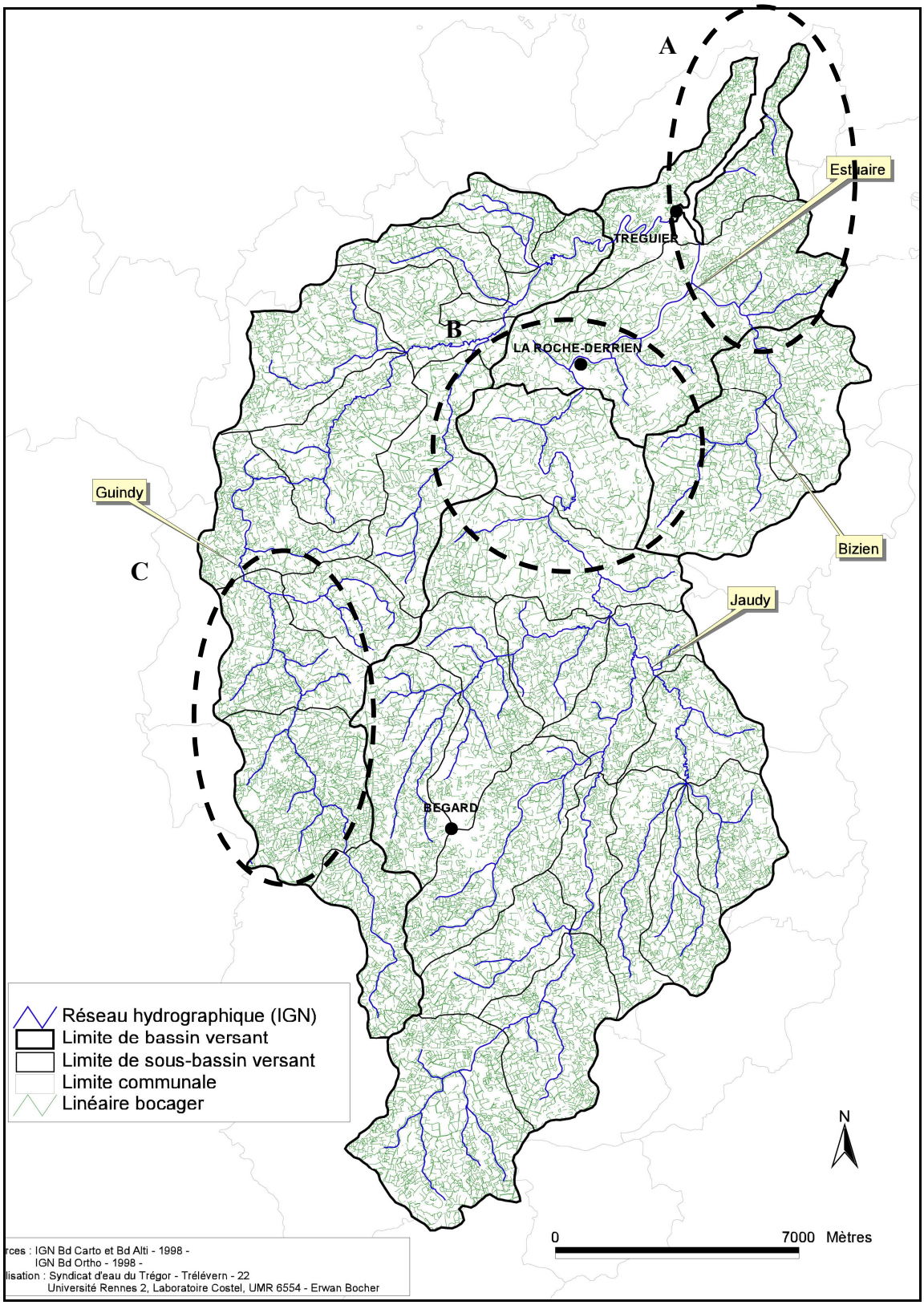


Figure 72. *Le linéaire bocager sur le Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien (Bocher, 2003)*

1.2. Le sous-bassin versant du Sterenn : un territoire agricole hétérogène

1.2.1. Une agriculture omniprésente

Le sous bassin versant du Sterenn s'étend sur une superficie de 1 500 ha, il englobe partiellement le territoire de six communes : Berhet, Cavan, Langoat, Mantallot, Prat et Quemperven. Seuls les bourgs de Confort et de Quemperven sont situés sur le sous-bassin versant. Le Sterenn est dominé à 80 % par l'agriculture. Les productions agricoles sont essentiellement tournées vers l'élevage. Le système d'assolement présente des pratiques relativement intensives, principalement sur la moitié nord du sous-bassin. Les productions végétales sont le maïs (30 %) et les céréales (30 %).

Le bassin se divise en deux grands ensembles agricoles (figure 73):

- la partie amont (1/3 sud) occupées par un système de production laitière avec une proportion importante de prairies (213 ha, soit 42 % de la SAU de ce secteur)
- la partie aval présentant un système agricole plus intensif, axé sur l'élevage hors-sol et la grande culture (céréales 38 % et maïs 32 % de la SAU).

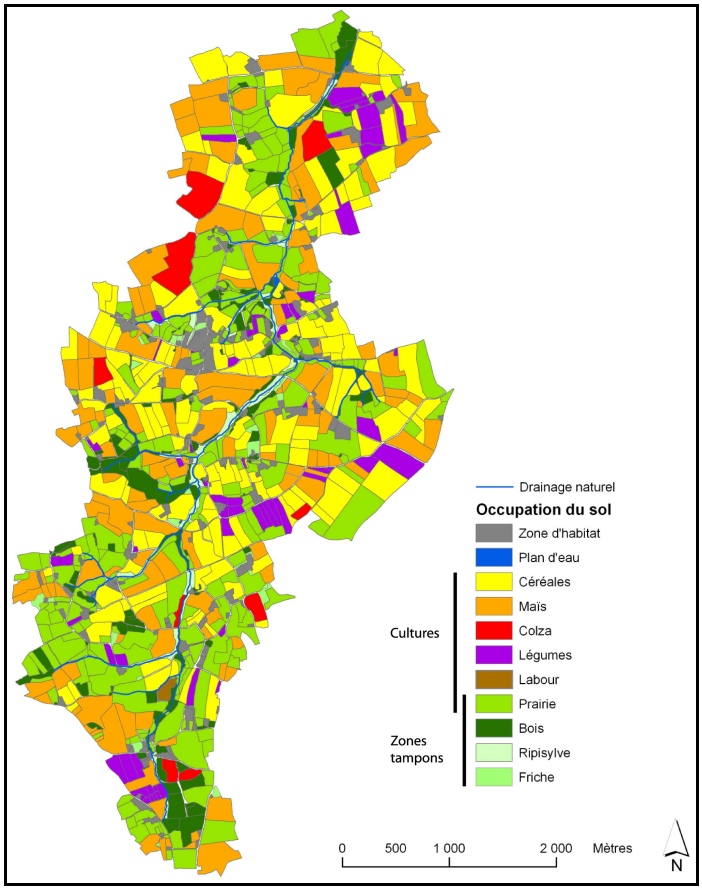


Figure 73. *Occupation du sol sur le sous-bassin versant du Sterenn : printemps-été 2000 (Bocher, 2005)*
(Source : Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien)

1.2.2. Une armature hydrographique dense et complexe

Le cours d'eau principal du Sterenn, alimenté par les eaux d'un chevelu dense de petits affluents, s'étire sur une longueur de 9 km et se jette dans le Guindy (figure 75). Le réseau hydrographique (25,2 km) est secondé par un réseau important de fossés (69,2 km), de chemins (17 km) et de routes (41 km), constituant une armature dense et complexe (tableau 14, figure 75). Cette armature représente une densité de 108 m/ha. Distribué de façon homogène, le réseau anthropique assure un drainage quasi systématique de la zone d'étude. Les cours d'eau sont régulièrement franchis par les routes et chemins facilitant les connexions avec les parcelles culturales. 147 franchissements ont ainsi été observés.

	Réseau hydrographique	**Réseau de drainage anthropique**		
		Fossé	**Route**	**Chemin**
Longueur (km)	25,2	69,2	41	17
% par rapport au total	16,5	45,4	26,9	11,2

Tableau 14. *Longueur des axes de circulation de l'eau*

Le réseau de voirie est constitué par de petites routes communales et chemin ruraux exiguës dont la largeur moyenne totale est d'environ 5 m. Elles sont la plupart du temps décaissées par rapport à la topographie locale ce qui facilite la concentration des eaux provenant des parcelles adjacentes (figure 74).

Figure 74. *A gauche, un chemin creux bordé de talus surmonté de haies, à droite une route communale bordée de talus surmontée d'une haie et de fossé enherbé*

(Bocher, 2003)

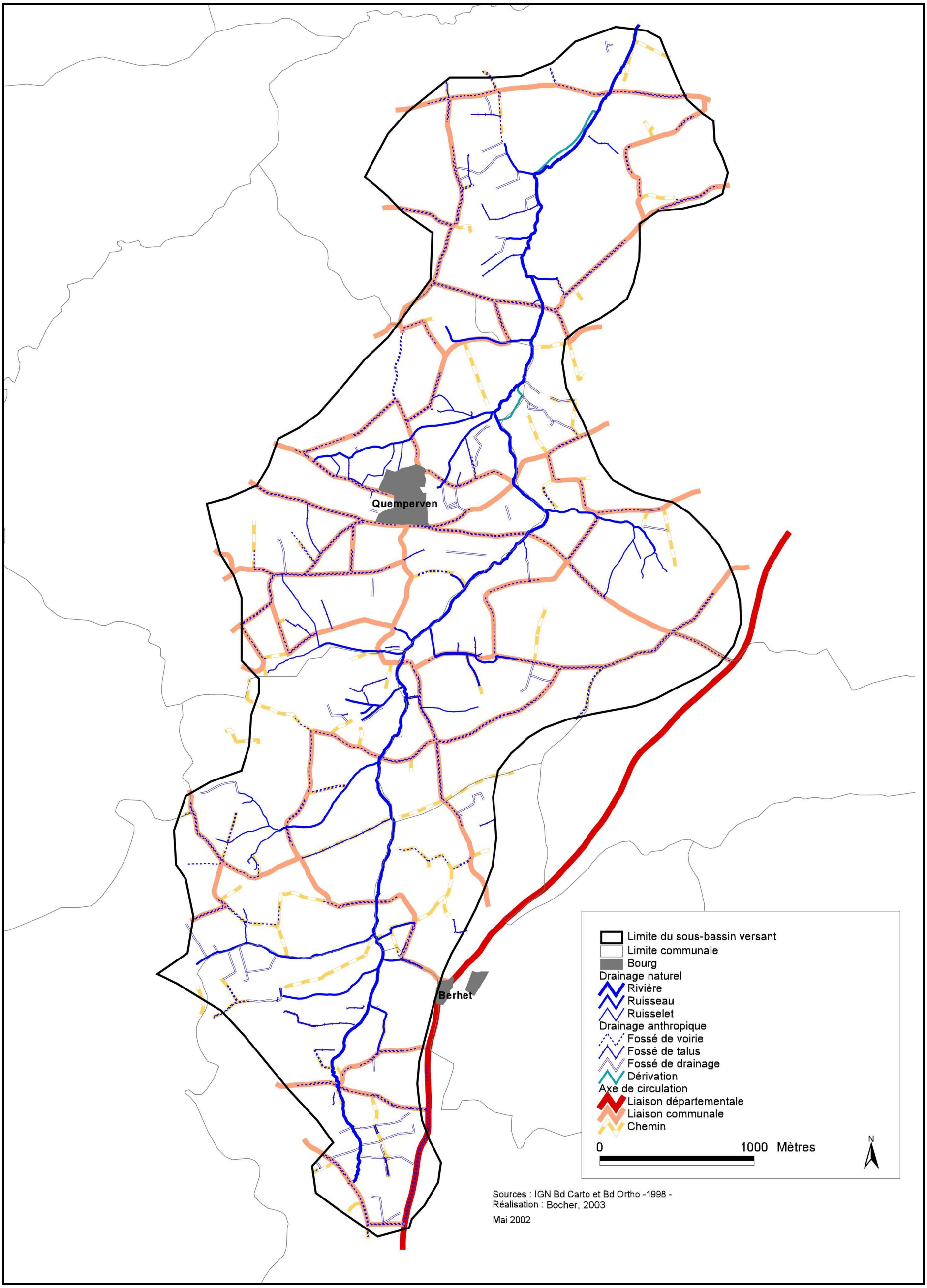


Figure 75. *Le réseau de drainage naturel et le réseau de drainage anthropique sur le sous-bassin versant du Sterenn*

1.2.3. Des structures paysagères hétérogènes

Le maillage bocager est essentiellement caractérisé par des talus (nus ou plantés) d'une hauteur moyenne de 1,3 m, pouvant parfois atteindre 2 m (figure 76, tableau 15).

Figure 76. *Un talus-nu ceinturant une prairie*
(Source : Bassin versant du J-G-B, 2003)

	Talus	Talus-haie	Haie	Total
Nombre d'entités	242	642	288	1172
Longueur (m)	21 804,2	61 797,4	24 902,1	108 504
% par rapport au total	20.1	57	23	100
Densité (m/ha)	15,6	44,1	17,8	77,5

Tableau 15. *Caractéristiques du bocage sur le sous-bassin versant du Sterenn (Bocher, 2003)*

Le linéaire bocager s'étire sur près de 109 km. Sa densité moyenne sur le bassin du Sterenn (haies et talus confondus) est relativement faible : 77,5 m/ha mais la répartition est irrégulière. Seul 1/3 des limites de parcelle est surmonté d'une haie ou d'un talus. Le linéaire de talus est discontinu, fragmenté en une multitude de réseaux élémentaires, 632 au total. Un réseau élémentaire est défini comme un ensemble de talus connexes. La longueur maximale d'un réseau élémentaire est de 1 205 m, la longueur minimale de 5 m et la longueur moyenne de 128 m. Plus de la moitié des réseaux élémentaires de talus possèdent une longueur inférieure à 100 m (figure 77). Le linéaire bocager (talus et haie) est entaillé par une multitude d'ouvertures (806 cf. figure 4-12) : anciennes entrées de champs (33), entrées de champs utilisées (510), brèches (363) qui constituent des points privilégiés pour l'évacuation des eaux de la parcelle, limitant leur rôle potentiel d'obstacle (figures 78, 79, 80 et 81).

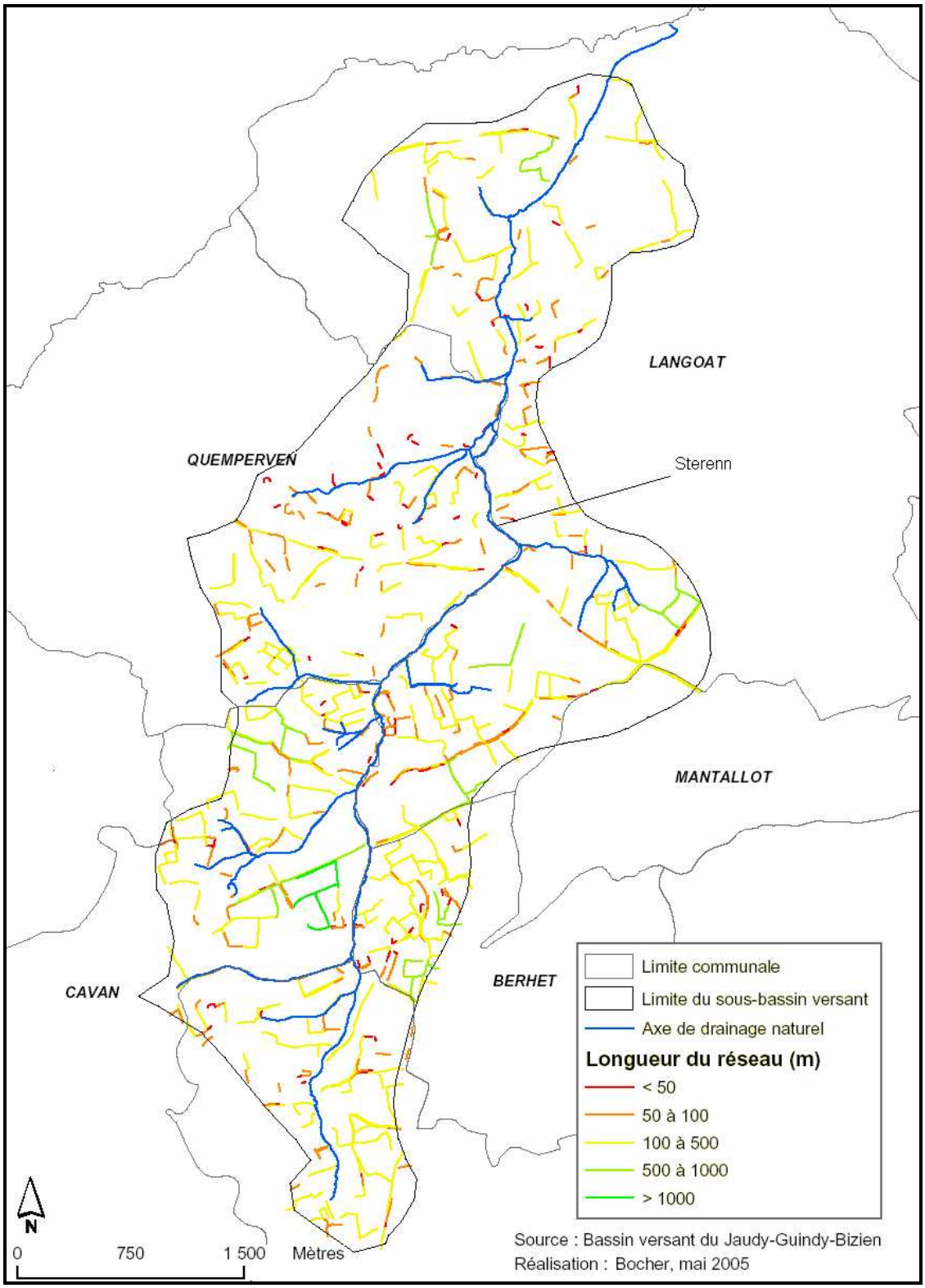


Figure 77. *Distribution spatiale des réseaux élémentaires de talus sur le sous-bassin versant du Sterenn*

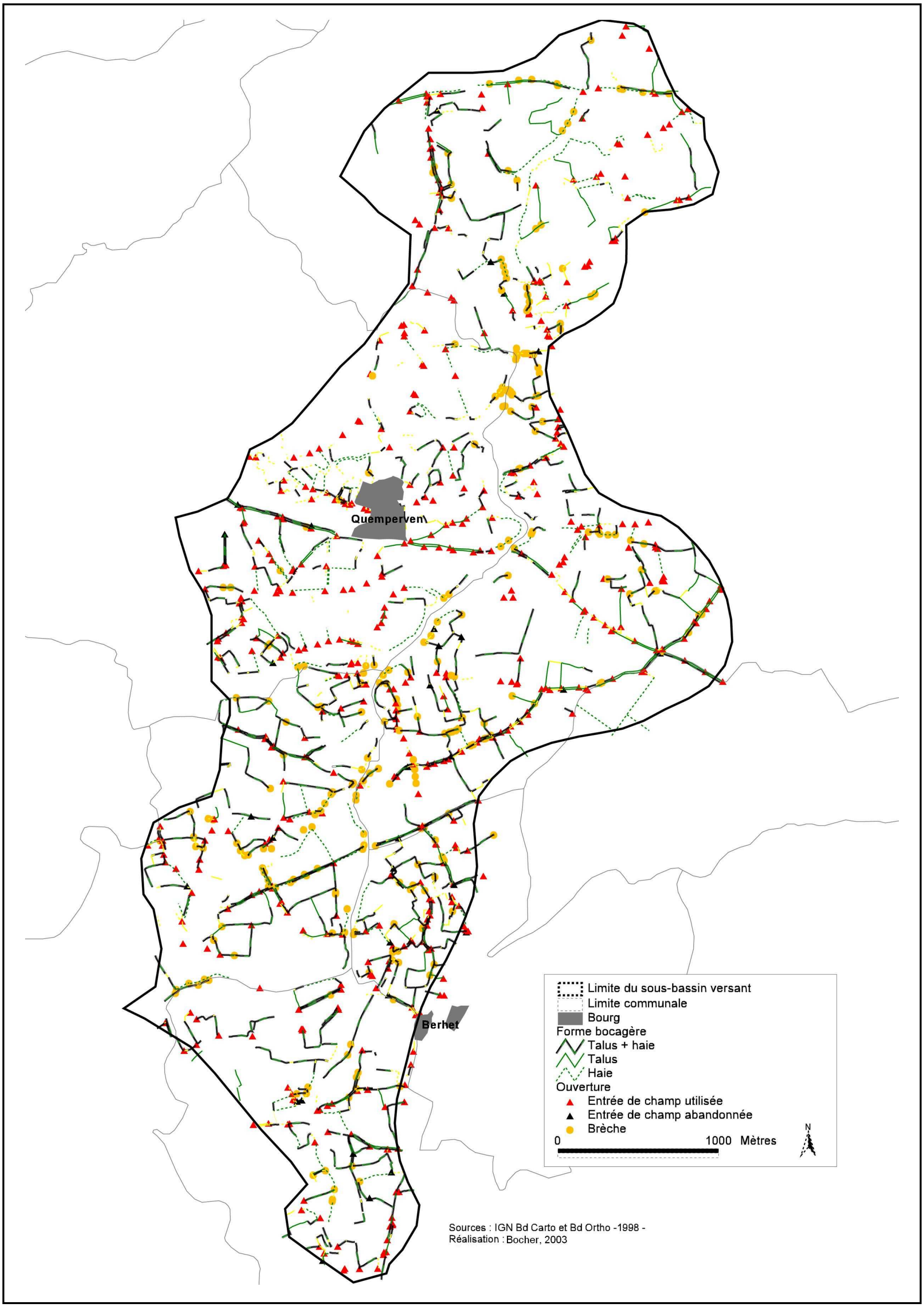


Figure 78. *Localisation des entrées de champs et des brèches sur le sous-bassin versant du Sterenn*

Figure 79. *Ancienne entrée de champ sur le sous-bassin versant du Sterenn*

(Bocher, 2003)

Figure 80. *Entrée de champ utilisée donnant sur un fossé de voirie :*

sous-bassin versant du Sterenn, (Bocher, 2003)

Figure 81. *Brèche dans un talus pour l'évacuation des eaux : sous-bassin versant du Sterenn*

(Bocher, 2003)

Le bocage du Sterenn est complété par de nombreuses parcelles boisées qui confèrent localement un sentiment de paysage compact et dense (figure 82). Cependant, cette observation doit être interprétée avec prudence. La plupart de ces parcelles sont composées de plantations, de peupliers ou de pins dont les effets sur le parcours de l'eau de surface sont limités. Les peuplerais situées en fond de vallées sont drainées par des fossés à ciel ouvert qui assurent le raccordement entre les parcelles cultivées, les routes et le cours d'eau. Quant aux parcelles de pins localisées sur les versants raides, l'absence de végétation au sol ne constituent aucun obstacle à l'écoulements des eaux provenant du versant. Enfin, les fonds de vallées sont aussi marqués par la présence de prairies humides mais dont le rôle de déconnexion (zone tampon)

entre le versant cultivé et le cours d'eau est réduit par les drainages récents et les restes d'une ancienne organisation hydraulique. Ces zones de fond de vallées étaient autrefois drainées par un système de talus-fossés qui servait à récolter les eaux du cours d'eau pour alimenter les pâtures. De plus, sur les versants, il n'était pas rare que les fossés qui accompagnaient les talus soient utilisés pour assainir les parcelles dont l'eau canalisée était dirigé vers le fond de vallée (Bocher 2004, entretiens auprès d'anciens agriculteurs).

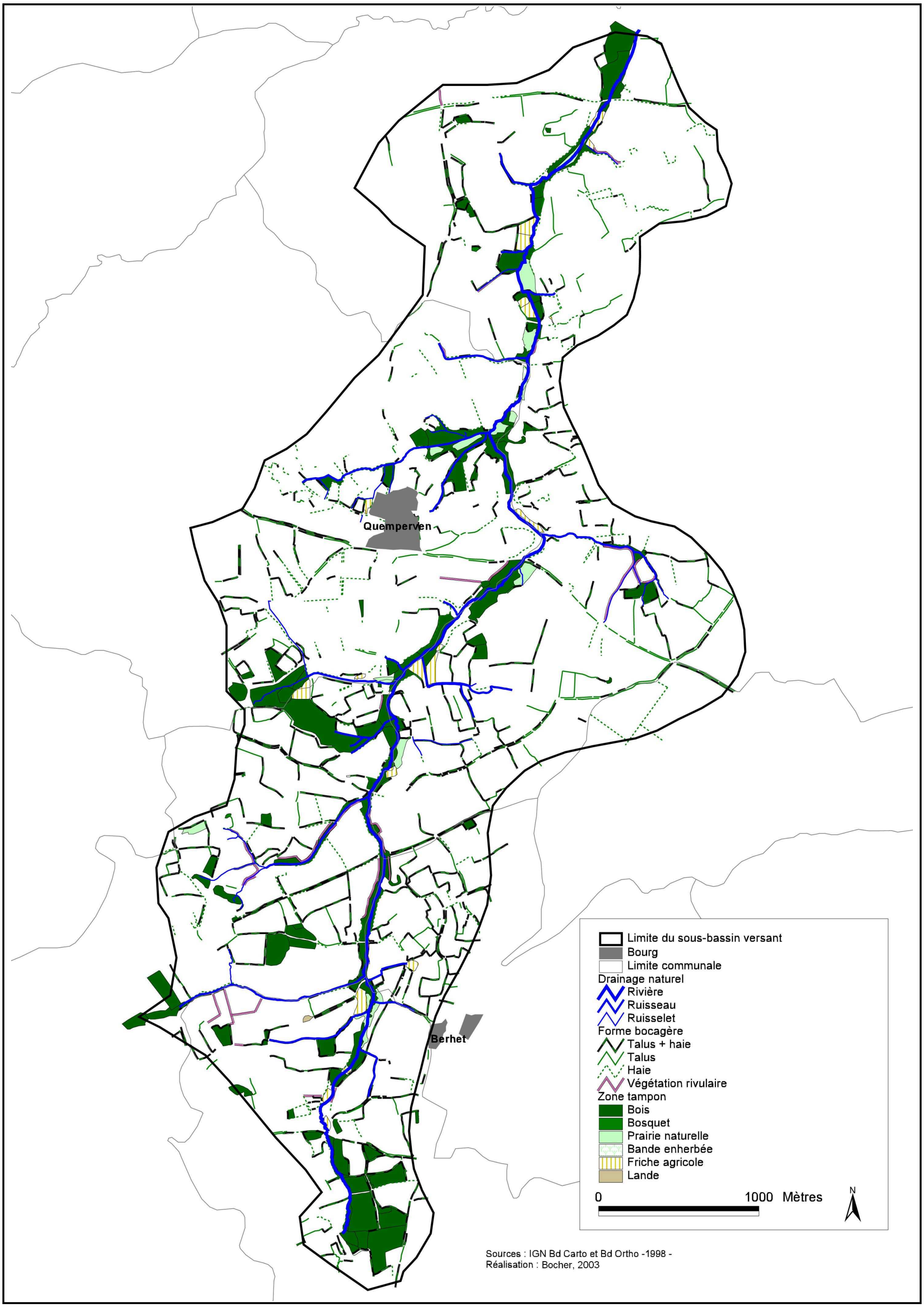


Figure 82. *Le bocage et les zones tampons sur le sous-bassin versant du Sterenn*

1.2.4. Cultures et ruissellement de surface

Malgré l'absence de carte des sols, nous tenons à présenter dans ce paragraphe les conséquences du couvert végétal sur l'apparition du ruissellement de surface dans le bassin versant du Sterenn. La présentation est réalisée en tenant compte des deux périodes propices au ruissellement pour les systèmes de grande culture : automne-hiver et printemps-été (cf. chapitre 2). Notons que nos observations de terrain ont fait ressortir une large prédominance de sols limoneux, facilitant ainsi le ruissellement de surface.

1.2.4.1. La période automne-hiver

- ***Les semis de céréales***

La période automne-hiver débute avec les semis de céréales. Ces derniers commencent autour du 15-20 octobre et peuvent s'étaler jusqu'à la mi-novembre. Les derniers semis succèdent généralement à un maïs. La levée de la culture est souvent retardée par des automnes pluvieux, ralentissant la vitesse de recouvrement par le végétal. La récolte a lieu début juillet et dure jusqu'à la première quinzaine d'août. Les cultures de céréales offrent donc un faible taux de recouvrement durant l'hiver or pendant cette période les précipitations sont plus fréquentes et plus longues. Les sols limoneux du Sterenn sont soumis à l'action mécanique des pluies et s'imperméabilisent progressivement. Début janvier, la surface de ces parcelles est alors favorable au ruissellement des précipitations (figure 83). Or c'est précisément durant les mois de janvier et février que les traitements phytosanitaires sont les plus actifs.

Figure 83. *Exemple de ruissellement sur une parcelle de blé pendant l'hiver 2004* (*source : Rochard, 2004)*

Pendant l'hiver, trois autres cultures sont présentes sur le sous-bassin versant : le colza, la culture piège à nitrate (la CIPAN) et les légumes. Excepté pour les légumes, leurs effets sont moindres sur le ruissellement de surface.

- ***Le colza***

Le colza est principalement utilisé pour le fourrage (aucun en culture dérobée). Il est semé entre fin août et début septembre, rarement après le 15. Lorsque le semis est tôt la levée est rapide. De plus, les nouvelles variétés ont une croissance très rapide permettant de disposer de 2 à 3 tonnes de matière sèche par ha en 45 jours. Le ruissellement de surface hivernal est quasi-absent. La récolte a lieu au mois de juillet.

- ***La CIPAN***

La CIPAN est une culture se développant entre deux cultures principales et qui a pour but uniquement de limiter les fuites de nitrates. Elle doit consommer les nitrates produits lors de la minéralisation post récolte et éventuellement les reliquats de la culture principale précédente. Elle est obligatoire pour les parcelles situées en zone d'action complémentaire (ZAC, cf. chapitre 1). Lorsqu'elle précède un maïs, elle doit être implantée avant le 1er novembre et maintenue jusqu'au 1er février. Derrière une culture de céréales, elle doit être semée avant le 15 septembre. Sur le Sterenn, la moutarde (famille des crucifères) est majoritairement utilisée comme CIPAN (figure 84). Sa croissance est très rapide et dure jusqu'aux premiers jours de froid. La densité de son couvert permet de limiter notablement l'apparition du ruissellement. Les parcelles occupées par une CIPAN sont détruites pour le 15 mars afin de préparer les sols aux semis de maïs (destruction mécanique, amendement organique).

Figure 84. *Parcelle de moutarde, hiver 2004*

(*source : Rochard, 2004)*

1.2.4.2. La période printemps-été

La période printemps-été débute approximativement avec les semis de maïs, réalisés entre avril et mai. Elle se termine avec la récolte qui a lieu à partir de mi-septembre pour les cultures avancées et peut s'étaler jusqu'à fin octobre. Il s'agit d'une période ou les précipitations sont peu fréquentes mais de forte intensité. Elles tombent essentiellement sous forme d'orage.

Les mois de mars, avril et mai sont les plus sensibles aux transferts de surface des polluants vers le cours d'eau. On distingue trois facteurs discriminants :

- la faible et lente couverture du sol par la culture de maïs,
- l'importance du potentiel agressif de la pluie. Le régime des précipitations est très irrégulier, alternant averses brutales et enchaînement de jours secs.
- les traitements phytosanitaires réalisés en post et pré-levée.

1.2.4.3. Le cas particulier des choux-fleurs

Les choux-fleurs sont cultivés toute l'année. On distingue les choux de printemps-été et les choux d'automne-hiver (tableau 16). Les chantiers de récolte sont nombreux et très destructeurs pour le sol, favorisant les concentrations de ruissellement, particulièrement lors des fortes pluies d'orages. Les coupes se font indépendamment de l'état du sol, « tant que l'on peut rentrer dans la parcelle ».

	Variété	**Période de plantation**	**Période de récolte**
Choux de printemps-été	Tous confondus	Mi-février à mi-juillet	Fin mai à mi-octobre
Choux d'automne-hiver	pommes	Mi-juin à mi-août	Septembre à mars
	romanesco	Fin juin à mi-août	Août à janvier
	vert	Début juin à fin juillet	Mi-août à fin octobre

Tableau 16. *Calendrier de culture pour les choux-fleurs*
(Source : Syndicat Technique, SYNTEC)

Toutes ces caractéristiques font du Sterenn un terrain privilégié pour l'étude de l'influence des éléments linéaires sur les écoulements de surface. L'absence de couvert végétal sur les parcelles culturales en certaines périodes de l'année, induit fréquemment des phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols. Les talus situés en travers de la pente sont souvent engorgés par l'accumulation des eaux de ruissellement. Ces derniers sont des marqueurs indispensables pour valider ou invalider la modélisation.

2. Observation des écoulements de surface et de leurs conséquences

Les observations de terrain réalisées pendant l'hiver 2003-2004 ont mis en évidence une grande complexité dans le parcours des écoulements de surface sur le sous-bassin versant du Sterenn.

2.1. A l'échelle de la parcelle

A l'échelle de la parcelle, comme l'ont démontré Martin (1996), Souchère et *al*. (1998), Takken et *al*. (2001b), les rugosités induites par le travail du sol contrôlent, au moins dans un premier temps, le parcours de l'eau. Lorsque les précipitations s'accroissent, c'est la topographie de la parcelle qui détermine le sens des écoulements.

Sur certaines parcelles cultivées, la longueur de la pente ainsi que sa déclivité, combinées avec les motifs agraires provoquent un ruissellement de surface qui peut être vigoureux. La photo 1a de la figure 85 montre l'effet cumulé sur une parcelle de blé du tassement du sol provoqué par le passage du tracteur sur une fourrière orientée dans le sens de la pente. La longueur de la parcelle est de 120 mètres et sa pente moyenne proche de 2,5 %. Les dépressions induites par les roues du tracteur ont favorisé la concentration du ruissellement et le développement de rigoles parallèles. Remarquons que la rigole en limite de fourrière a connu une incision beaucoup plus prononcée, notamment lors du raccordement avec les eaux de la parcelle cultivée canalisées par des traces de roues convergentes. A l'évidence, cette observation montre que les motifs agraires peuvent se comporter comme des agents directs de concentration de l'écoulement et augmenter ainsi la force de cisaillement du ruissellement pouvant causer des dommages aux terres agricoles et aux cultures. Cependant, comme le rappel Neboit (1983) si les corrélations entre l'accentuation du ruissellement et l'action de l'homme ne manquent pas, leur interprétation s'avère délicate et doit être relativisée. En effet, la présence de tassement sur une parcelle par exemple, ne constitue pas en soit l'assurance d'une forte activité du ruissellement de surface ou de l'érosion du sol. Il s'agit avant tout d'un emboîtement complexe de facteurs physiques et humains (Neboit, 1983). Ainsi sur la même parcelle de blé, des rigoles plus importantes peuvent se produire sous l'effet de l'inclinaison et de la longueur de la pente (figure 85, photo 1b).

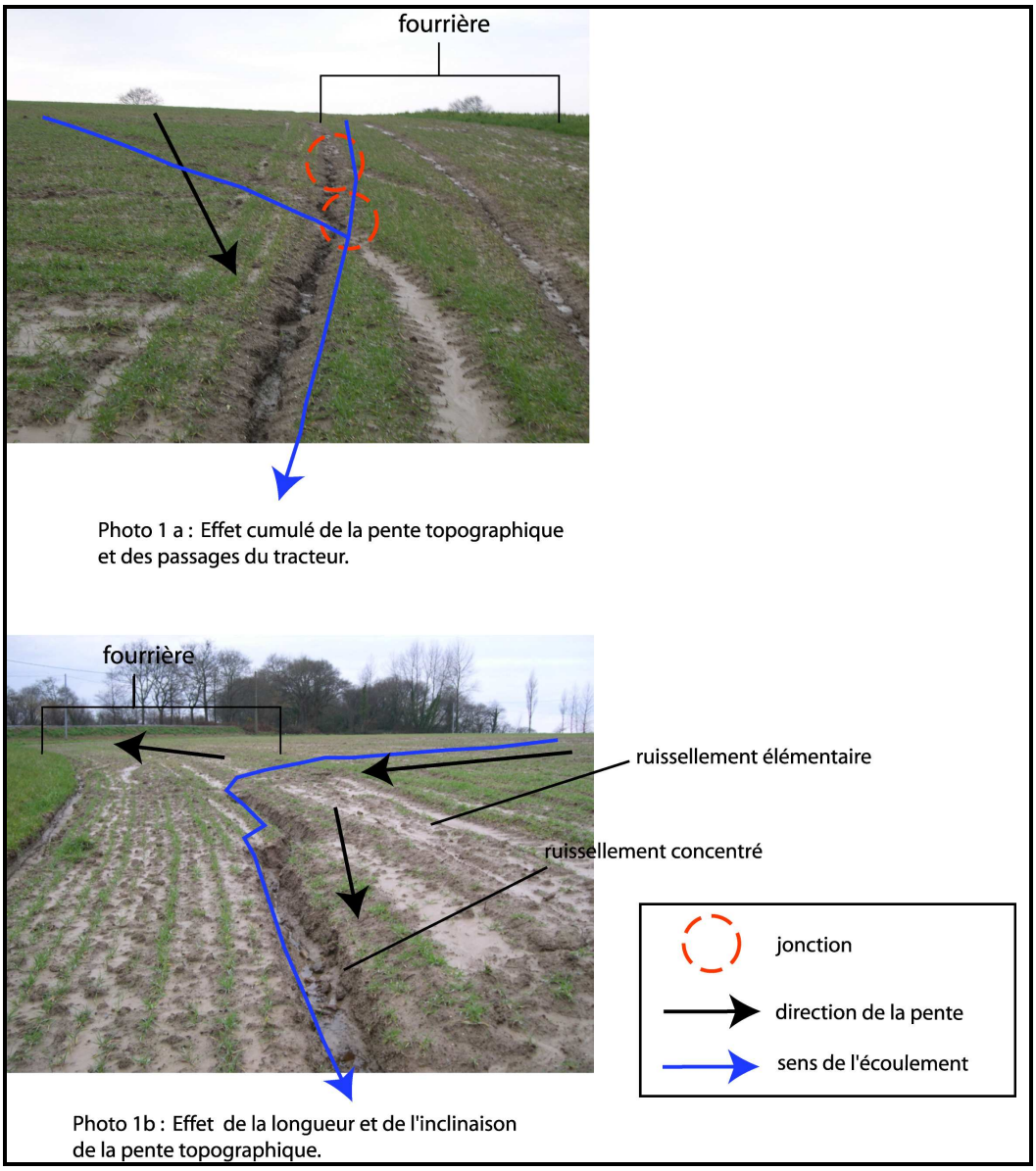


Figure 85. *Les effets des pratiques culturales sur le ruissellement de surface et l'érosion du sol : sous-bassin versant du Sterenn, janvier 2004*

(Bocher, 2005)

2.2. Les interactions parcelles / linéaires

A l'instar de Mérot et *al*. (1999) et Alberts et *al.* (2003) qui insistent sur le rôle du linéaire talus/haie dans la circulation des eaux à l'échelle du versant, nous avons pu observer de nombreux cas de figures où le talus perturbe les écoulements de surface. Trois critères interviennent : l'orientation du talus par rapport à la pente générale, la forme de son profil en long et sa connexion avec d'autres talus.

Ainsi, à l'échelle de la parcelle ou du groupe de parcelle, en amont des talus plus ou moins perpendiculaires au sens de la pente, les eaux s'accumulent (figure 86), ce d'autant plus que le tracé en plan du talus est constitué d'au moins 2 segments formant un angle ouvert vers

l'amont et empêchant un écoulement latéral - le puit topographique selon Mérot (1999). A ces eaux, sont associés des dépôts sédimentaires issus de la parcelle ou des parcelles amont (figure 87).

(source : Bocher, 2003)

Figure 86. *Accumulation d'eau au pied d'un talus sur le sous-bassin versant du Sterenn*

(source : Gestin, 2004)

Figure 87. *Accumulation sédimentaire au pied d'un talus dans leTrégor*

L'effet de barrage du talus est conditionné dans le temps par la quantité d'eau qui arrive en amont de celui-ci (figure 89). Les premières accumulations d'eau vont être stoppées par les dépressions locales le long du talus (figure 88, t1 : a et b ; e, f et g) ; si la pluie persiste, ces dépressions se comblent et l'eau auparavant bloquée, après avoir franchit un point de débordement, va se repartir le long du talus (figure 89). Cette observation montre donc la nécessité de changer d'échelle pour qualifier l'efficacité d'un talus qui dans un premier temps est très localisée puis se généralise au cours du temps (figure 88, t2 : a, b, c, d, e, f et g). Selon la durée des précipitations, les apports extérieurs, les dépressions locales se connectent pour former des unités de stockage plus importantes.

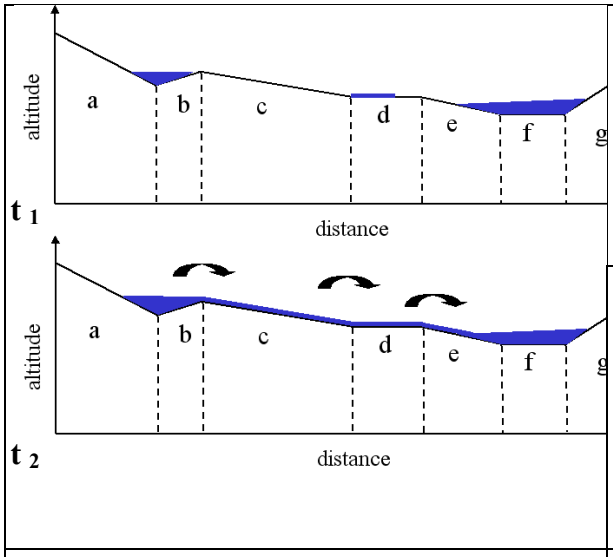


Figure 88. *Schématisation de la dynamique de connexion des dépressions le long d'un talus « barrage »*

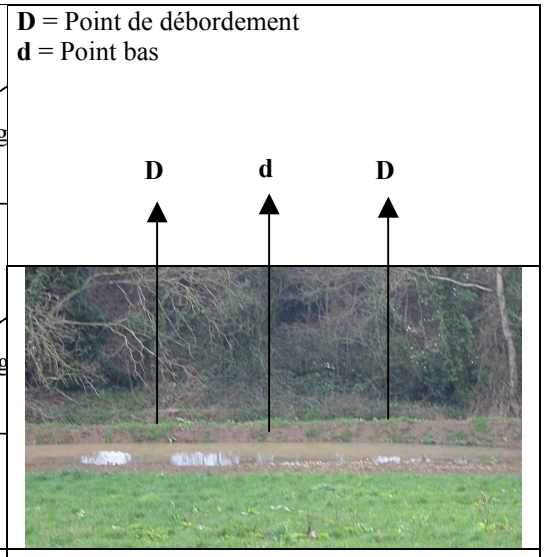


Figure 89. *Exemple d'un effet de seuil observé en amont d'un talus sur le Sterenn*

Lorsque les obstacles sont de faible hauteur tels les résidus ou chevets de talus, ces unités de stockage ne parviennent plus à bloquer les volumes ruisselés dans la parcelle et des ruptures apparaissent. Ces dernières constituent des connexions avec d'autres compartiments. La figure 91 illustre un tel phénomène. Lors d'un épisode orageux de septembre 2004, les écoulements et sédiments provenant d'une parcelle cultivée se sont accumulés en amont d'un résidu de talus de 50 cm de haut avant de déborder sur la route en créant une brèche. Ce genre de phénomène reste cependant rare. Les ruptures dans les talus sont surtout liées à la création de brèche par l'agriculteur.

2.3. A l'échelle du versant : échange et collecte

Les ouvertures dans les talus sont des lieux privilégiés pour opérer des connexions entre les différents compartiments à l'échelle du versant. Les entrées de champ constituent fréquemment des connexions entre la parcelle et la voirie (qu'il s'agisse de chemins en terre ou de routes goudronnées, figure 90), cette dernière canalisant les flux vers un exutoire (route, cours d'eau, voire une autre parcelle, figure 92...).

Figure 90. *Exportation des écoulements de surface d'une parcelle cultivée vers la route au niveau d'une entrée de champ (Rochard, 2004)*

Sur la figure 92, un flux liquide et solide, provient d'une parcelle cultivée connectée à la route par une entrée de champ, il rejoint un cours d'eau situé 300 m plus bas par le biais de la route qui sert de collecteur. Sur la figure 93, la situation est inverse : le flux en provenance d'un chemin s'étale dans la parcelle de culture le long d'un talus. La connexion entre la parcelle et le cours d'eau peut se faire, voire s'amplifier grâce à la présence d'un talus qui contraint l'écoulement des eaux vers un ruisseau comme le montre la figure 94.

(source : Bocher, 2004)

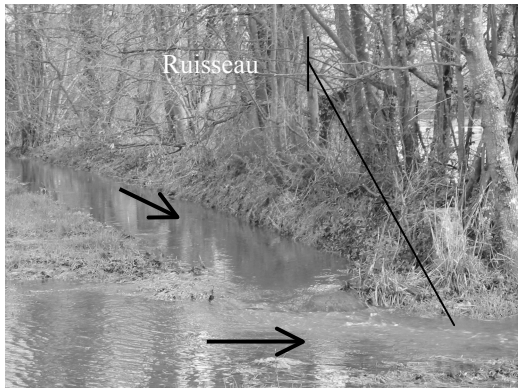
Figure 91. *Rupture puis débordement de terre d'une parcelle cultivée sur la voirie*

(source : Bocher, 2004)

Figure 92. *Canalisation et circulation des écoulements de surface sur la voirie*

(source : Bocher, 2003)

Figure 93. *Détournement des écoulements de surface par un chemin*



(source : Bocher, 2004)

Figure 94. *Détournement des écoulements de surface par un talus*

Les dérayures dans les parcelles cultivées sont aussi des occasions pour faciliter les exports de flux vers le cours d'eau ou des collecteurs anthropiques (fossés, routes). Au cours de l'hiver 2004, nous avons ainsi pu constater l'impact d'une dérayure située en bas de pente d'une parcelle de blé qui après avoir capturé les eaux de surface de la parcelle, les a canalisées vers une entrée de champs. Ces eaux ce sont ensuite déversées dans un fossé de voirie (photos 6 a et b de la figure 95).

Cependant, les volumes d'eau transportés restent minimes comparés à ceux bloqués par un talus ou collectés par la voirie. En 2004, quelques mois après à la construction d'un nouveau talus, nous avons pu observer que l'eau accumulée au début de l'hiver était à la limite de la hauteur de celui-ci (1 mètre) (figure 96, photos a et b). Cette situation s'explique par la forme en

coude du talus et sa position topographique de bas de versant. En effet, les stockages de plus de 1 mètre de profondeur sont néanmoins exceptionnels.

Ces observations mettent nettement en évidence les rôles respectifs des facteurs humains et des facteurs physiques dans le fonctionnement du ruissellement de surface. Le cheminement de l'eau est fragmenté par des discontinuités spatiales et temporelles qui conduisent à la formation de système en relais. Il s'en détache une multitude de combinaisons potentielles qui, de la parcelle au versant, induisent plusieurs schémas de circulation des écoulements. Selon l'organisation et l'usage du territoire, ces schémas prennent des formes très complexes. De la parcelle au cours d'eau, le ruissellement de surface peut ainsi être dévié par un talus puis canalisé par un fossé de voirie. Dans certaines situations météorologiques, c'est d'ailleurs l'ensemble des compartiments fonctionnels du système bassin versant qui sont interconnectés (parcelle, bloc de parcelles, voirie et cours d'eau) augmentant les risques d'érosion des sols et les transferts de polluants.

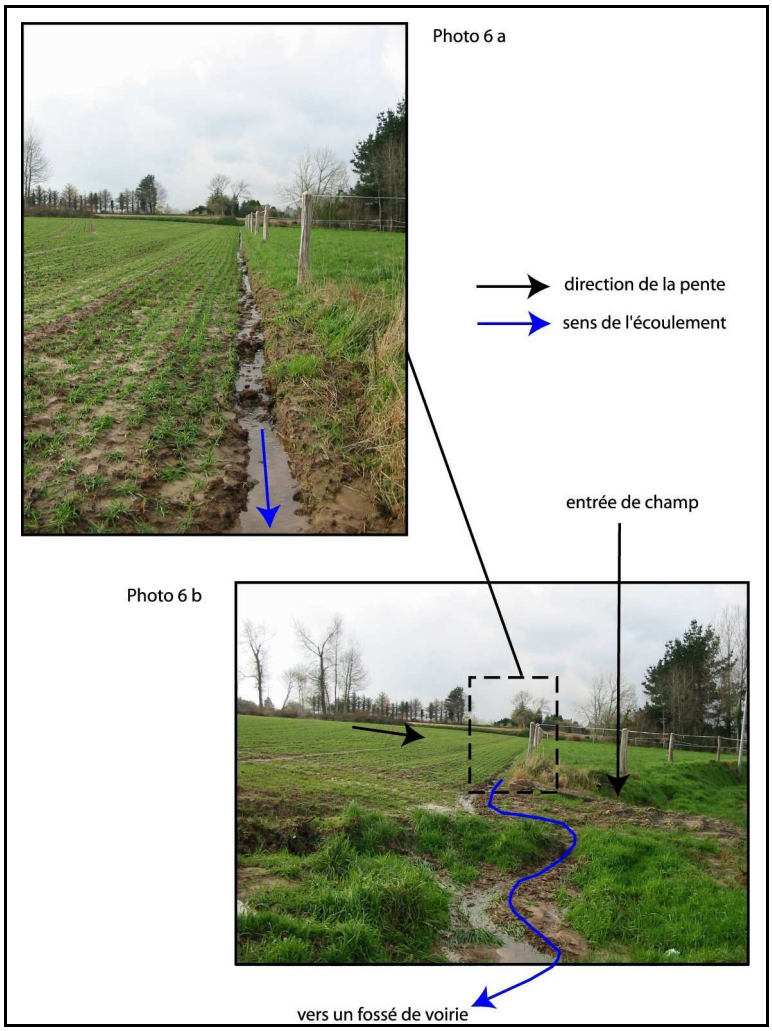


Figure 95. *Capture du ruissellement par une dérayure (Source : Bocher, 2004)*

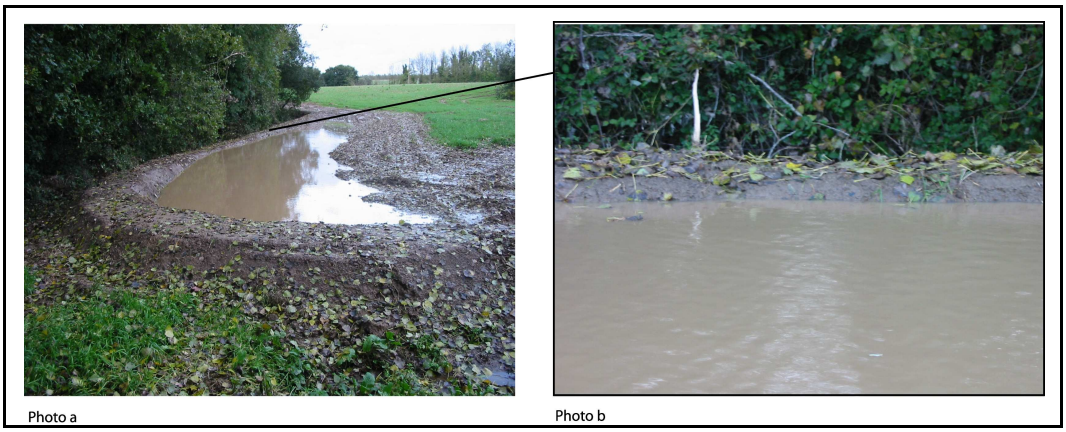


Figure 96. *Accumulation en amont d'un nouveau talus*
(Source : Bassin versant du J-G-B)

Conclusion sur l'organisation des écoulements de surface sur le Sterenn

Ces observations concordent avec les études antérieures (Penven *et al*, 1998 ; Cros-Cayot et Gascuel-Odoux, 1998 ; Ambroise, 1999 ; Cosandey et Robinson, 2000) qui ont insisté sur l'ampleur spatiale des phénomènes de relais qui favorisent les transferts d'eau et les déplacements de terre et par conséquent de polluant, sur des distances variables. A l'instar, de Risler (1897, in Feodoroff, 1965) qui avait observé l'unification de petits filets de ruissellement dans les champs labourés après le comblement des micro-dépressions formées par les mottes de terre, nous constatons un fonctionnement similaire en amont des talus au niveau des puits topographiques (Mérot *et al*, 1999). Le long des talus, l'organisation de l'écoulement dépend de la dynamique de connexion des puits topographiques. Cette dernière est corrélée à la durée des précipitations, au volume d'arrivée et à la capacité de stockage du puits. Lorsque le niveau d'eau atteint le col d'un puits, celui-ci déborde. Contrairement aux micro-dépressions provoquées par les mottes de terre qui se connectent en fonction de la pente topographique, les puits topographiques ou dépressions linéaires se connectent de proche en proche le long de l'obstacle. Cependant, dans certaines configurations topographiques, la hauteur de l'obstacle ne suffit pas à contenir les volumes accumulés, celui-ci est franchi. Les liens hydrologiques sont alors reconstruits et la mise en relais des écoulements peut de nouveau se réaliser. Pour les axes de drainage anthropique (fossé et voirie) le principe est identique. Par exemple, lorsqu'un fossé est situé en travers d'un versant, il collecte les eaux qui sont ensuite mises en mouvement au fur et à mesure du remplissage des dépressions topographiques longitudinales. La différence

majeure avec la voirie réside au niveau de l'emprise de la surface de capture (tablier) qui conduit à former des surfaces de collectes plus étalées avec des capacités de stockage beaucoup plus importantes.

En d'autres termes, cela signifie que le parcours des écoulements de surface dans le bassin versant peut être résumé à partir d'une unité topographique élémentaire : la dépression. Le bassin versant du Sterenn serait ainsi défini par un emboîtement hiérarchique et spatialisé de dépressions dont la participation dans la dynamique des écoulements évolue au cours du temps. Cette approche permet d'avoir une unité élémentaire générique pour caractériser l'écoulement indépendamment de sa nature (dépression formée par le long d'un obstacle ou dépression topographique).

Ainsi comme l'illustrent les schémas de la figure 97, pour deux types de configuration spatiale, talus dans un cas, fossé et voirie dans l'autre (figure 97 a), on suppose que le ruissellement de surface converge dans un premier temps dans les dépressions de niveau zéro (figure 97 b). Si l'averse continue, ces dépressions sont comblées et les cols sont franchis donnant ainsi naissance à une nouvelle dépression de niveau 1, agrégat des dépressions de niveau zéro (figure 97 c). A l'image des poupées russes, il existe donc à l'état initial dans le bassin versant *n* dépressions qui progressivement s'agrégent pour former des unités contiguës.

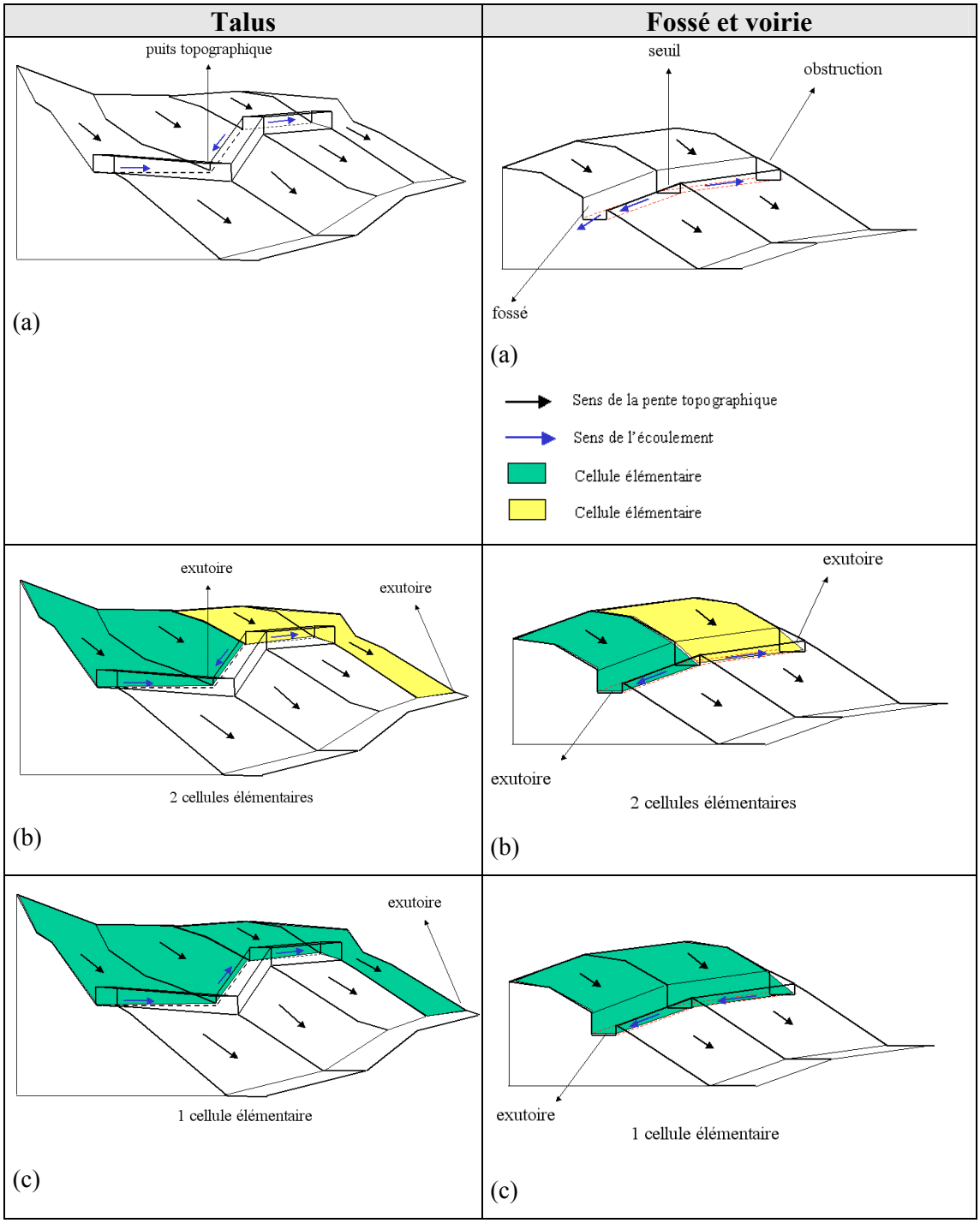


Figure 97. *Schématisation de la dynamique des écoulements selon le principe de la dépression elementaire (Bocher, 2005)*

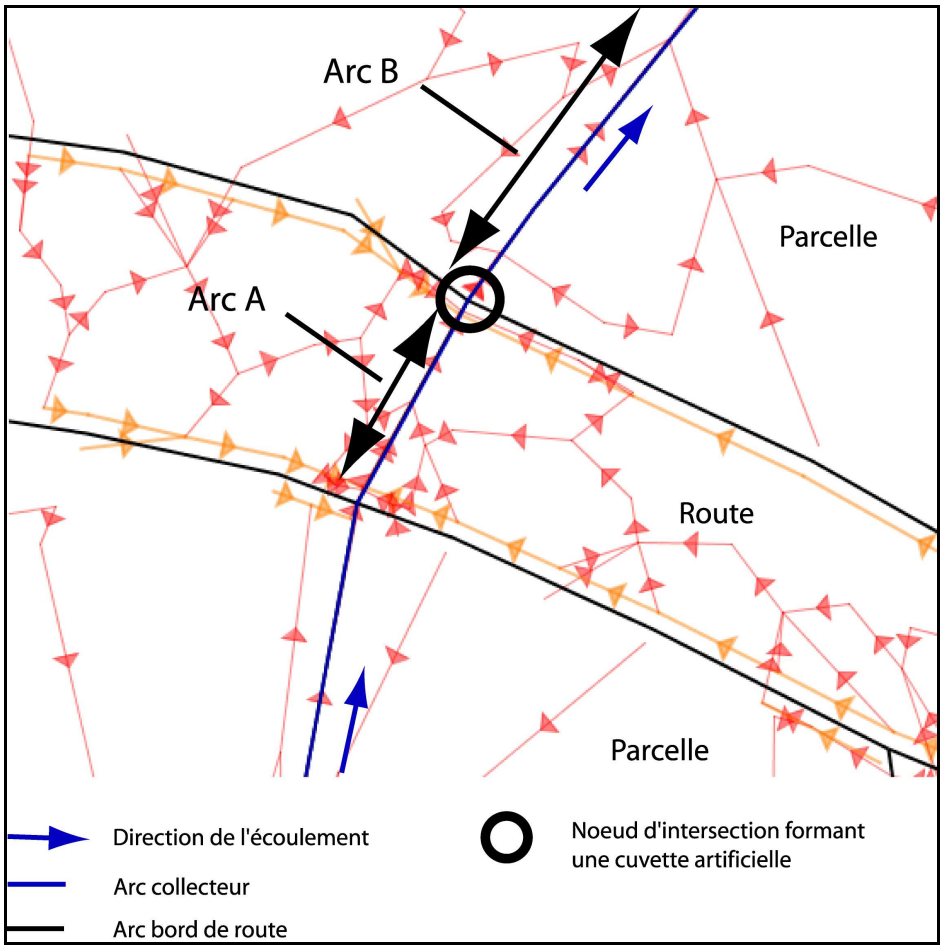


Figure 159. Déconnexion d'un arc collecteur (Bocher, 2005)

Pour corriger ce problème, le nœud exutoire est considéré comme perméable et la connexion rétablie entre A et B.

Remarque :

Les fossés de voirie sont associés au bord de route. Les autres fossés (fossé de talus, drain à ciel ouvert dans une parcelle) sont pris en compte comme des arcs « standards » lors de la connexion du graphe de bassins. Seule la topographie guide le comportement de l'eau dans le fossé. Aucune valeur de hauteur n'est associée pour qualifier sa profondeur.

3.3. Vers un automate cellulaire simplifié

Le temps nous a malheureusement manqué pour mettre en place l'automate cellulaire dynamique décrit dans le chapitre 5. La construction du graphe de bassins a nécessité un investissement très important pour tendre vers une représentation la plus fidèle possible des interactions entre les éléments du paysage et la topographie. L'individualisation des réponses hydrologiques des obstacles et le chaînage des écoulements ont constitué les points centraux. Les objectifs ont donc été réévalués pour proposer un automate cellulaire simplifié.

3.3.1. Principe de l'automate cellulaire simplifié

L'automate cellulaire associé au graphe de bassins est proche de celui décrit dans Langlois et Delahaye (2002). C'est un automate itératif synchrone. Il fonctionne par itérations successives sur l'ensemble des cellules du graphe en considérant que l'écoulement se produit en point de l'espace avec la même vitesse. Pour chaque cellule, deux variables sont dédiées au fonctionnement de l'automate :

- « Etat » qui correspond à l'état de la cellule
- « Valeur » qui est un registre mis à jour lors de chaque itération de l'automate.

Ces attributs sont calculés par itérations successives. Chaque itération comprend deux phases :

- Une première phase de transmission où la nouvelle valeur de la variable « Valeur » de la cellule est évaluée à partir des valeurs du flux sortant transmis par les connexions amont et de l'Etat de la cellule. A partir de cette valeur, le nouvel état de la cellule est calculé.
- Une seconde phase d'actualisation où les variables Etat et Valeur sont mises à jour avec les nouvelles valeurs calculées dans l'étape précédente.

Le nombre d'itérations dépend du nombre de cellules dans le graphe de bassins. Le processus s'arrête lorsque l'état stationnaire est atteint. Autrement dit, lorsque les cellules ne reçoivent ni ne transmettent plus de flux.

Contrairement à l'automate de Langlois et Delahaye (2002), les transferts de flux ne sont pas gérés par des connexions dynamiques, c'est-à-dire des connexions qui deviennent actives en fonction d'un volume d'eau accumulé. Les transferts sont réalisés par un graphe de

bassins où les conditions de débordement sont paramétrables. De plus, le flux correspond ici uniquement à la surface contributive transmise de cellules à cellules.

L'automate cellulaire est utilisé de deux façons :

- pour obtenir un bilan général des superficies cumulées sur les cellules du graphe de bassins
- pour connaître par itération les superficies cumulées de cellule à cellule.

La première opération permet de connaître le total des superficies cumulées pour chaque cellule du graphe de bassins. Le résultat est stocké dans une variable nommée « Accumulation ». Pour visualiser le résultat, un export de toutes les cellules du graphe est réalisé : face, arc, nœud, « Arc double », « Point multiple ». Cette opération peut être comparée au calcul de la grille d'accumulation sur des MNT raster (cf. chapitre 3).

La seconde opération consiste à récupérer pour un nombre d'itérations fixées par l'utilisateur la superficie cumulée sur une cellule du graphe de bassins. On obtient un échantillon de valeurs (itération et accumulation) utilisé pour produire un graphique en courbe : Le surfaçogramme selon Langlois et Delahaye (2002).

3.3.2. Le graphe de bassins paramétrable

Le graphe de bassins paramétrable est une approche qui doit être considérée comme transitoire. Son objectif est de permettre d'exploiter les connexions statiques dans l'automate cellulaire tout en réalisant des simulations cohérentes par rapport aux phénomènes observés sur le terrain.

Pour cela deux paramètres ont été introduits dans la procédure de re-connexion des cuvettes anthropiques. Ces paramètres sont :

- H_m pour la hauteur maximale de franchissement d'un obstacle (« Arc double »),
- H_{mr} pour la hauteur maximale de remontée des écoulements le long d'un obstacle (« Arc double »),

Pour comprendre le choix de ces deux paramètres nous nous appuierons sur les exemples de la figure 160.

Les figures 160 a et b représentent un TIN contraint dont le graphe de bassins a été calculé à partir de la méthode exposée précédemment. La hauteur des obstacles est de un mètre. Trois cuvettes topographiques ont été identifiées. Comme on peut l'apercevoir sur les deux figures, toutes les cuvettes anthropiques sont re-connectées. Or dans une perspective d'utilisation directe du graphe de bassins, toutes les connexions ne peuvent être acceptées,

notamment celles des cellules C1 et C2. Cela conduirait à une élimination systématique de l'effet des obstacles. De plus, sur le Sterenn des débordements de talus d'une hauteur de 1 mètre n'ont pas été observés même si après une succession d'évènements pluviométriques exceptionnels nous avons pu relever des accumulations d'eau atteignant une hauteur de près de 70 cm (cf. chapitre 4).

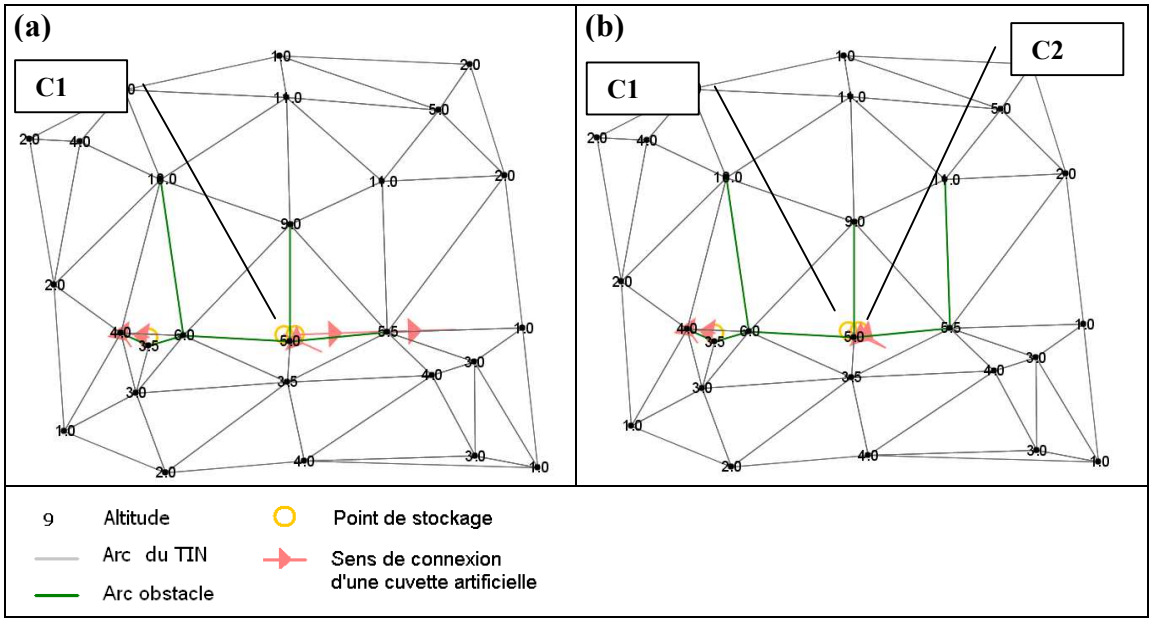


Figure 160. Le problème de débordement en amont des obstacles (Bocher, 2005).

<u>Utilisation de H_m</u>

Le paramètre H_m intervient donc pour limiter ce phénomène.

Soit, C xx une cellule exutoire anthropique,

Soit, Nc xx le nœud représentant le col de la cuvette appartement à un « Arc Double »,

Soit, z une valeur d'altitude du TIN.

Soit, H la hauteur de l'obstacle.

Soit, H_m la hauteur maximale de franchissement d'un obstacle

Soit, H_{mr} la hauteur maximale de remontée des écoulements le long d'un obstacle

L'application est la suivante :

C1 peut franchir l'arc obstacle si

Nc1 et Nc2 sont les cols de la cellule C1.

Si C1.z + H < Nc1.z et < Nc2.z alors C1 est l'exutoire de débordement de C1

ET

$H < H_m$

Les figures 161 a et b donnent le résultat de l'application de la méthode avec un H_m de 0.7 mètres. On peut remarquer que les cellules C1 et C2 sont maintenant déconnectées du graphe de bassins.

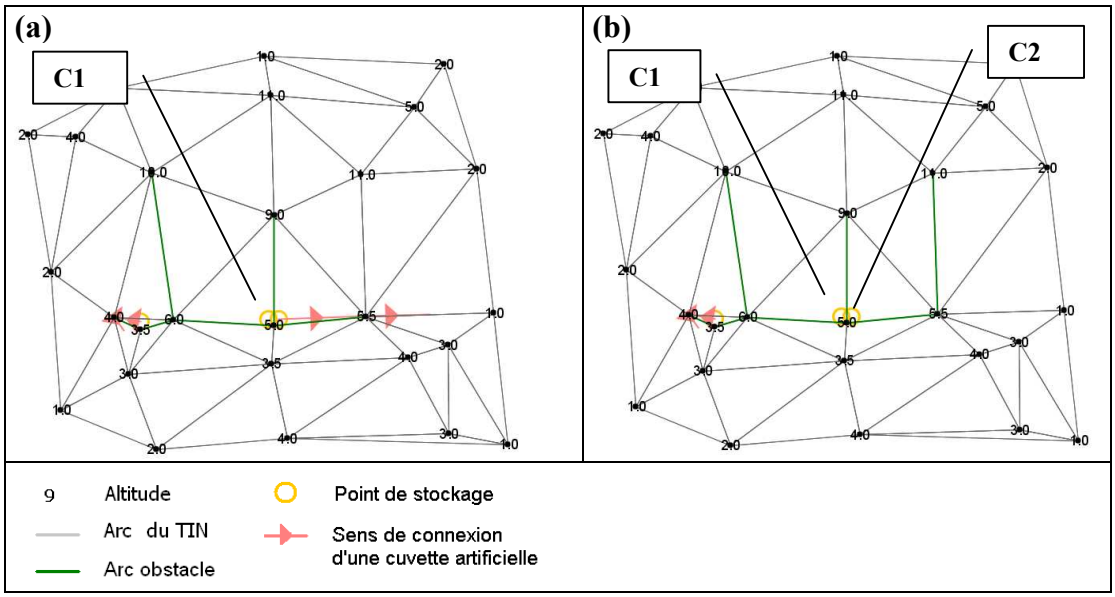


Figure 161. *Résultat avec le graphe de bassins paramétré (Bocher, 2005)*

Le paramètre H_{mr} est utilisé quant à lui pour éviter des remontées de pente trop importantes. Il s'agit de pouvoir contrôler les modifications qui sont induites par le paramètre H_m. Globalement, la connexion de la cuvette topographique le long de l'obstacle est autorisée si la différence de hauteur entre son point bas et son col est inférieure à la valeur H_{mr}.

Si ces paramètres permettent de casser certaines connexions dans le graphe de cellules le long des obstacles, en revanche il est très important d'insister sur le fait que les valeurs utilisées doivent être étalonnées à partir d'observations de terrain au risque sinon d'obtenir des connexions erronées.

3.3.3. Les cumuls de superficies de cellule à cellule

Les superficies transmises de cellule à cellule sont calculées à partir du coefficient de ruissellement *c* associé à chaque cellule surfacique (cf. chapitre 5). Les proportions de surface entrante et sortante dans la cellule sont calculées avec la formule suivante :

$$F_{in} = c * F_{out}$$

Avec $\mathbf{F}_{in}$: flux entrant dans la cellule
$\mathbf{F}_{out}$: flux sortant de la cellule
c : coefficient de ruissellement

Le résultat est stocké dans la variable « accumulation ».

3.4. Récapitulatif du fonctionnement de la modélisation

L'approche mise en œuvre pour modéliser l'influence des aménagements anthropiques sur les écoulements de surface à partir d'un TIN est relativement complexe car elle fait appel à de nombreuses opérations de traitements spatiaux. La figure 162 a donc pour objectif de donner au lecteur une vision plus globale de la démarche de modélisation. Il faut retenir qu'à l'issue de toutes ces opérations, nous disposons d'un graphe de bassins qui traduit par ses connexions les interactions entre les aménagements (voirie, obstacle), le réseau hydrographique naturel (axe de drainage naturel) et la topographie naturelle. Ce graphe constitue ensuite le support pour faire fonctionner l'automate cellulaire (calcul des surfaces cumulées) et dériver des indicateurs tels que les bassins d'alimentation qui seront présentés dans le chapitre suivant.

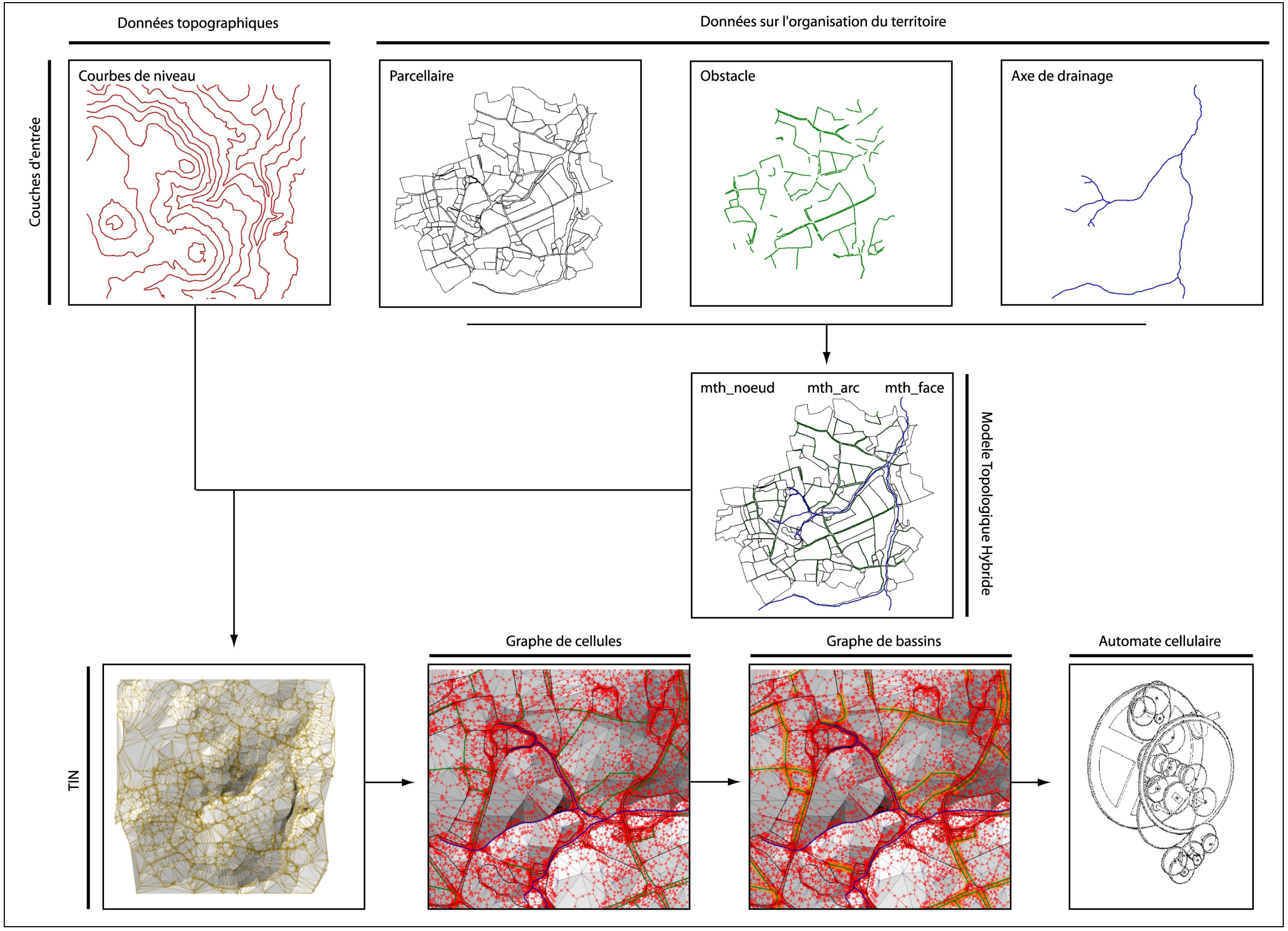


Figure 162. *Schéma récapitulatif des grandes étapes de la modélisation (Bocher, 2005)*

Les **chapitres 5 et 6** présentent la méthodologie qui a été adoptée pour modéliser l'influence des aménagements anthropiques sur le parcours des écoulements de surface à l'échelle d'un bassin versant agricole à partir d'un MNT triangulaire. Le modèle mis en œuvre reprend les approches proposées par Langlois et Delahaye (2002) et Yu *et al.* (1996), pour la construction du graphe d'écoulement topographique et la partie dynamique du système (automate cellulaire). En ce qui concerne la prise en compte des contraintes anthropiques, l'approche que nous proposons repose sur des travaux réalisés avec les modèles rasters (Duke *et al.*, 2003, Tortrat *et al.*, 2004) et d'expérimentations que nous avons menées sur un échantillon de données du sous-bassin versant du Sterenn. Ces expérimentations nous ont permis d'aboutir à un schéma général de modélisation et de valider une chaîne de traitements qui par la suite ont été implémentés dans un environnement SIG sous la forme de trois prototypes : **VectorProcess**, **TopoTIN** et **HydroTIN**.

Chapitre 5. Conceptualisation d'une modélisation spatiale à partir de structures triangulaires

Toute modélisation impose d'émettre des hypothèses méthodologiques et de réaliser des choix pour représenter au mieux la réalité du système observé. Ces choix sont dépendants des objectifs que l'on souhaite atteindre et influent sur les frontières de validité du modèle (qualité de la modélisation, transposabilité du modèle, usage…). Nous proposons ici la définition d'un cadre formel pour modéliser spatialement l'influence des aménagements anthropiques à partir d'un modèle à mailles triangulaires (TIN). Ce cadre doit conduire à un schéma de modélisation en vue d'une transcription numérique des interactions spatiales observées sur le bassin versant du Sterenn. Dans une première partie, nous présentons les données retenues ainsi que les mécanismes de fonctionnement du modèle, dans une seconde les choix réalisés pour l'organisation des données.

1. Choix et hypothèses de modélisation

1.1. Les données d'entrée

Contrairement aux modèles STREAM (Souchère, 1995 ; Cerdan, 2001) ou Lisem (De Roo, 1998) qui intègrent d'abondantes informations (intensité, durée des précipitations, états de surface, organisation du territoire) nous avons limité, en dehors des données topographiques, le nombre de données d'entrée à :

- quatre couches géographiques : le parcellaire, les obstacles linéaires, la voirie, les axes de drainages anthropiques
- deux paramètres : le coefficient de ruissellement et la hauteur d'un obstacle.

Ce choix s'explique par la volonté de ne pas surcharger le modèle. Nous avons vu dans le chapitre 3 que la modélisation spatiale apparaît très vite comme une opération complexe lorsqu'il s'agit d'intégrer des données exogènes à la topographie. Le nombre de cas particuliers à traiter augmente considérablement et avec eux, une part incompressible d'erreurs. Les modèles deviennent très vite exigeants en temps de calcul. De plus, il est admis que plus le nombre de paramètres d'entrée est important, plus les liens entre les réponses du modèle et les paramètres d'entrée deviennent difficiles à analyser. Enfin, l'étude des modèles rasters nous a amenés à tirer un enseignement important : à de grandes échelles, la modélisation ne peut pas

tenir compte de l'ensemble du système mais doit insister sur certaines parties au risque sinon de détourner la réalité observée par une réalité (re)construite. C'est pourquoi, nous n'avons pas retenu les motifs agraires tels que le sens de travail du sol. Nous avons considéré que ces objets agissent à une échelle spatiale qu'il est difficile de concilier avec les objectifs d'une modélisation effectuée à l'échelle de bassins versants bocagers comme le Sterenn, à moins de restreindre le territoire d'application ou d'accepter une perte d'information et d'importantes incertitudes sur les sorties du modèle.

Les interactions verticales entre le sol, la culture et les précipitations sont interprétées par l'utilisation d'un coefficient de ruissellement propre à chaque type d'occupation du sol. Ce coefficient est stocké dans la couche représentant le parcellaire comme un attribut. Il permet de réaliser un bilan hydrologique pour chaque cellule du TIN. Cette approche peut paraître partielle et très simpliste. Cependant, elle est conforme à l'objet de cette recherche qui ne vise pas à fournir une description détaillée et complète des processus mais à proposer une méthodologie pour améliorer la modélisation de l'influence des aménagements linéaires sur le parcours des écoulements de surface. Il s'agit d'arriver à une meilleure interprétation spatiale des interactions entre les objets de sursol et la topographie naturelle qui, comme le souligne Ambroise (1999), est un préalable nécessaire à l'analyse du comportement d'un bassin versant. Plusieurs auteurs (Auzet, 1990 ; Delahaye, 2002) ont montré les limites de ces coefficients car ils ont tendance à lisser le phénomène de ruissellement. Or les conditions sont extrêmement variables le long des versants, parfois sur de très courtes distances. De plus, les propriétés du sol évoluent au cours de l'évènement pluvieux. Leur utilisation suppose que toutes les surfaces contribuent, ne serait-ce que pour une part minime au ruissellement alors que pour des pluies faibles certaines surfaces ne produisent pas de ruissellement (Delahaye, 2002). Toutefois, même si ces coefficients restent approximatifs, ils permettent de tester l'effet du type d'occupation du sol (cf. chapitre 2). A terme, ces coefficients pourront être remplacés par exemple par la capacité d'infiltration du sol (Souchère, 1998, Cerdan, 2001).

Le tableau 17 résume les caractéristiques des données thématiques qui peuvent être intégrées dans le schéma de modélisation.

Couche géographique	Type de données	Géométrie	Contenu
obstacle	vecteur	polyligne	Couche représentant les obstacles de sursol tels que le linéaire de talus par exemple. Cette couche est nommée obstacle car elle peut intégrer d'autres objets comme une digue le long d'un cours d'eau ou un remblais autoroutier. Le champ hauteur détermine la hauteur de l'obstacle et le champ « type_obstacle » la nature de celui-ci.
parcellaire	vecteur	polygone	Couche représentant l'utilisation et l'occupation du sol. Le champ « type_occ » qualifie le type d'occupation du sol (blé, pature…) ou la nature de l'objet (voirie). Un champ « coeff_ruiss » indique par une valeur double le coefficient de ruissellement propre à chaque objet. Les objets voirie sont considérés comme des surfaces jointives aux parcelles.
axe de drainage	vecteur	polyligne	Couche représentant l'ensemble des axes de drainage, naturel et anthropique. La différenciation entre les deux objets est réalisée par le champ « type_axe » dont les valeurs sont : naturel pour qualifier un cours d'eau, anthropique pour qualifier un fossé.

Tableau 17. *Type et nature des données thématiques prises en compte dans la modélisation*

Concernant la topographie, deux sources de données sont utilisées : une couche de polylignes représentant des courbes de niveau et une couche de points altimétriques. La première couche est la source de données principale pour la production du MNT triangulaire. La seconde est considérée comme une donnée d'appui pouvant servir à améliorer l'échantillonnage des valeurs d'altitudes notamment dans les secteurs où les courbes de niveau sont très espacées (points cotés). Toutefois, il sera aussi possible de réaliser un TIN uniquement à partir d'un semis de points.

1.2. Mécanismes du modèle

La modélisation des écoulements de surface repose sur trois composantes principales : le TIN contraint, le graphe des cellules et l'automate cellulaire.

1.2.1. Le TIN contraint

Le TIN contraint constitue la structure de données de base sur laquelle s'appuie le modèle. Il est produit à partir d'une triangulation de Delaunay dans laquelle sont introduites les

trois couches géographiques : parcellaire, obstacle et axe de drainage. Le TIN contraint est construit en deux étapes.

La première étape consiste à trianguler les courbes de niveau pour produire un TIN topographique.

La seconde étape consiste à modifier le TIN topographique par l'introduction de couches géographiques. Seuls les objets linéaires sont imposés dans la triangulation. Les objets de la couche parcellaire sont intégrés à partir de leur frontière. Les lignes sont décomposées en une suite de segments sur lesquels les triangles prennent appui. La figure 98 donne un exemple de triangulation où trois couches (parcellaire, linéaire bocager et axe de drainage) ont été intégrées.

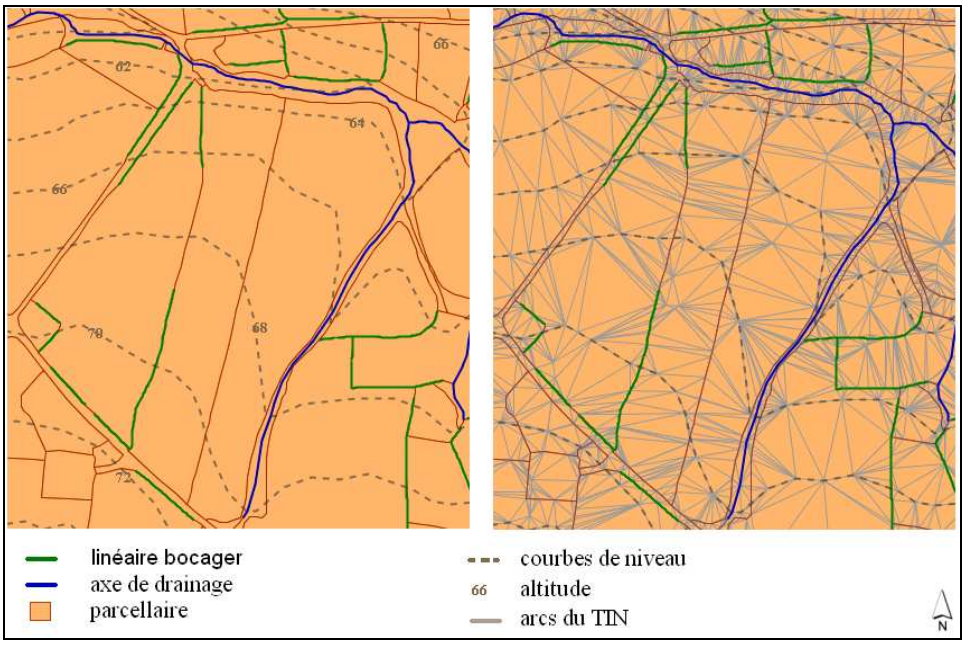


Figure 98. *Exemple d'un résultat d'une triangulation contrainte :*

à gauche les données d'entrée, à droite le TIN contraint
(Bocher, 2005)

1.2.2. Le graphe des cellules

Chaque arc du TIN est qualifié par une propriété morphologique selon la méthode proposée par Langlois et Delahaye (2002) et Yu *et al (*1996). Cette approche permet d'identifier localement et rapidement le comportement de l'écoulement d'un arc et de ses faces adjacentes. Dans le cas d'une triangulation contrainte, elle offre d'emblée la possibilité d'isoler les arcs qui auront une influence sur le parcours de l'eau. Ainsi, un arc représentant un talus dont la propriété morphologique est de type pente à gauche ou de type pente à droite perturbera la

direction de l'écoulement tandis qu'un arc talus de type ligne de crête n'aura pas d'effet (figure 99).

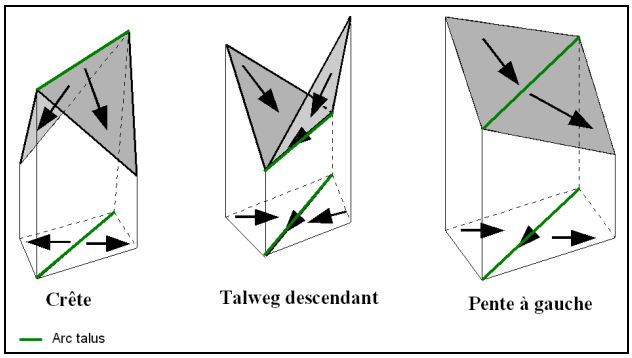


Figure 99. *Qualification morphologique d'un arc talus (d'après Langlois et Delahaye, 2002, adaptée)*

La qualification morphologique des arcs est utilisée pour assurer la connexion entre les entités vectorielles du TIN (nœud, arc, face) et produire un graphe de cellules. Le graphe de cellules ou graphe d'écoulement selon Langlois et Delahaye (2002), constitue le point de départ pour la modélisation des écoulements de surface. Il définit les conditions du routage de l'eau selon le critère topographique. L'ensemble des primitives graphiques du TIN, appelées cellules sont connectées selon leur pente topographique pour produire un arbre de drainage implicite géré par un programme informatique. Cet arbre de drainage ou graphe de cellules est par la suite exploité pour dériver de nouvelles données tels que le bassin versant topographique ou des isochrones par rapport à un exutoire.

La qualification des arcs du TIN repose sur l'analyse de la pente de l'arc et du vecteur de plus grande pente des faces adjacentes. La qualification est réalisée dans le sens topologique du TIN. La topologie est structurée selon un modèle de type graphe RZ topologique (Langlois, 1994).

Les figures suivantes permettent d'illustrer cette approche. L'exemple porte sur un TIN produit à partir d'un extrait de courbes de niveau numérisé sur le scan 25 de l'IGN (figure 100).

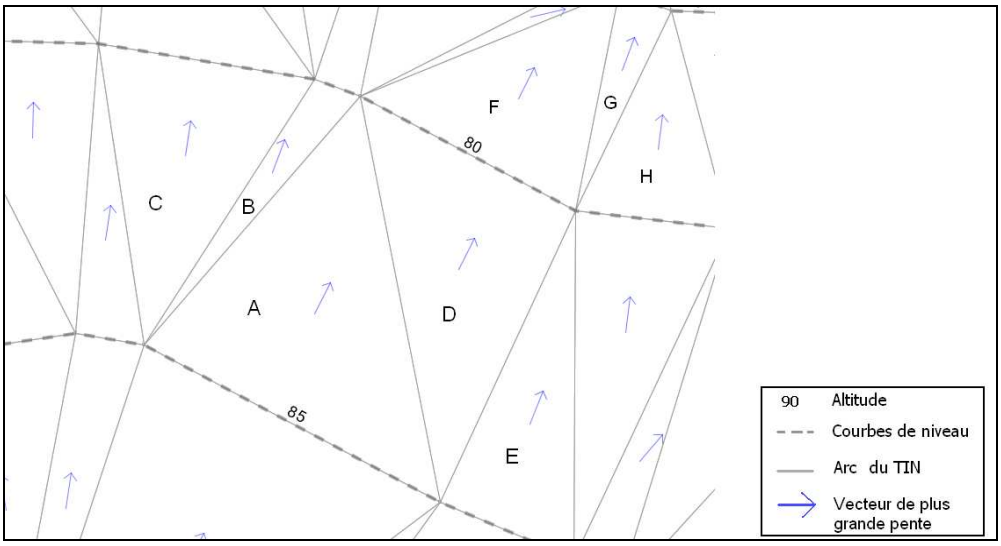


Figure 100. *Arcs d'un TIN topographique et vecteur de plus grande pente (Bocher, 2005)*

Exemples de qualification morphologique (figure 101):

L'arc 1 de la face A est qualifié de pente à droite car :

- le vecteur de plus grande pente de sa face à droite est divergent,

et

- le vecteur de plus grande pente de sa face à gauche est convergent.

L'arc 2 de la face D est qualifié de talweg descendant car :

- le sens topologique de l'arc est identique à son sens topographique,

et

- les faces à droite et à gauche sont convergentes.

L'arc 3 de la face B est qualifié de pente à gauche car :

- le vecteur de plus grande pente de sa face à droite pointe vers lui,

et

- le vecteur de plus grande pente de sa face à gauche est divergent.

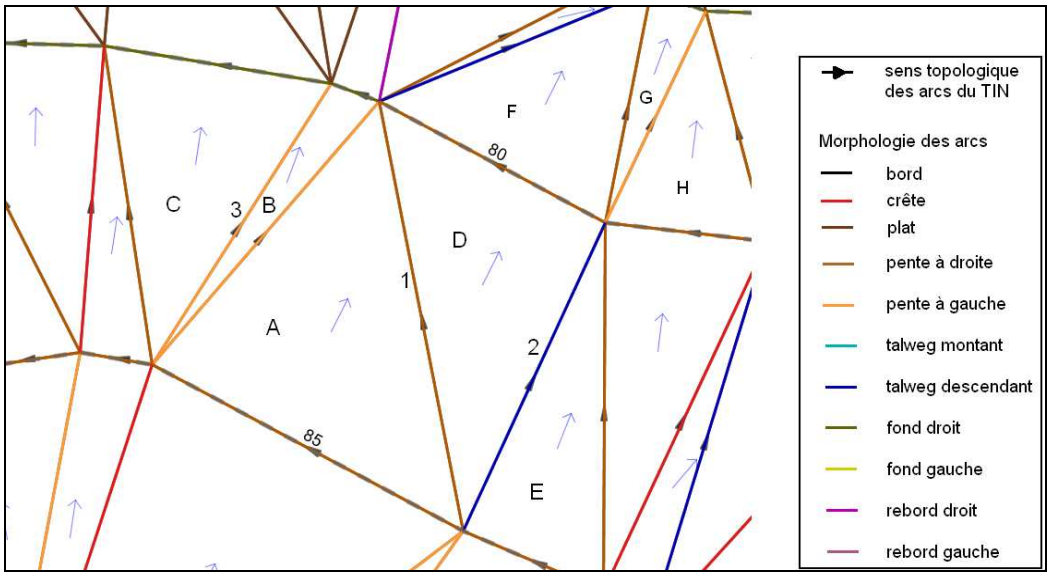


Figure 101. Qualification morphologique des arcs du TIN *(Bocher, 2005)*

Cette approche permet de passer d'un stockage purement topologique des données topographiques (pour chaque arc du TIN ont connaît l'arc suivant, l'arc précédent, la face à droite, la face à gauche) à une structure traduisant les liens topographiques amont-aval. Ces liens sont stockés dans un graphe orienté et valué, appelé graphe de cellules. Dans ce graphe, chaque cellule du TIN connaît sa ou ses cellules amont ainsi que sa ou ses cellules aval. Un exemple de représentation graphique du graphe des cellules est donné sur la figure 102. La connexion entre les cellules est réalisée à partir de leur centroïde.

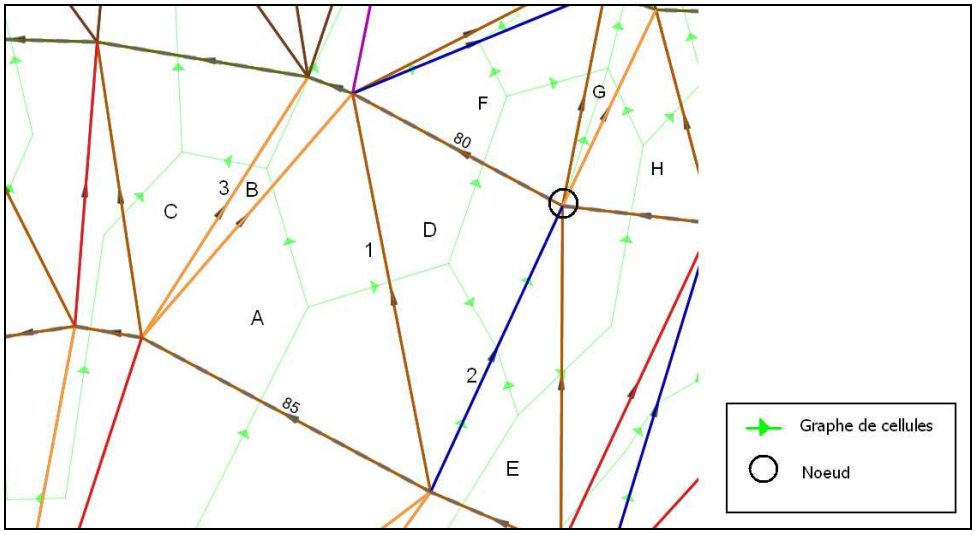


Figure 102. *Représentation d'un graphe de cellules construit à partir d'un TIN contraint (Bocher, 2005)*[34]

[34] Légende cf. figure 101

En utilisant cette représentation des écoulements, une cellule peut distribuer de l'eau vers plusieurs cellules mais aussi recevoir de l'eau d'autres cellules. Plusieurs situations sont considérées :

- ***Lorsqu'une face alimente plusieurs faces***

Lorsqu'une face alimente plusieurs faces (figure 102, triangle A), le flux sortant de celle-ci est réparti proportionnellement selon la ligne de plus grande pente entre les cellules aval candidates (Langlois et Delahaye, 2002). Ainsi le flux de la face A sera scindé en deux ensembles : A_1 et A_2. A_1 ira vers la face B et A_2 ira vers la face D. La part de flux qui arrive sur le nœud aval commun entre la face A et la face B est considéré comme nulle (figure 103).

- ***Lorsque le nœud aval d'un arc talweg peut se déverser dans plusieurs faces***

Si le nœud aval d'un arc talweg peut se jeter dans plusieurs faces alors l'écoulement provenant de l'arc est dirigé sur une seule face selon des règles topographique et logique. La méthode de recherche de la cellule réceptrice est décomposée en quatre étapes :

1. recherche des faces aval potentiellement réceptrices,
2. analyse des propriétés morphologiques des arcs de ces faces,
3. marquage des faces potentiellement réceptrices,
4. sélection de la face réceptrice ayant la plus forte pente.

Nous donnons deux exemples.

Exemple 1 (figure 103):

Soit pour le nœud aval de l'arc 2, trois faces F, G, H potentiellement réceptrices,

Compte tenu des caractéristiques morphologiques des arcs,

Une partie du flux de F se jette dans G,

Une partie du flux de H se jette dans G,

<u>Alors</u>

G est la face réceptrice dans laquelle le flux sera dirigé.

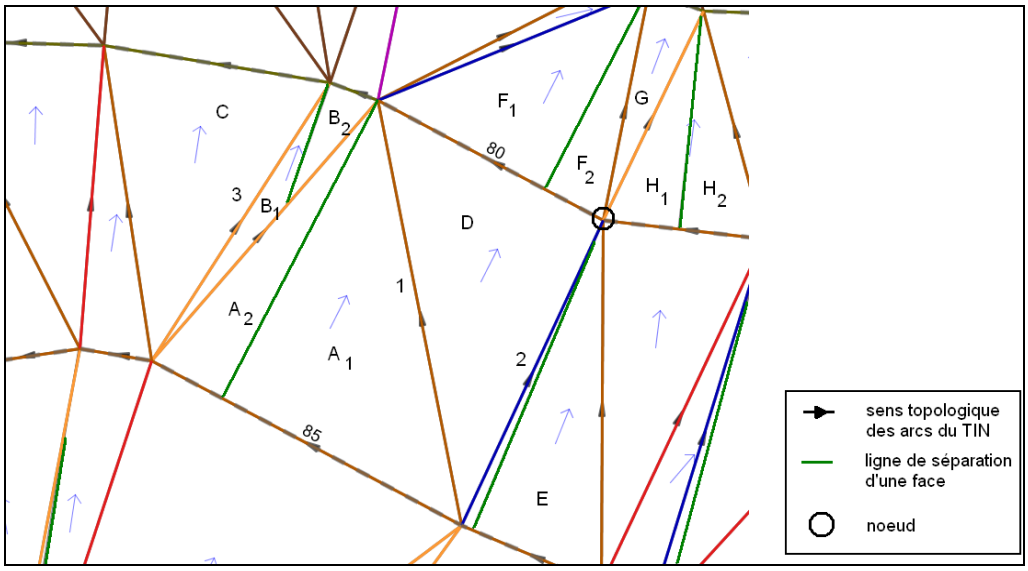


Figure 103. *Exemples de répartition du flux (Bocher, 2005)*[35]

Exemple 2 (figure 104):

Soit pour le nœud aval de l'arc 1, trois faces C, D, E, F et G potentiellement candidates,

Contenu des caractéristiques morphologiques des arcs,

Une partie du flux de C se jette dans D,

Une partie du flux de G se jette dans F,

Par conséquent, seul les faces D, E et F sont marquées comme potentiellement réceptrices,

La face D ayant la plus forte pente, celle-ci est considérée comme la face réceptrice.

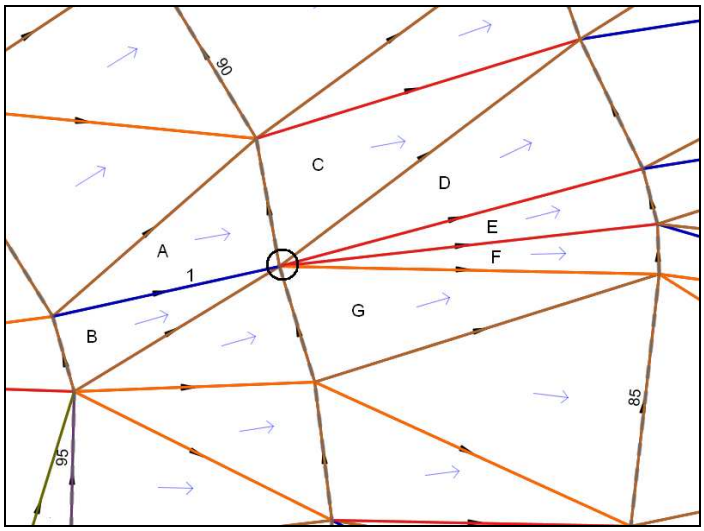


Figure 104. *Répartition du flux sur plusieurs faces (Bocher, 2005)*[36]

[35] Légende cf. figure 101
[36] Légende cf. figure 101 et 102.

- ***Lorsque le nœud aval d'un arc talweg est partagé avec un autre arc talweg***

Dans cette configuration, le flux provenant de l'arc talweg amont 1 (figure 105) est dirigé vers l'arc talweg aval 2 (figure 105). Ce choix permet d'assurer la continuité de l'écoulement entre talwegs.

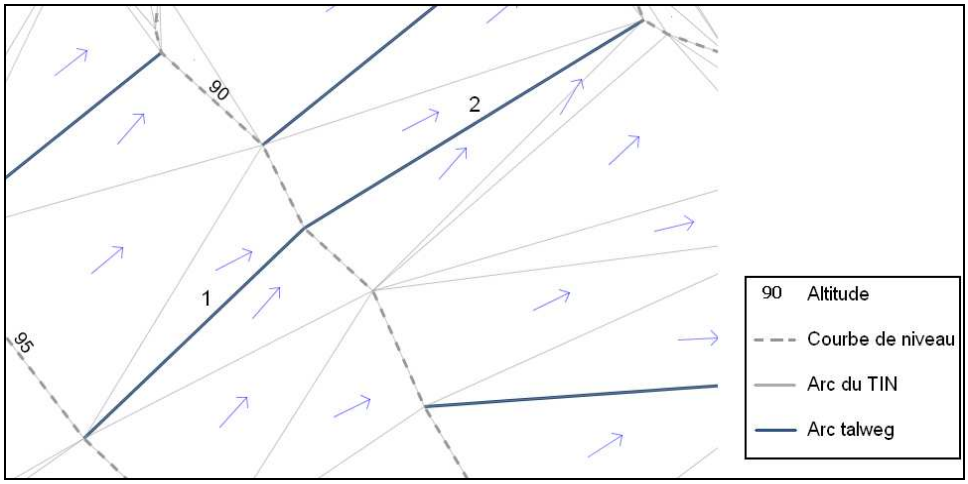


Figure 105. *Connexion entre deux arcs talwegs (Bocher, 2005)*

- ***Le cas particulier des cellules plates***

Lors de la construction du graphe, les cellules planes sont éliminées en forçant la connexion vers les cellules adjacentes de plus basse altitude. L'approche est identique à celle utilisée dans Ruicells pour rétablir les liens d'écoulements sur les zones horizontales (Langlois et Delahaye, 2002).

1.2.3. L'automate cellulaire

Un automate cellulaire est utilisé pour simuler dynamiquement le remplissage des dépressions dans le bassin versant (Darboux, 1999 ; Langlois et Delahaye, 2002). La méthode que nous proposons consiste à généraliser le concept d'emboîtement de cuvettes du modèle Ruicells (Langlois et Delahaye, 2002) pour considérer le bassin comme l'unité élémentaire de l'automate. Les cellules du TIN sont agrégées pour former des unités homogènes de collecte des écoulements, appelées bassin versant élémentaire. Ces bassins élémentaires sont caractérisés par un volume de stockage maximal. Lorsque le volume de stockage est dépassé l'eau se jette alors dans un nouveau bassin au niveau du col le plus bas de celle-ci. Dans Ruicells, l'exutoire de débordement d'un bassin appelé aussi déversoir d'un sous-bassin est identifié en recherchant l'objet qui réalise le minimum d'altitude sur la bordure du sous-bassin. Cet exutoire peut être de plusieurs formes. Il peut s'agir d'un nœud, d'un arc, d'une face ou d'une association de cellules

(arc et face par exemple). Lorsque l'exutoire est trouvé, les auteurs considèrent l'élément situé immédiatement en aval de l'autre côté du col comme le déversoir du sous-bassin. Cette approche est intéressante pour les bassins topographiques mais doit être adaptée pour la prise en compte des bassins formés par la présence d'éléments anthropiques. En effet, l'observation des écoulements de surface sur le Sterenn a montré que les dépressions provoquées par un aménagement tel un talus se connectent d'abord le long de son profil. Les bassins s'agrègent ensuite progressivement pour former de grandes unités qui vont se déverser dans un autre bassin soit par les extrémités du talus soit en le franchissant lorsque la hauteur de l'élément n'est plus suffisante pour contenir l'eau.

Cependant pour approcher cet effet de perturbation, il est nécessaire que le modèle puisse localiser les éléments anthropiques d'une part et caractériser leur réponse hydrologique d'autre part.

Le premier point est résolu lors de l'intégration des couches géographiques dans la triangulation. Chaque objet ajouté au TIN est relié à sa couche d'origine par son propre identifiant géographique. Ainsi si un obstacle de type talus porte l'identifiant 16, tous les arcs de la triangulation qui le représentent porteront aussi l'identifiant 16. Dans le TIN, cette information est stockée dans un champ ayant le même nom que la couche auquel il fait référence. Connaissant l'objet décrit par l'arc, il est possible ensuite de lui associer un comportement hydrologique. C'est le second point.

Au regard de l'ensemble des travaux scientifiques et des observations réalisées sur le Sterenn, nous estimons que les éléments influant sur le parcours des écoulements de surface peuvent être regroupés dans deux catégories : **« obstacle» et « collecteur ».**

La catégorie **« obstacle »** contient les éléments connus comme susceptibles de perturber les écoulements de surface. Il s'agit d'objets complexes pouvant correspondre à des surfaces ou du linéaire. C'est le cas par exemple, lorsque le territoire de modélisation est traversé par des routes décaissées. Dans le TIN, ces objets sont représentés par des arcs et connus en réalisant un lien avec la couche obstacle.

La catégorie **« collecteur »** fait référence aux arcs décrivant les axes de drainage anthropique et naturel. Ils sont connus en réalisant un lien avec la couche axe de drainage.

1.2.3.1. Les arcs collecteurs

Les arcs collecteurs sont qualifiés comme des cellules de capture des écoulements de surface. Les écoulements sont capturés par un arc collecteur uniquement lorsqu'une cellule (face ou arc) pointe vers celui-ci. Sur un arc collecteur, le flux hydrologique amont est dirigé dans le sens de la pente descendante de l'arc. La totalité de l'eau qui s'accumule sur les arcs

collecteurs est drainée d'arc en arc tant que les arcs ne sont pas à contre pente. Les arcs à contre pente ne sont pas éliminés par forçage. Un arc collecteur est identifié dans le TIN par un identifiant unique qui le relie à la couche « axe de drainage ».

1.2.3.2. Les arcs potentiellement obstacle

Deux propriétés de transfert sont définies pour un arc potentiellement obstacle : **obstacle et perméable**. Un arc obstacle est un arc qui représente un élément qui peut potentiellement dévier ou bloquer les écoulements de surface, tandis qu'un arc perméable est un arc sans effet. L'eau passe à travers l'arc.

Ces propriétés sont codées à 0 pour perméable et 1 pour obstacle. Elles sont renseignées pour chaque côté de l'arc dans deux attributs « cpGauche » et « cpDroit » stockés dans la table attributaire du TIN. La différenciation gauche-droite a été adoptée pour forcer la connexion des cellules dans certains compartiments du bassin versant telle que la voirie. L'idée est de pouvoir retranscrire le plus fidèlement possible l'effet des routes décaissées sur le cheminement de l'écoulement de surface.

a. Principe général

Les obstacles sont des éléments linéaires surélevés par rapport à la topographie. Il s'agit dans notre cas d'un talus mais il peut aussi s'agir d'un merlon routier ou d'une digue le long d'un cours d'eau. Les arcs du TIN qui décrivent ces obstacles sont initialisés lors de la triangulation avec la valeur 1 de chaque coté (attributs « cpGauche » ou « cpDroit »).

b. Le cas particulier des routes décaissées

Dès lors que l'écoulement est parvenu sur une route décaissée celui-ci est canalisé jusqu'à son exutoire, généralement un secteur de franchissement de talweg. Sur le Sterenn et de manière générale en système bocager, la configuration géométrique de la voirie ne permet pas de rétablir le chaînage des écoulements avec le versant. Les eaux restent localisées dans la voirie. Dans ce contexte, la voirie doit être considérée comme un grand collecteur dans lequel, il est, non pas impossible (car certains phénomènes exceptionnels ont prouvé le contraire) mais difficile de sortir. Parallèlement, la voirie doit aussi pouvoir être alimentée.

Dans le jeu de données d'entrée (couche parcellaire), les objets voirie sont représentés comme des surfaces adjacentes aux objets parcelles. Lorsque cette couche est introduite dans la triangulation, ce sont les arcs communs voirie-parcelle qui séparent ces deux compartiments (figure 106). Par conséquent, ce sont ces arcs qui vont devoir porter les propriétés de transfert.

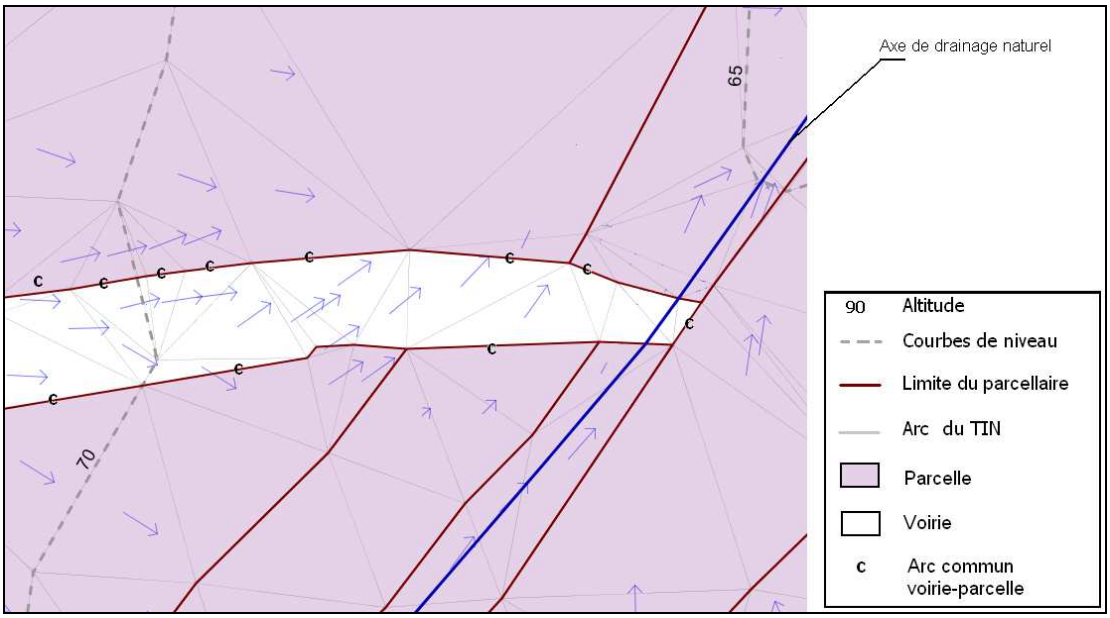


Figure 106. *Identification des arcs communs parcelle-voirie après intégration de la couche parcellaire dans le TIN (Bocher, 2005)*

Pour contraindre l'écoulement dans la voirie, les arcs communs dont la face pointe vers une face parcelle sont marqués comme obstacle aux écoulements (figure 107, lettre m). Ce marquage est réalisé en ajoutant à l'un des attributs « cpGauche » ou « cpDroit » la valeur 1, l'autre conservant la valeur 0. L'attribut qui sera modifié est choisi selon le sens topologique du TIN. Ainsi avec cette technique, la voirie peut aussi récolter les eaux provenant des parcelles (figure 107, lettre a).

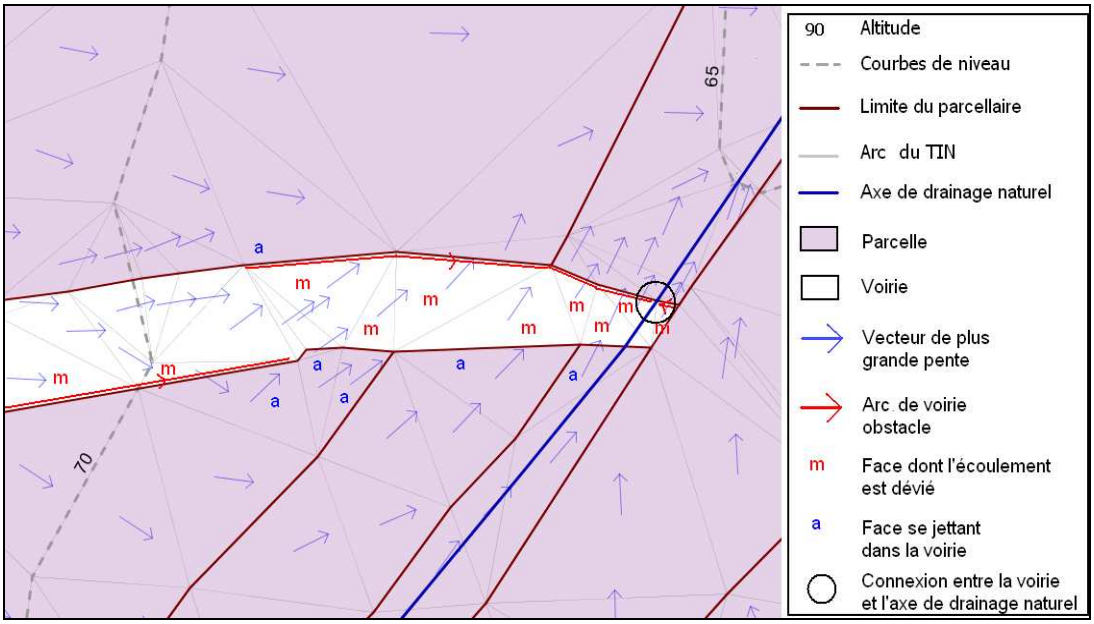


Figure 107. *Echanges entre la route et le parcellaire (Bocher, 2005)*

Les attributs « cpGauche » et « cpDroit » sont complétés par un deuxième paramètre : la hauteur de l'obstacle. La hauteur de l'obstacle est propre à chaque objet géographique de la couche obstacle. Contrairement aux propriétés de transfert, ce paramètre est identique pour la gauche et la droite. La hauteur relevée est celle mesurée à l'aval de l'objet. Pour le cas des routes décaissées, une hauteur par défaut est affectée aux arcs communs considérés comme des obstacles. La hauteur de l'obstacle est utilisée pour évaluer la capacité de stockage d'une cuvette artificielle. Ce paramètre est un attribut stocké dans la couche obstacle, ce qui permet de conserver l'intégrité des valeurs d'altitudes du TIN.

1.2.3.3. Le graphe de bassins et la dynamique des écoulements

Le graphe de bassins implique l'assimilation d'un nouveau niveau d'abstraction des liens d'écoulements à l'échelle du bassin versant. Contrairement au graphe de cellules où l'unité spatiale élémentaire est caractérisée par un arc, une face ou un nœud, dans le graphe de bassin l'unité de référence est le résultat de l'agrégation de plusieurs entités du TIN. L'approche consiste à interpréter le bassin versant comme un ensemble de bassins qui s'interconnectent au cours du temps et qui vont donc déterminer la dynamique des écoulements de surface. Le calcul du graphe de bassins est décomposé en trois étapes.

Etape 1 (figures 108 et 109)

L'étape 1 consiste à parcourir toutes les cellules du TIN pour rechercher les exutoires de bassin versant. La recherche des exutoires est réalisée en analysant le graphe de cellules et la nature des arcs (obstacle, collecteur) du TIN contraint (figure 108). Deux types d'exutoire sont définis : les exutoires topographiques et les points de stockage artificiels (figure 109).

Etape 2 (figure 110)

L'étape 2 consiste à identifier pour chaque exutoire les cellules formant son bassin d'alimentation (figure 110). Les bassins obtenus sont ensuite reliés entre eux au niveau de leur exutoire (ou col) de débordement (figure 110, flèche). Cette étape aboutit à la production du graphe de bassins. Comme le graphe de cellules, chaque bassin d'alimentation connaît son bassin amont ainsi que son bassin aval.

Etape 3 (figures 110, 111 et 112)

Cette étape consiste à simuler à l'aide de l'automate cellulaire les connexions entre les bassins. Les connexions entre les bassins sont réalisées lorsque le volume d'eau accumulé permet d'atteindre l'exutoire de débordement. La procédure de connexion repose sur un nombre d'itérations défini par l'utilisateur (Langlois et Delahaye, 2002). Au départ de la simulation, chaque cellule de l'automate (bassin) est initialisée avec une quantité d'eau correspondant à un évènement pluvieux. L'eau est ensuite routée dans le bassin versant selon les connexions définies dans le graphe de bassins. La quantité d'eau de départ est ajoutée pour chaque itération afin de simuler un épisode pluvieux.

Une schématisation des différents états (itérations) de connexion des bassins est donnée avec les figures 110, 111 et 112. La première itération de l'automate calcule la quantité d'eau reçue à l'exutoire de chaque bassin. Cette quantité correspond à la somme des flux provenant des cellules amont (les transferts sont réalisés selon les connexions établies par le graphe de cellules). Sur la figure 110, quatre bassins sont identifiés : trois bassins anthropiques et un bassin topographique. Lors de la seconde itération, la quantité d'eau du bassin 2 étant supérieure à sa capacité de stockage celui-ci se déverse alors dans le bassin 3. Les bassins 2 et 3 sont agrégés. Il ne reste plus que 3 bassins (figure 111).

A l'issue de la nième itération (figure 112), tous les bassins possédant un exutoire de débordement. sont connectés. La simulation est considérée comme « stationnaire ».

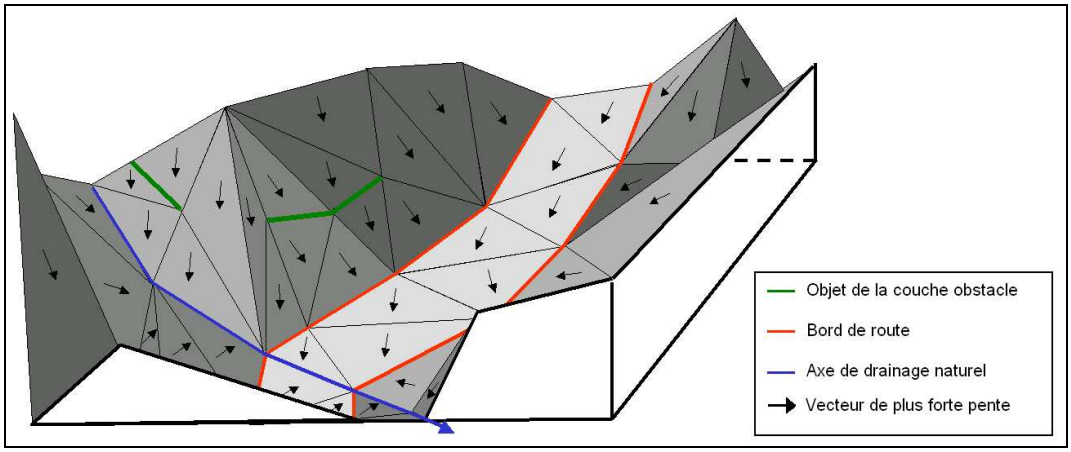


Figure 108. *Le TIN contraint (Bocher, 2005)*

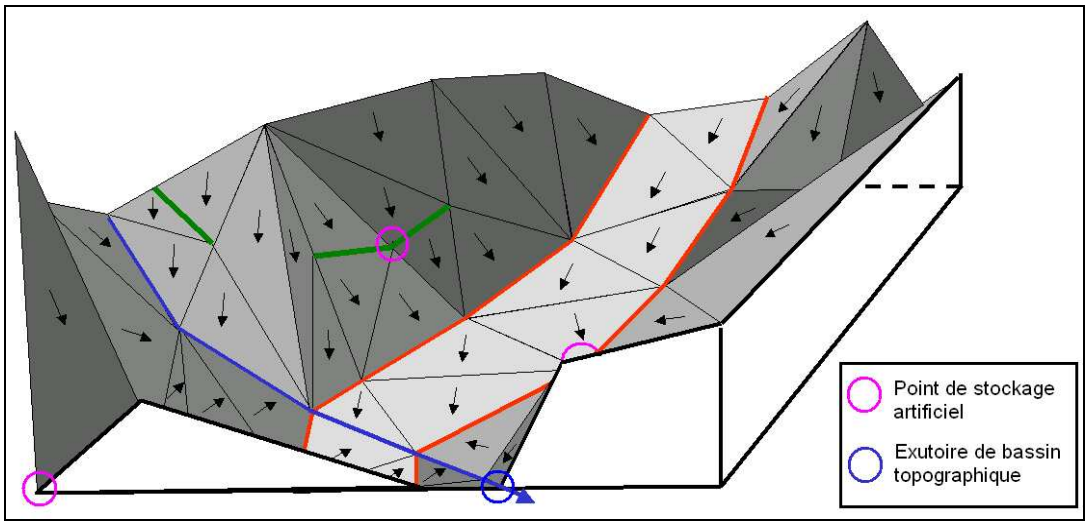


Figure 109. *Recherche des exutoires de bassin dans un TIN contraint (Bocher, 2005)*

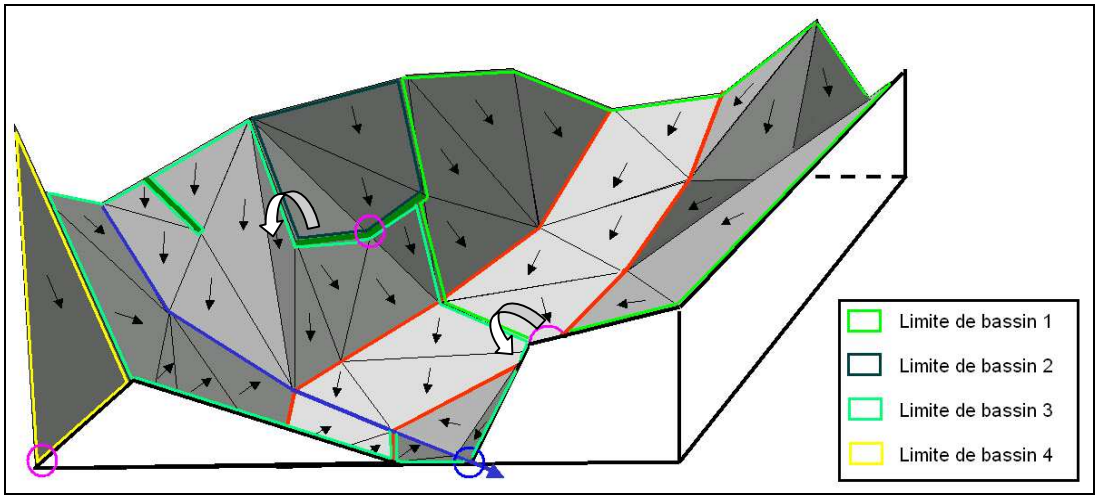


Figure 110. *Définition des bassins d'alimentation (Bocher, 2005)*

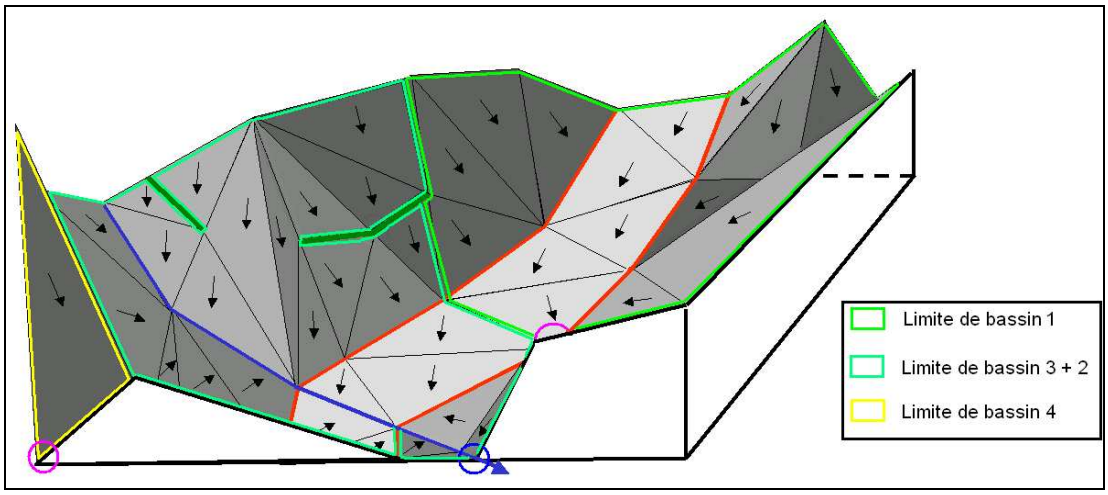


Figure 111. *Deuxième itération de l'automate (Bocher, 2005)*

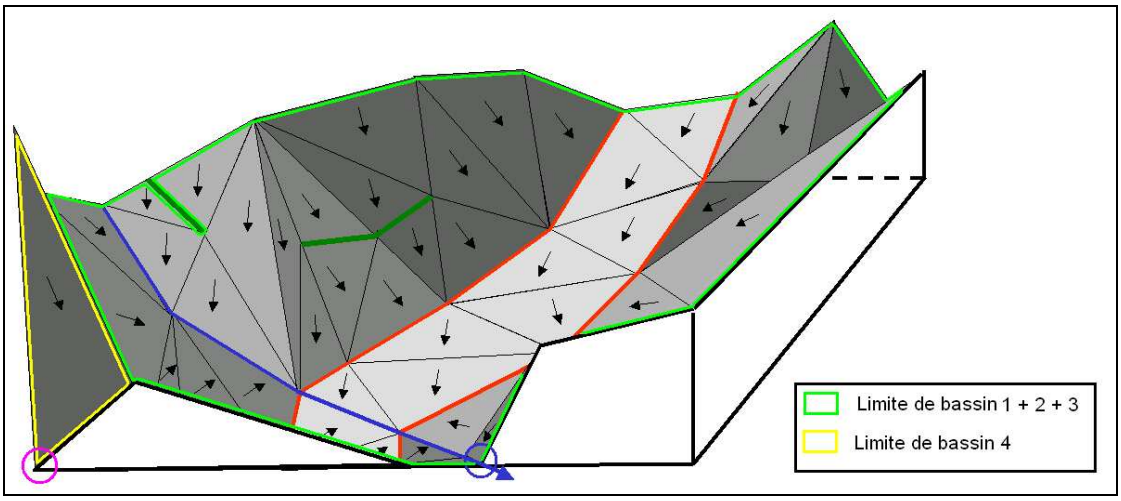


Figure 112. *Énième itération de l'automate (Bocher, 2005)*

Conclusion

Cette partie a permis de proposer un cadre théorique pour la prise en compte des éléments anthropiques dans une modélisation des écoulements de surface à partir d'une structure à éléments finis (TIN). Nous nous sommes attachés à la définition de principes généraux pour le fonctionnement du modèle en nous affranchissant volontairement des contraintes opérationnelles. Cette stratégie s'explique par notre volonté de traduire numériquement les connaissances acquises sur les interactions spatiales le plus fidèlement possible, c'est-à-dire en toute indépendance, par rapport au type de données disponibles, aux outils existants. Les travaux réalisés par Langlois et Delahaye (2002) ont largement alimenté le socle de la réflexion. Cependant, la méthodologie mise en œuvre à travers le modèle Ruicells a nécessité des ajustements importants pour être adaptée au contexte de cette recherche, le modèle Ruicells ne permettant pas pour l'instant de prendre en compte les éléments anthropiques tels que les talus, les fossés et les routes. Un nouveau schéma de modélisation a été défini. Ce schéma a été organisé autour de trois composantes principales (figure 113)

- le TIN,
- le graphe de cellules,
- le graphe de bassins.

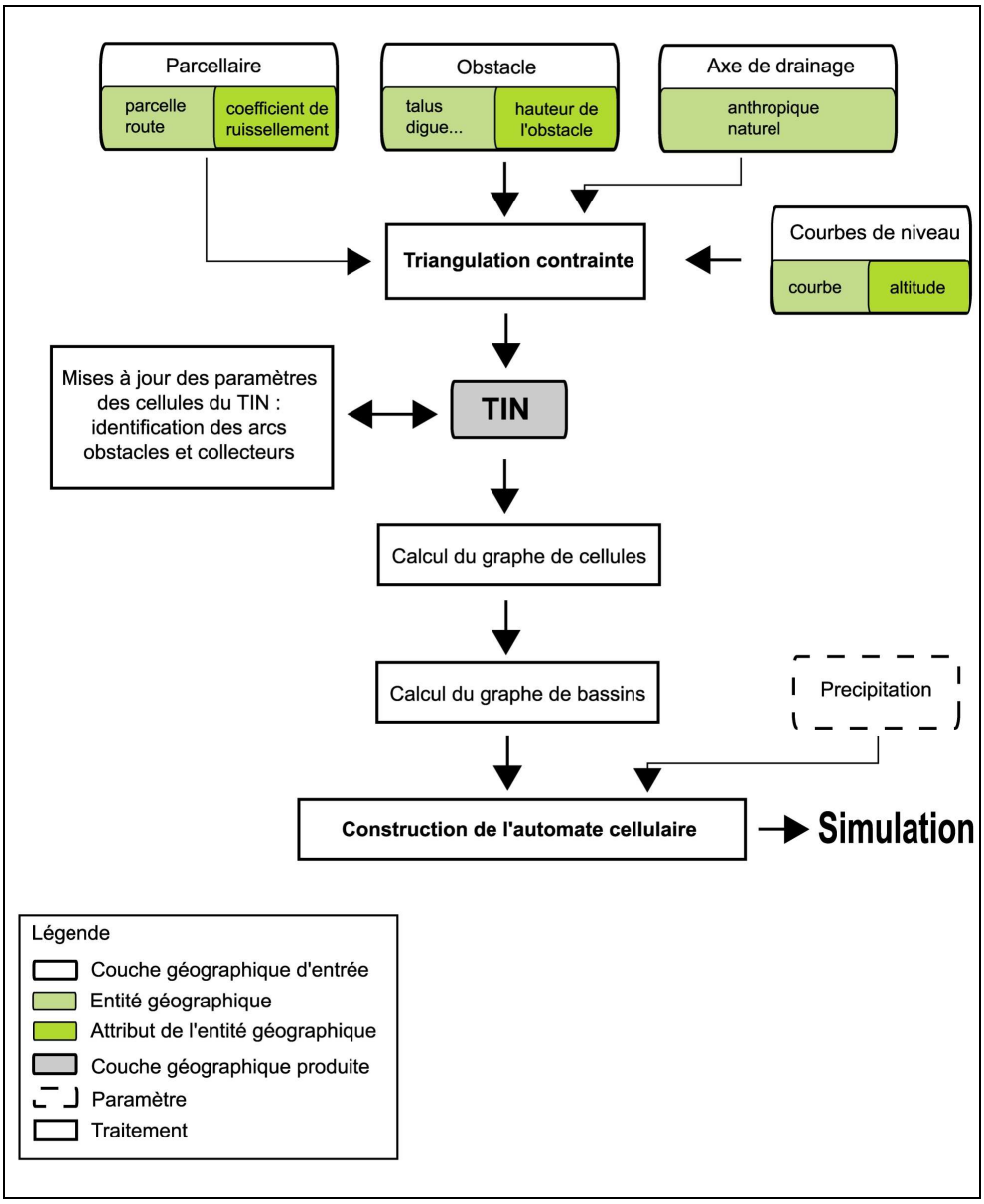


Figure 113. *Schéma de modélisation théorique adopté pour intégrer les éléments anthropiques dans la modélisation des écoulements de surface à partir d'un MNT TIN (Bocher, 2005)*

2. Structure et organisation des données

Nous présentons les modèles de données utilisés pour stocker d'une part l'information géographique et sémantique nécessaires au fonctionnement du modèle (données d'entrée) et d'autre part les données produites. Les choix se sont portés sur l'utilisation d'un modèle dit « spaghetti » et de deux modèles topologiques.

Le modèle « spaghetti » est un modèle simple sans topologie que l'on retrouve dans la plupart des SIG « bureautique » à l'instar du format ShapeFile du SIG ArcView (Esri ©). Ce dernier sert au stockage des données d'entrée et des données dérivées du TIN comme par exemple la surface d'un bassin versant.

Les modèles topologiques utilisés sont :

- le premier appelé MTH est un modèle topologique planaire (ou graphe planaire : Gatrell, 1991 ; Laurini et Thomson, 1992 ; Zeiler, 1999) au sein duquel les couches géographiques parcellaire, obstacle, axe de drainage sont unifiées.
- le second appelé TIN (Triangular Irregular Network) est inspiré d'un modèle de type graphe RZ topologique (Langlois, 1994). Il permet le stockage des cellules du TIN contraint.

2.1. Le modèle « spaghetti »

Le format « spaghetti » désigne l'absence de structuration logique. Les données vectorielles se présentent telles qu'elles ont été numérisées. Les lignes qui se croisent ne comportent pas de nœuds à leur intersection et les polygones ne sont souvent que des lignes fermées traçant les contours. Les entités géographiques sont regroupées dans des couches généralement composées d'une seule primitive graphique : point, ligne ou polygone. Les informations sémantiques relatives aux entités sont stockées dans une table. Chaque enregistrement (ligne) correspond à une entité distincte (Egenhofer et Herring, 1991 ; Zeiler, 1999).

L'inconvénient principal de ce type de modèle réside dans le fait que les entités géographiques n'entretiennent pas de relation entre-elles. Les relations spatiales sont calculées à la volée rendant ainsi certaines recherches spatiales difficiles (Ubeda, 1997). Ce stockage « libre » de la donnée laisse place à de nombreuses incohérences. Les données géographiques sont souvent représentées avec une grande anarchie. Ce modèle tend à dédouaner l'utilisateur d'une réelle réflexion sur les liens qui unissent les objets géographiques qui représentent son

territoire. Le territoire est décomposé en une multitude de couches géographiques thématiques (parcelles, réseau routier, hydrographie, haie…) qui n'entretiennent aucune relation.

Cependant, le modèle « spaghetti » offre des avantages économiques et organisationnels (Egenhofer et Herring, 1991 ; Ubeda, 1997) :

- le coût de la digitalisation des données est plus faible,
- le stockage des données est directe et ne nécessite pas de recourir à des transformations.

De plus, ce modèle est incontestablement le format de stockage le plus utilisé aujourd'hui par les SIG que ce soit sous la forme de fichier (ShapeFile pour ArcView ou Mif/Mid pour MapInfo) ou dans des bases de données. Ainsi, le nouveau « format » geodatabase disponible avec la nouvelle version du SIG ArcView (ArcGIS) n'est autre que la transposition du format ShapeFile dans une base de données Access. Ce format sera donc utilisé pour les données d'entrée et les données produites ne nécessitant aucune structuration spécifique. Les couches géographiques d'entrée (parcellaire, obstacle, axe de drainage) devront contenir les attributs présentés précédemment. Ils sont rappelés dans le tableau 18.

Couche géographique	Attribut
parcellaire	type_occ coeff-ruiss
obstacle	type_obstacle
axe de drainage	type_axe

Tableau 18. *Les attributs sémantiques pour la modélisation*

2.2. Le modèle topologique planaire unifié : MTH

2.2.1. Le choix d'un modèle topologique planaire

L'utilisation de plusieurs sources de données pose souvent des problèmes de conflit, d'homogénéité des données (Chisman, 1991 ; Rouet 1991 ; Goodchild et Jeansoulin, 1997 ; Burrought et McDonnel, 1998). Les données peuvent en apparence décrire ou s'appuyer sur des limites géographiques identiques sans pour autant disposer des mêmes propriétés géométriques. Or les différences de géométrie peuvent induire dans le cadre d'une triangulation des résultats profondément différents. Sur la figure 114, on peut ainsi observer les conséquences de l'absence d'un nœud à l'intersection des deux segments. Elle conduit à la production de deux triangulations bien distinctes (a et b).

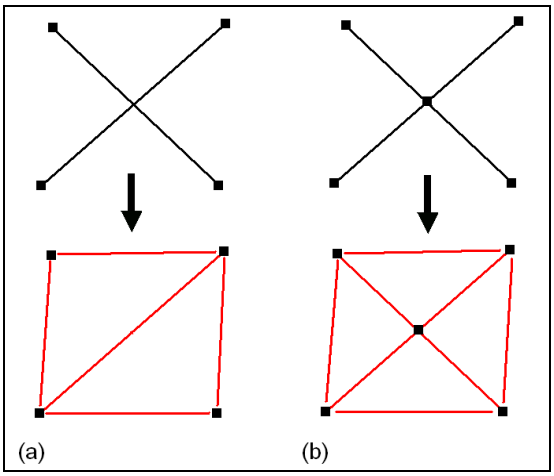


Figure 114. *Conséquences de la géométrie des objets sur une triangulation (Bocher, 2005)*

Pour obtenir une triangulation contrainte cohérente, la restructuration des données est une étape indispensable. Cette étape passe par la mise en œuvre de procédés robustes de calculs géométriques qui ont pour objectif de résoudre les situations conflictuelles. La figure 115 expose quatre des principales situations qui peuvent être rencontrées lors de l'intégration de deux couches d'objets linéaires a et b s'intersectant. Les problèmes apparaissent surtout pour les objets linéaires n'ayant pas les mêmes propriétés géométriques (cas 2, 3 et 4). Ainsi, dans le cas 2, la ligne de la couche b contient un point supplémentaire par rapport à la ligne de la couche a, dans le cas 3 les deux lignes n'ont pas les mêmes longueurs et dans le cas 4, les lignes a et b se croisent sans que le point d'intersection ne soit connu.

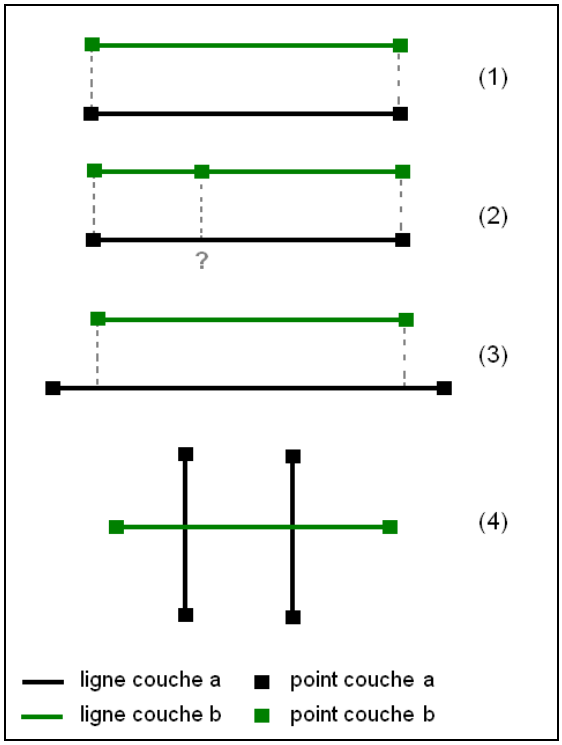
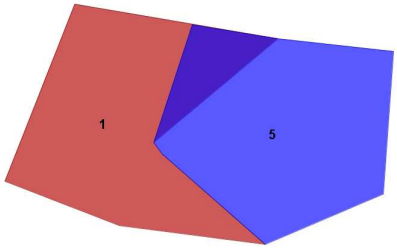


Figure 115.*Exemples de différentes situations conflictuelles lors d'une triangulation contrainte (Bocher, 2005)*

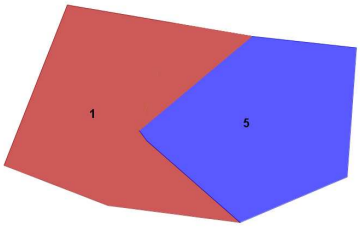
Pour remédier à ces problèmes, deux scenarii peuvent être envisagés. Dans le premier, les corrections sont effectuées à la volée, à chaque introduction de données. Dans le second, les corrections sont réalisées avant l'intégration des données. La qualité du jeu de données est contrôlée en amont en vérifiant un certain nombre de règles spatiales. La première approche bien que plus flexible pour l'usager souffre de plusieurs handicaps :

- le calcul à la volée impose l'élaboration d'un mécanisme de triangulation complexe, notamment lorsqu'il s'agit d'introduire successivement plusieurs jeux de données. Il faut alors vérifier la cohérence géométrique interne de la donnée introduite, assembler celle-ci avec la donnée existante et modifier localement la triangulation sans perturber la triangulation existante (méthode de partitionnement spatial). Cette technique peut s'avérer très coûteuse en temps et en capacité matérielle si les données sont nombreuses.

- la correction automatique des conflits géométriques rend difficile la maîtrise de la qualité de la donnée produite. Certaines anomalies dépassent le simple cadre d'un traitement géométrique et doivent faire appel au jugement de l'utilisateur. La figure 23 donne un exemple d'incohérence que l'on trouve régulièrement dans une couche géographique de polygones : le chevauchement ou *overlap* en anglais (Laurini et Thomson, 1992). Si cette erreur de définition de l'objet (Ubeda, 1997) peut être interprétée automatiquement à l'aide des opérateurs spatiaux (Egenhofer et Franzosa, 1991), en revanche le choix de la correction la plus appropriée reste dépendant de la connaissance que l'utilisateur peut avoir de la donnée. La correction proposée par l'algorithme relève d'une décision inévitablement arbitraire et ce, quelle que soit la précision des renseignements introduits dans l'algorithme. L'élimination des incohérences peut ainsi être précisée par des règles sémantiques. Ainsi un polygone représentant un étang est prioritaire sur un polygone représentant une parcelle. Si le polygone 5 est un étang et le polygone 1 une parcelle, alors la surface partagée sera attribuée au polygone 5. Or comme on peut le voir (figure 116) les corrections induisent des résultats très différents.

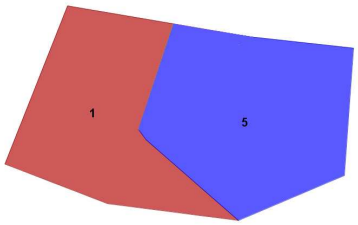


Deux polygones 1 et 5 ayant une surface partagée.



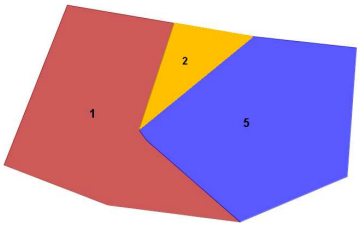
1

La surface partagée est associée au polygone 1.



2

La surface partagée est associée au polygone 5.



3

La surface partagée est transformée en un nouveau polygone.

Figure 116. *Exemple d'incohérence géométrique entre deux polygones et corrections possibles*

C'est pourquoi nous avons opté pour un contrôle des données en amont. Ce contrôle passe par l'intégration des données d'entrée dans un modèle topologique surfacique planaire : le MTH. L'intégration des données est réalisée par un mécanisme de traduction reposant sur des règles de correspondance entre les entités géographiques (Devogele, 1997). La traduction des données est définitive. Elle aboutit à la production d'un schéma topologique unifié. C'est-à-dire que toutes les données sont stockées dans un même modèle.

Contrairement au modèle spaghetti, un modèle topologique repose sur les relations spatiales qu'entretiennent les entités géométriques entre elles (Laurini et Thomson, 1992). Ces relations sont traduites à partir de deux concepts principaux, la connectivité et l'adjacence. Par rapport au modèle topologique de réseau simple, le modèle planaire ou graphe planaire ajoute la contrainte de planarité des éléments. C'est-à-dire qu'un nœud doit exister au croisement de deux arcs (Egenhofer et Herring, 1991 ; Laurini et Thomson, 1992 ; Ubeda, 1997). Il existe deux types de graphe planaire : le modèle en réseau et le modèle surfacique. Le premier repose sur

deux éléments, le nœud et l'arc tandis que le second intègre la notion de surface à travers l'élément face (Ubeda, 1997 ; Puricelli, 2000). La face est définie comme un cycle du graphe.

Dans leur grande majorité les outils SIG séparent les graphes topologiques en plusieurs couches correspondant aux données de départ. C'est le cas par exemple d'ArcInfo qui produit un graphe topologique par couche géographique. Le graphe est stocké dans un fichier appelé *coverage*, composé d'un fichier de points et d'un fichier d'arcs lorsqu'il s'agit d'un graphe de réseau et d'un fichier de points, d'un fichier d'arcs et d'un fichier de polygones lorsqu'il s'agit d'un graphe surfacique (Zeiler, 1999). Ce mode de stockage pose cependant plusieurs problèmes notamment lorsqu'il s'agit d'imposer des contraintes entre plusieurs couches ou d'établir des relations spatiales inter-couches (Ubeda, 1997). Les traitements deviennent longs et fastidieux et les données peuvent être redondantes d'une couche à l'autre. Or dans le cadre de notre modélisation, nous sommes amenés à exploiter plusieurs sources de données qui partagent des relations spatiales identiques. On peut donner l'exemple d'une ligne représentant un talus situé en bord de parcelle. Dans ArcInfo, la ligne serait représentée à la fois dans le graphe de la couche parcelle et dans le graphe de la couche bocage. Pour s'affranchir de ces limites, nous avons donc fait le choix de fusionner verticalement toutes les données d'entrée du modèle dans une structure topologique unique, le MTH (excepté les données topographiques). Notre approche s'inspire du modèle topologique utilisé par le module TGM du logiciel URIAH et décrit par Ubeda (1997). Il repose sur un graphe géométrique unique sur lequel viennent se rattacher toutes les autres couches thématiques (figure 117). Les arcs constituent les primitives centrales du modèle, stockant la géométrie et les relations topologiques (nœud de départ, nœud d'arrivé, objet à gauche et objet à droite).

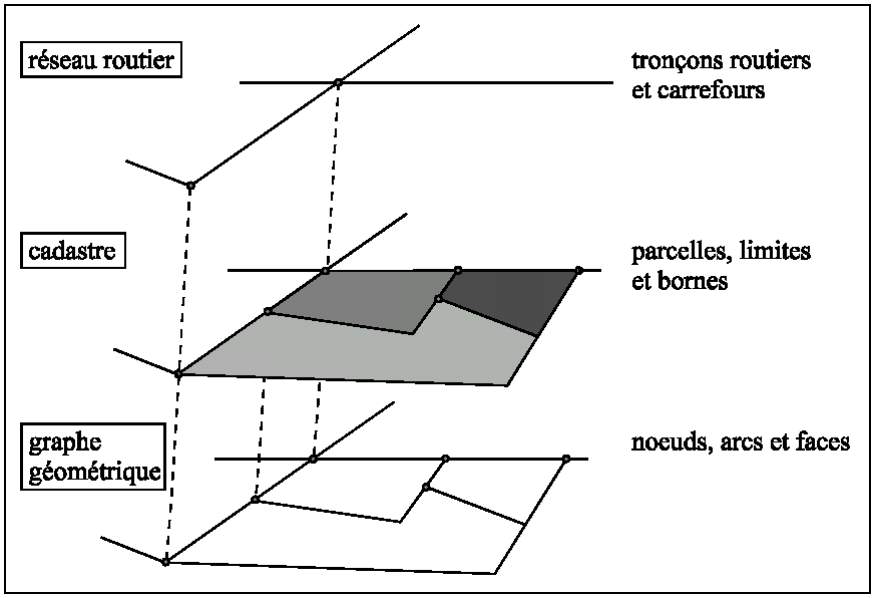


Figure 117. *Le modèle topologique unique (Source : Ubeda 1997)*

Le MTH offre les avantages suivants :

- identification et marquage de toutes les intersections entre les objets géographiques,
- suppression des informations redondantes : une haie et une limite de parcelle sont définies par le même arc.
- fusion verticale complète des données. Les nœuds de toutes les entités géographiques se retrouvent dans le graphe géométrique.
- réalisation de requêtes spatiales avancées grâce aux relations topologiques. Par exemple, quelles sont les parcelles situées sur la rive droite du cours d'eau et à moins de 50 m de celui-ci ?
- simplification de la géométrie des objets tout en conservant les relations spatiales. En s'appuyant sur une couche unique, les opérations de lissage (généralisation), nécessaires parfois pour limiter le nombre de points composant un objet, ne perturbent pas les correspondances spatiales. Les entités géographiques ayant une seule occurrence géométrique dans le modèle, elles sont toutes déplacées simultanément.

Enfin en imposant de transformer les données dans un modèle spatial spécifique, l'utilisateur est contraint de contrôler la qualité des données dont il dispose. Cette stratégie permet de garantir un minimum de cohérence aux données introduites dans la simulation mais nécessite en contrepartie de respecter un certain nombre de règles de correspondance entre les objets (Laurini et Thomson, 1992).

Le tableau 19 résume les relations topologiques autorisées. Il se lit en ligne et colonne, de la gauche vers la droite. Une entité parcelle ne peut se superposer à une entité parcelle, une entité parcelle peut contenir une entité obstacle.

	parcelle	**voirie**	**obstacle**	**axe de drainage**
parcelle	ne peut se superposer à	ne peut se superposer à	peut contenir	peut avoir une frontière partagée avec peut être traversée par
voirie	ne peut se superposer à	ne peut se superposer à	peut avoir une frontière partagée avec ne peut pas contenir.	peut avoir une frontière partagée avec peut être traversé par
obstacle	peut être contenu peut avoir une frontière partagée avec	ne peut être contenu dans peut avoir une frontière partagée avec	ne peut se superposer à	ne peut se superposer à
axe de drainage	peut être contenue. peut avoir une frontière partagée avec	peut traverser peut avoir une frontière partagée avec	ne peut se superposer à	ne peut se superposer à

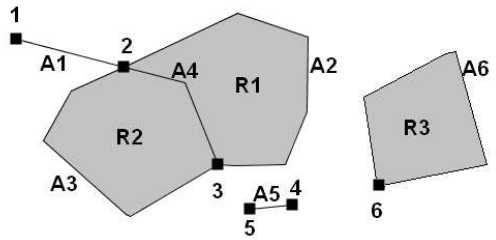
Tableau 19. *Règles de correspondance topologique pour l'intégration des données dans le MTH*

2.2.2. Spécifications du MTH

Le schéma de données du MTH repose sur trois primitives géométriques : le nœud, l'arc et la région (figure 118).

- Un nœud est défini par ses trois composantes X, Y et Z. Il matérialise les extrémités d'un arc.
- Un arc est une succession ordonnée de points, définie par un nœud de départ (nœud_initial) et un nœud d'arrivée (nœud_final). Lorsque ces deux nœuds sont identiques, l'arc est dit fermé. Un arc connaît la région qui se trouve à sa droite (region_droite) et celle à sa gauche (region_gauche). Ces informations sont connues grâce à l'attribution d'une orientation topologique, ici, inverse au sens des aiguilles d'une montre pour les arcs représentant des polygones. Un arc peut décrire plusieurs entités géographiques. Par exemple, un arc peut correspondre à un élément bocager et à une limite de parcelle.
- Une région est délimitée par un ensemble d'arcs formant une surface fermée.

Les primitives graphiques sont stockées dans des tables séparées. Les liens entre les différentes tables sont assurés à partir d'un identifiant géométrique unique (gid) associé à chaque objet (figure 118). La géométrie est stockée implicitement pour chaque élément du modèle, nœud, arc et région.



Nœud

gid
1
2
3
4
5
6

Arc

gid	nœud_initial	nœud_final	region_gauche	region_droite
A1	1	2	-	-
A2	2	3	-	R1
A3	3	2	-	R2
A4	2	3	R1	R2
A5	4	5	-	-
A6	6	6		R3

Région

gid
R1
R2
R3

Figure 118. *Exemple de stockage de l'information topologique dans le MTH (Bocher, 2005, d'après Laurini et Thomson, 1992)*

Chaque MTH est caractérisé par un nom et un système de coordonnées unique. Ce dernier détermine l'unité de mesure et la précision du modèle : degré, mètre, kilomètre.

La figure 119 propose une représentation conceptuelle du MTH. Le MTH est fondé sur un modèle classique de type objet-relation (Parent *et al.*, 1997). Il repose sur les concepts d'objet, d'association, d'attribut et de cardinalité.

- un **objet** représente une entité du monde réel que l'on souhaite modéliser. Il s'agit par exemple d'un polygone représentant une parcelle ;

- un **attribut** représente une propriété du monde réel. Il peut être simple ou complexe facultatif ou obligatoire. Geom est un attribut complexe et obligatoire utilisé pour stocker la géométrie d'un objet. Gid est un attribut simple et obligatoire utilisé pour numéroter les objets et réaliser les adressages entre les tables du modèle. Les attributs obligatoires sont les propriétés nécessaires à la cohérence structurelle du MTH.

- une **association** représente un lien entre deux ou plusieurs objets ;

- les **cardinalités** permettent de caractériser le lien qui existe entre un objet et une relation. La cardinalité d'une relation est composée d'un couple comportant une borne maximale et une borne minimale, intervalle dans lequel la cardinalité d'une entité peut prendre sa valeur. Ainsi, selon la figure 119, un objet arc peut correspondre à un et un seul objet axe de drainage tandis qu'un objet axe de drainage peut correspondre à plusieurs objets arc. Dans le même esprit, un objet région correspond à un et un seul objet parcelle et un objet parcelle correspond à un ou plusieurs objets région.

Le MTH permet la structuration des données d'organisation du territoire, cependant ce dernier n'intègre pas la composante altimétrique. Cette dernière est stockée dans un autre modèle de données, le TIN.

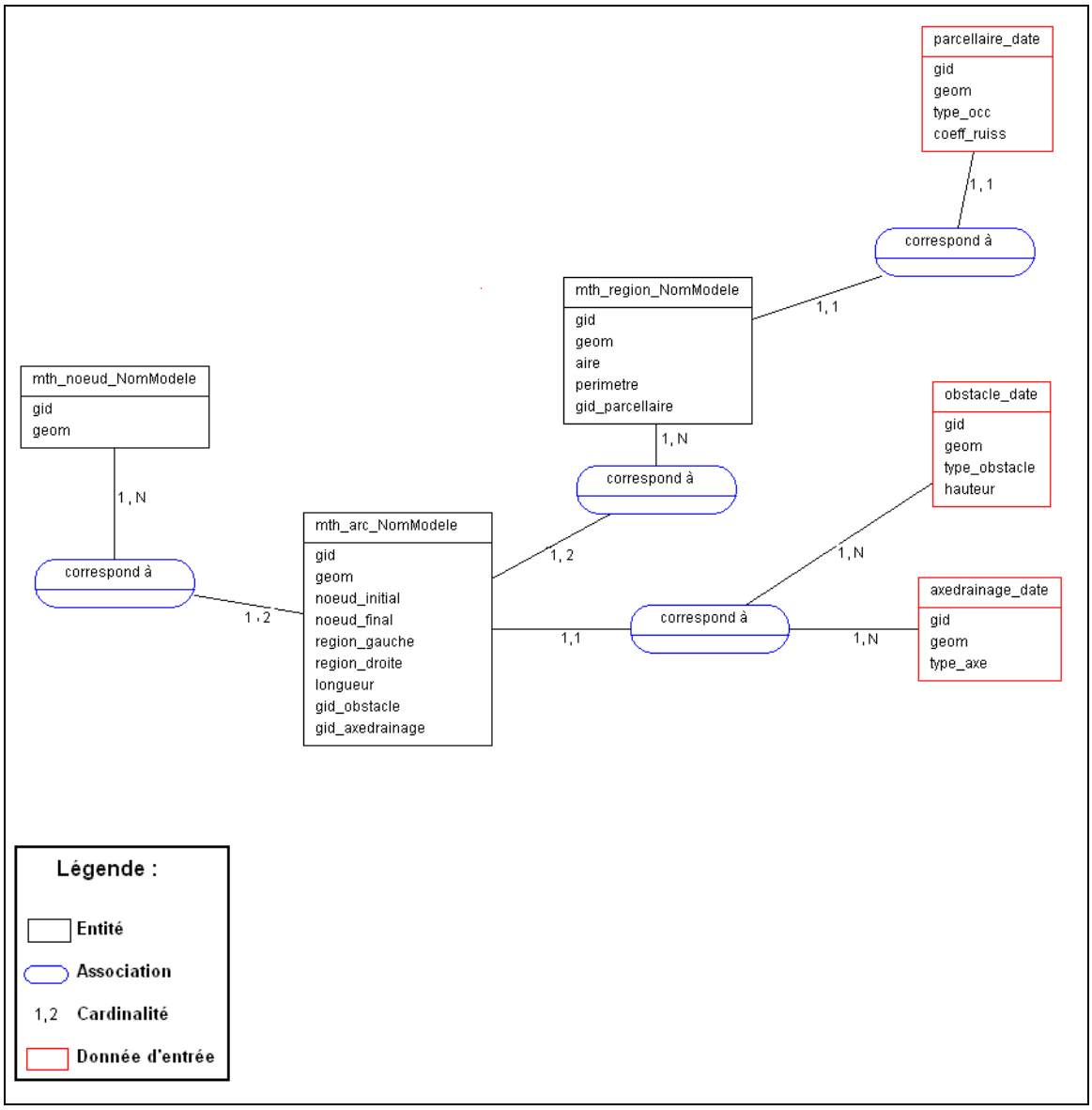


Figure 119. Modèle conceptuel de données du *MTH (Bocher, 2005)*

2.3. Le modèle TIN

Le modèle TIN reprend les principes d'organisation de l'information spatiale définis dans le MTH. Sa structure est inspirée d'un modèle de type graphe RZ topologique (Langlois, 1994). Cette dernière a été retenue pour accélérer la recherche de données, c'est-à-dire la récupération des propriétés interne du TIN. Toutefois, contrairement à Langlois et Delahaye (2002) qui déduisent les faces à partir de la topologie des arcs, dans notre cas nous avons opté pour un stockage implicite de chaque géométrie.

Le modèle de données du TIN s'organise autour de trois objets : face, arc et nœud.

- **Un nœud est un point appartemant à un arc.** Un nœud est défini par le tuple de coordonnées X Y et une composante Z qualifiant l'altitude. Il possède trois attributs obligatoires (en rouge) :
    - gid : identifiant interne
    - geom : attribut de stockage de la géométrie
    - gid_mth_nœud : identifiant interne de la table nœud du MTH.

- **Un arc est composé uniquement de deux nœuds.** Un arc possède neufs attributs obligatoires pour la cohérence structurelle du modèle et six attributs facultatifs déduit lors de la construction du graphe de cellules.
    - gid : identifiant interne
    - geom : attribut de stockage de la géométrie
    - nœud_initial : identifiant du nœud de départ par rapport au sens de triangulation
    - nœud_final : identifiant du nœud de départ par rapport au sens de triangulation
    - face_gauche : identifiant de la face à gauche par rapport au sens de triangulation
    - face_droite : identifiant de la face à droite par rapport au sens de triangulation
    - arc_suivant_gauche : identifiant de l'arc suivant par rapport au sens de triangulation
    - arc_suivant_droit : identifiant de l'arc suivant droit par rapport au sens de triangulation
    - gid_mth_arc : identifiant interne de la table arc du MTH
    - TypeCell : qualification morphologique de la cellule (pente à gauche, talweg…)
    - cp-gauche : qualification de la propriété de transfert à gauche de l'arc
    - cp-droit : qualification de la propriété de transfert à droite de l'arc
    - hauteur : hauteur de l'obstacle
    - accumulation = surface totale accumulée dans une cellule

- **Une face est déterminée par trois arcs formant un triangle.** Elle possède quatre attributs obligatoires (en rouge) et un attribut facultatif.
    - gid : : identifiant interne
    - geom : attribut de stockage de la géométrie
    - premier_arc : identifiant de l'arc
    - gid_mth_region : identifiant interne de la table région du MTH

Les liens entre les objets du TIN et les objets du MTH sont assurés à partir d'identifiants géographiques uniques (gid). La figure 120 formalise les schémas de données du MTH et du TIN. On peut lire que :

- la table des arcs du MTH est reliée à la table des arcs du TIN à partir de l'attribut gid_mth_arc,
- la table des nœuds du MTH est reliée à la table des nœuds du TIN à partir du gid_mth_nœud,
- la table des régions du MTH est reliée à la table des faces du TIN à partir du gid_mth_region,
- les couches contenant les données topographiques ne sont reliées qu'au TIN,
- les couches décrivant l'organisation du territoire ne sont reliées qu'au MTH.

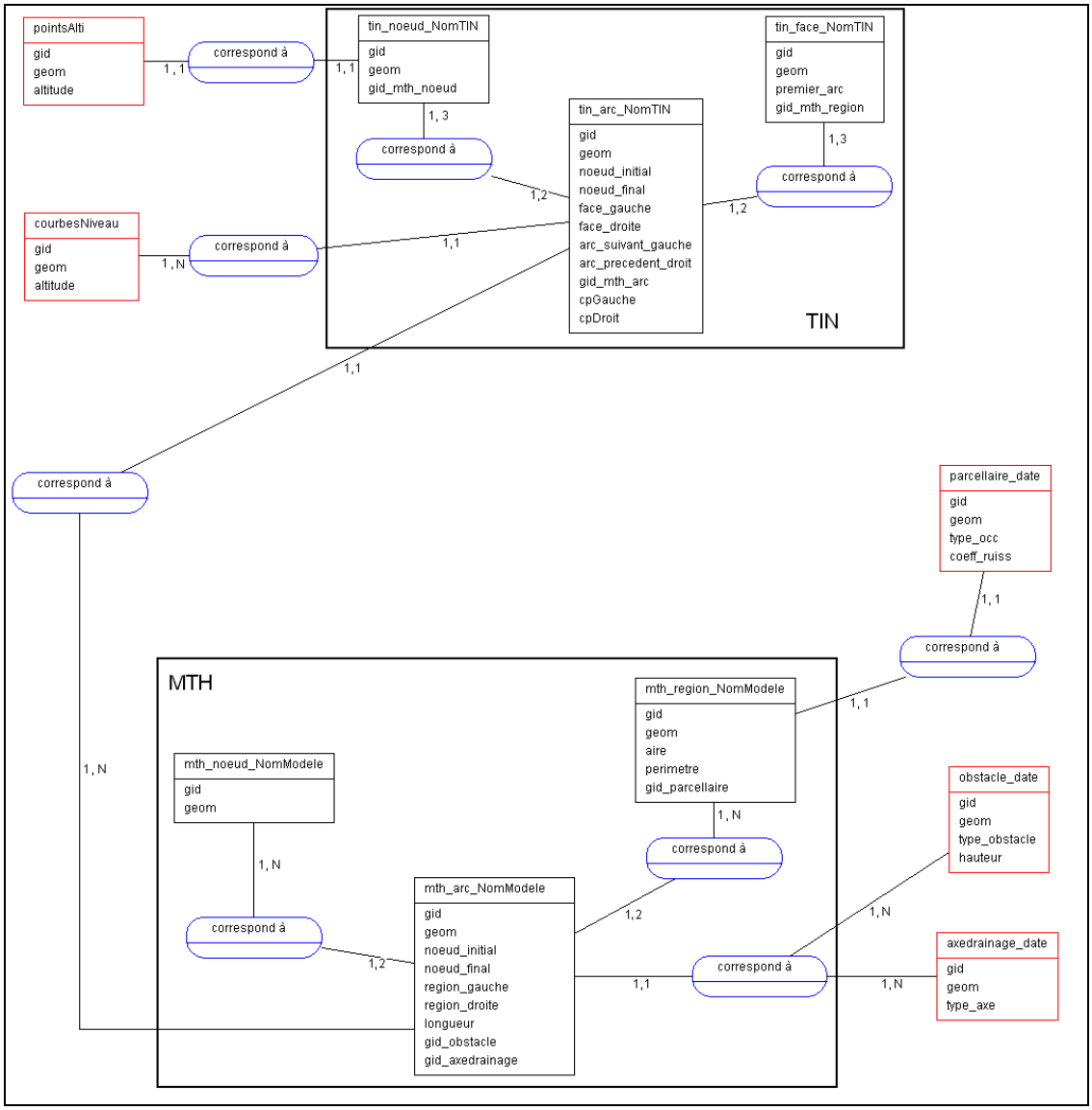


Figure 120. *Schéma conceptuel global des modèles de donnés utilisés pour la modélisation (Bocher, 2005)*

Conclusion du chapitre 5

Dans ce chapitre nous avons défini un schéma théorique de modélisation pour spatialiser l'impact des activités humaines sur le parcours des écoulements de surface à l'échelle du bassin versant. Ce schéma fonctionne à partir de trois couches géographiques vectorielles (parcellaire, obstacle et axe de drainage) qui représentent l'organisation du territoire. Ces couches sont intégrées dans un MNT TIN produit à partir d'un fichier de courbes de niveau. Le TIN produit (TIN contraint) constitue le composant de base de la chaîne de modélisation. Il permet, en lien avec les données d'organisation du territoire, de construire dans un premier temps un graphe de cellules (traduction topographique des directions d'écoulements) puis dans un second temps un graphe de bassins (expression des interactions entre la topographie et les aménagements linéaires). Le graphe de bassins est ensuite couplé avec un automate cellulaire pour simuler dynamiquement la réponse du bassin versant.

Pour parvenir au graphe de bassins, l'utilisateur doit auparavant structurer ses données selon un modèle spécifique : le Modèle Topologique Hybride (MTH). Cette étape n'est pas sans conséquence. Le stockage des données dans un modèle topologique, qui plus est avec une structure géométrique unique, sera inévitablement une limite pour la flexibilité de la modélisation. Par exemple, toute modification sur les données d'entrée imposera de recalculer les liens topologiques entre les objets du MTH et *ipso facto* du TIN. Pour des volumes de données importants, cette contrainte peut s'avérer difficile à respecter. Les opérations de correspondance géométrique entre les objets et le respect des règles topologiques posent des problèmes complexes d'algorithmie (Devogele, 1997). De plus, les temps de calculs peuvent être considérablement augmentés et ce malgré l'emploi de techniques de traitements ciblés, comme le fait d'isoler uniquement les nouveaux objets à intégrer (Devogele, 1997 ; Ubeda, 1997).

Le MTH doit être vu ici comme un « filtre structurel » qui, en contraignant l'utilisation d'un modèle de données spécifique, a pour objectif non seulement de faciliter les traitements spatiaux mais aussi de contrôler la qualité des données. Le respect de règles d'organisation, de définition des objets par rapport au terrain nominal, nous a semblé une condition *sine qua non* pour approcher une modélisation cohérente. A l'instar de Puech (2003), nous considérons qu'une donnée ne peut être intégrée dans un schéma de modélisation ou un SIG tel un « caddy » sans respecter un formalisme de base. Le MTH doit être considéré comme un garde-fou pour la modélisation.

Chapitre 6. Mise en œuvre de la modélisation dans un environnement SIG

L'application du schéma de modélisation décrit dans le chapitre 5 a conduit au développement de trois programmes informatiques (modules).

- un module de préparation des données : **VectorProcess**,
- un module de triangulation : **TopoTIN**,
- un module de modélisation spatiale : **HydroTIN.**

Ces trois modules sont intégrés dans l'environnement du SIG OpenJump. Le choix de ce logiciel et de ces outils associés est précisé dans l'annexe 5. Dans ce chapitre, nous réalisons une description détaillée des techniques mises en œuvre pour répondre aux objectifs retenus : à partir d'un MNT à mailles triangulaires, modéliser spatialement l'influence des aménagements sur le cheminement des écoulements de surface.

Il est important de mentionner que lors des phases de conception certains ajustements méthodologiques se sont avérés nécessaires. Nous les décrirons.

1. Le module VectorProcess

Le module VectorProcess (traitements vectoriels) est une extension intégrée à l'environnement SIG OpenJump qui permet de mettre en cohérence les données géographiques, puis de construire la structure topologique MTH. Les traitements sont réalisés à l'aide de la librairie JTS et organisés dans un esprit d'outil générique dans le but de rendre l'extension utilisable et lisible à d'autres fins que notre modélisation.

Nous présentons le protocole retenu pour préparer les données selon les règles topologiques définies dans le chapitre 5. Ce protocole ne doit pas être considéré comme universel compte tenu de la diversité des configurations géométriques possibles et des sources de données. Cependant, il constitue une base de départ cohérente pour éliminer la plupart des situations conflictuelles. Deux étapes sont distinguées : la mise en cohérence des données et la construction de la topologie.

1.1. Mise en cohérence des données d'entrée

Les traitements sont décomposés en deux catégories : les traitements propres à une seule couche comme par exemple la recherche de superposition de polygones dans la couche parcellaire et les traitements entre couches comme par exemple l'appariement des entités de la

couche obstacle sur les frontières des entités de la couche parcellaire. Pour faciliter la lecture ces traitements sont regroupés dans deux tableaux (tableau 20 et tableau 21).

Opération	Couche géographique	Descriptif	Procédé
Vérification géométrique	Toutes les couches	Pour chaque couche, il s'agit de rechercher les entités géographiques composées de plusieurs parties. Une entité composée de plusieurs parties est décomposée en autant d'entités que de parties qui la composent. Pour chaque couche, on vérifie s'il n'existe pas d'entité sans géométrie.	Automatique Fonction Explode Automatique Fonction Geometry Empty
Vérification topologique	Toutes les couches	Il s'agit de rechercher les erreurs topologiques appelées aussi erreurs de géométrie (polygone dégénéré, croisement de ligne sans nœud).	L'identification des erreurs topologiques est automatique mais les corrections doivent être réalisées une par une. Fonction Topology Errors
Superposition (*overlaps*)	Toutes les couches	Pour chaque entité d'une couche, on vérifie si elle ne se superpose pas avec une ou plusieurs autres entités. Si tel est le cas alors l'entité analysée ainsi que les entités qui l'intersectent sont exportées dans une nouvelle couche.	L'identification est automatique mais les corrections sont manuelles. Fonction Overlaps

Tableau 20. *Opérations spatiales sur une seule couche.*

Opération	Couche géographique n° 1	Couche géographique n° 2	Descriptif	Procédé
Appariement géométrique	parcellaire	obstacle axe de drainage	L'appariement géométrique consiste à déplacer les entités d'une couche cible vers les entités d'une couche de référence. L'accrochage est paramétré par une distance en mètre. Dans notre cas, seule la couche parcellaire est considérée comme une couche de référence. Une distance d'un mètre est attribuée par défaut.	L'appariement est automatique. Les entités déplacées sont exportées dans une nouvelle couche avec leur position d'origine afin de permettre un contrôle des résultats. Fonction Snapping
Overlaps	obstacle	axe de drainage	Il s'agit ici de rechercher les entités de la couche 1 qui se superposent avec les entités de la couche 2.	L'identification est automatique, la correction manuelle. Fonction Overlaps
	obstacle	parcellaire	Les entités de la couche obstacle qui s'intersectent avec les entités voirie de la couche parcellaire sont identifiées puis supprimées. Si l'entité obstacle traverse une entité voirie et une entité parcelle alors seul le tronçon contenu ou en frontière avec la parcelle est conservé.	Le procédé est automatique. Fonction Special Overlaps

Tableau 21. *Opérations spatiales entre couches*

1.2. Construction de la topologie

La construction de la topologie est l'étape la plus délicate. Elle consiste à unir verticalement les couches nettoyées pour finaliser la construction du Modèle Topologique Hybride (MTH).

Dans un premier temps, un graphe surfacique planaire est produit à partir de la couche parcellaire. La couche est décomposée en trois fichiers : nœud, arc, face.

Dans un deuxième temps, les couches obstacle et axe de drainage sont appariée successivement à la couche arc. L'objectif final est de retrouver dans la couche arc les entités des couches appariées. La méthode est décomposée en trois étapes :

- **Etape 1 :** Il s'agit d'un processus d'appariement géométrique qui consiste à ajuster les entités d'une couche X sur une couche de référence. Les sommets et les noeuds constituent les géométries de base pour cette opération. Selon l'exemple théorique de la figure 121, l'arc 1 d'une couche b (arc 1b) sera enrichi des nœuds de l'arc 1 de la couche a (arc 1a). L'arc 1b est décomposé en trois arcs 1b', 1b'' et 1b'''.
- **Etape 2 :** Elle comprend deux opérations :
    - Une opération d'appariement sémantique. Les attributs des entités de la couche a ayant une correspondance dans la couche b sont transférés aux entités de la couche arc (*Mapping attributes* en anglais). Ici, les attributs de 1a sont transmis à 1b''. L'appariement sémantique peut prendre deux formes : soit le schéma de données de la couche b est modifié pour intégrer les attributs de la couche a, soit une table de correspondance est construite pour réaliser un lien entre la couche de référence (couche b) et la couche appariée (couche a).
    - Une opération de « clonage » des géométries. Les entités de la couche a n'ayant pas de correspondance dans la couche b sont dupliquées dans celle-ci.
- **Etape 3 :** Elle consiste à mettre à jour les relations topologiques pour la couche de référence : réordination des nœuds, actualisation de la topologie planaire.

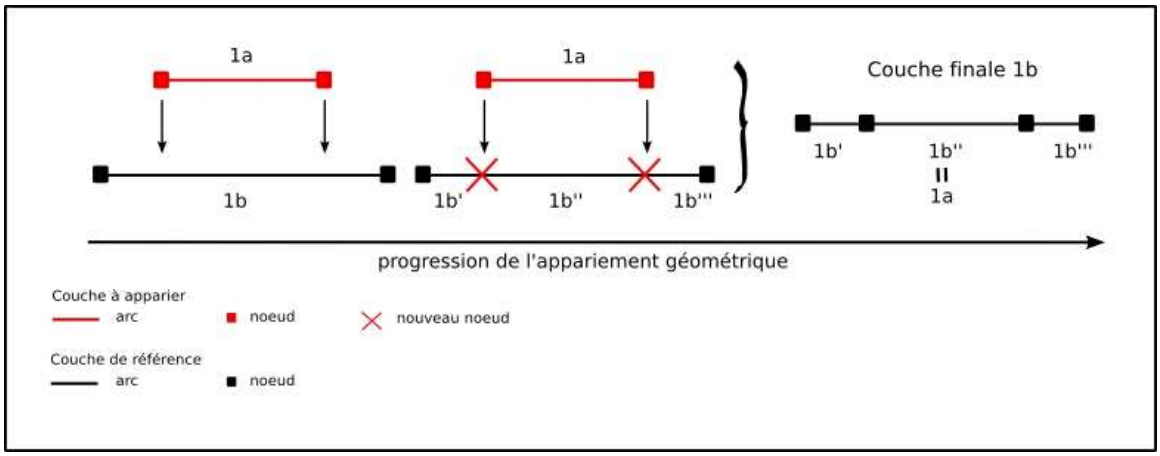


Figure 121. *Schématisation de l'opération d'appariement géométrique vertical (Bocher, 2005)*

A l'issue de cette phase les couches nœud, arc et face sont stockées dans une base de données PostGIS. Elles forment un MTH. L'exportation des données d'OpenJump vers Postgis est réalisée à partir d'un *plugin* développé par la société *Refractions Research*[37].

[37] Source : http://jump-pilot.sourceforge.net/index.php

2. Le prototype TopoTIN

Le prototype TopoTIN est le module utilisé pour construire le TIN contraint. TopoTIN a été développé en C++ à partir de la librairie GTS. Cette dernière a été retenue parce qu'elle comprend une multitude de fonctionnalités et de procédures mathématiques robustes permettant de réaliser une triangulation de Delaunay simple ou contrainte en 2D comme en 3D (figure 122). Enfin elle est distribuée sous licence libre GPL. TopoTIN est intégré à l'environnement d'OpenJump sous la forme d'une extension.

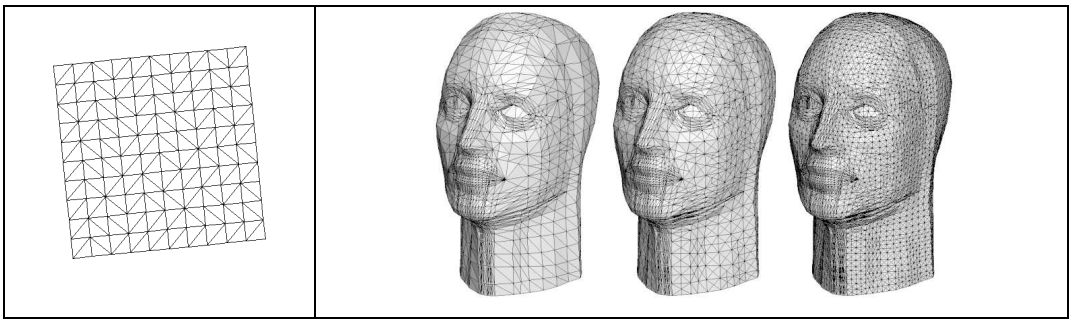


Figure 122. *Exemples de triangulation réalisée avec la librairie GTS : à gauche une triangulation régulière, à droite des triangulations contraintes à différentes résolutions (raffinement)*

(Source : http://gts.sourceforge.net/, consulté en 2005)

La production du TIN est déclinée en trois grandes étapes : production d'un **TIN standard**, production d'un **TIN amélioré** et enfin production d'un **TIN contraint** (figure 123). Ces étapes correspondent à différents degrés d'enrichissement du TIN. Le TIN constitue la source de données principale pour la modélisation des écoulements. Sa construction nous a conduit à mettre en place une démarche méthodologique spécifique. Dans ces paragraphes, nous présenterons à partir d'un extrait de données du bassin versant du Sterenn, l'ensemble des procédés mis en œuvre. Cet extrait a été produit à partir des données présentées dans le chapitre 4. Les données sont supposées cohérentes et le MTH calculé. L'étendue représente 1/5ème de la superficie du Sterenn. Concernant les données topographiques, l'absence de ressource pour ce thème nous a conduit à numériser les courbes de niveau représentées sur le scan de la carte topographie au 1/25 000 de l'IGN.

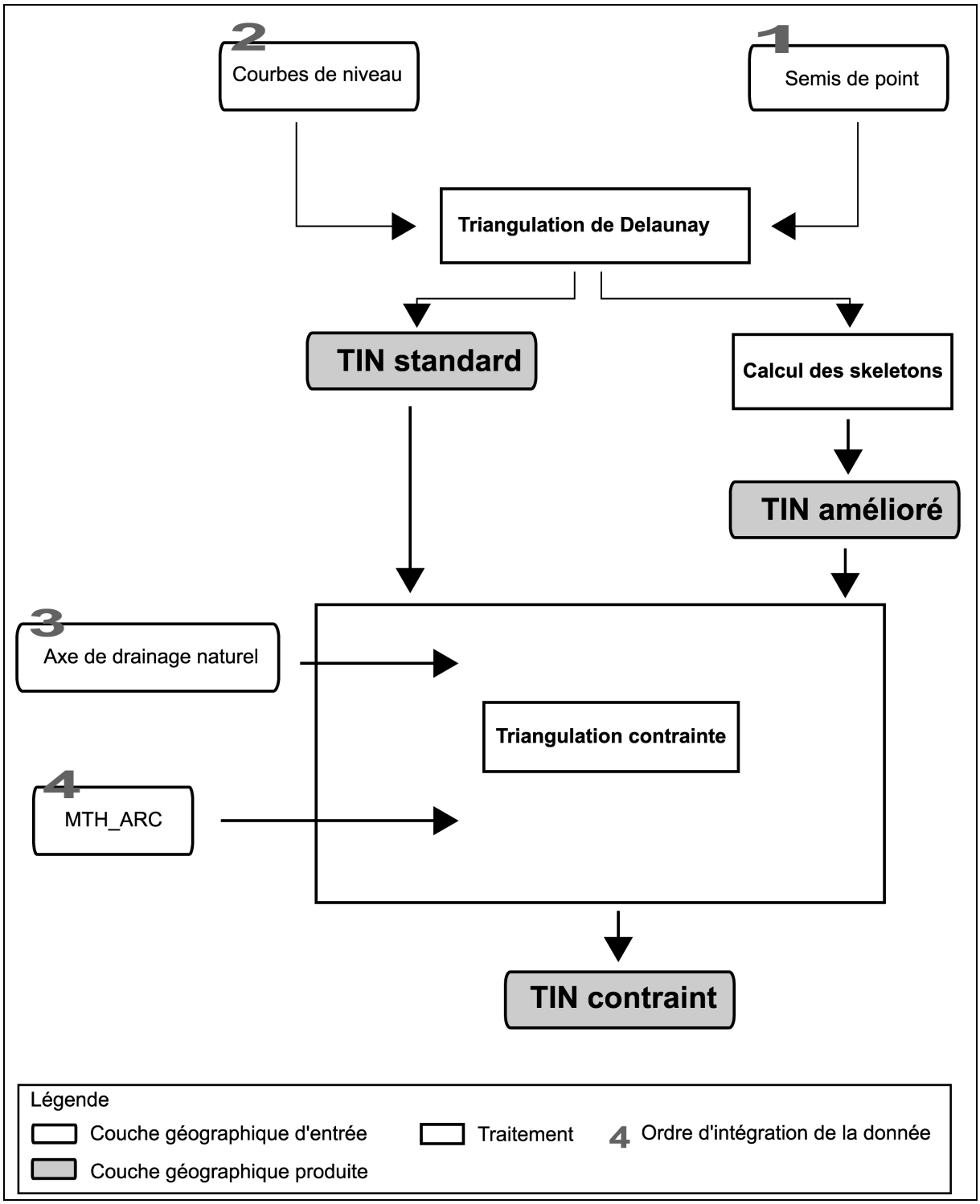


Figure 123. Schéma des principales étapes de la *triangulation (Bocher, 2005)*

2.1. Production du TIN standard et amélioré

2.1.1. Le TIN standard

Le TIN standard est produit à partir d'une triangulation de Delaunay. Les triangles sont composés à partir des points des courbes de niveau. Afin d'éviter les franchissements de courbes de niveau et par conséquent des représentations incorrectes de la topographie, la triangulation est contrainte sur les segments des courbes. Sur la figure 124, on peut observer la différence de triangulation au niveau de la courbe ayant la valeur 65.

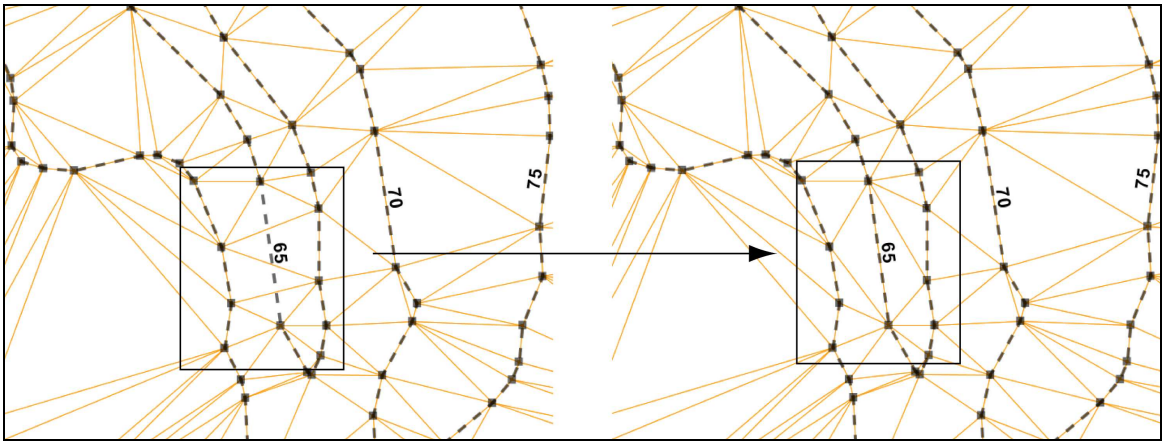


Figure 124. *A gauche une triangulation à partir des points des courbes, à droite une triangulation contrainte par les courbes (Bocher, 2005)*

2.1.2. Le TIN amélioré

La construction d'un TIN à partir des courbes de niveau génère de nombreux triangles plats dans les courbures de lignes (Barbalić et Omerbegović, 1999 ; Zhu et Schneider, 1999 ; Gold et Dakowicz, 2002). Ces triangles plats posent des problèmes pour le calcul d'un arbre de drainage continu car leur pente est nulle. Pour éliminer ces artefacts dont l'origine est liée à l'algorithme de triangulation nous avons retenu la méthode des « skeletons » (Gold et Dakowicz, 2002). Cette méthode permet de produire un MNT où la continuité topographique est assurée entre les différentes isolignes d'altitudes et ceci sans utiliser de procédures de simplification telles que celles proposées avec les algorithmes de sélection de points importants (cf. méthode VIP -Very Important Point- dans ArcInfo)(Vivoni *et al*, 2004).

Le protocole de suppression des triangles plats que nous avons mis en œuvre repose sur une chaîne de traitements décomposés en trois grandes étapes.

- calcul et extraction des branches de skeletons,
- évaluation des altitudes des branches de skeleton,
- intégration des branches de skeleton dans la triangulation.

2.1.2.1. Le calcul des skeletons et l'extraction des branches

A partir des points des courbes de niveau, nous calculons un diagramme de Voronoi à partir duquel sont extraits les skeletons (figure 125). Les skeletons correspondent aux contours des polygones de Voronoi inclus entre deux courbes de niveau ou dans une courbe de niveau fermée. Les skeletons sont séparés en deux catégories : le corps et les branches (crust). Cette séparation est réalisée à l'aide d'un algorithme de parcours de réseau (figure 125). Seules les branches sont utilisées dans la triangulation car elles correspondent aux zones où sont localisés des triangles plats (Gold et Dakowicz, 2002).

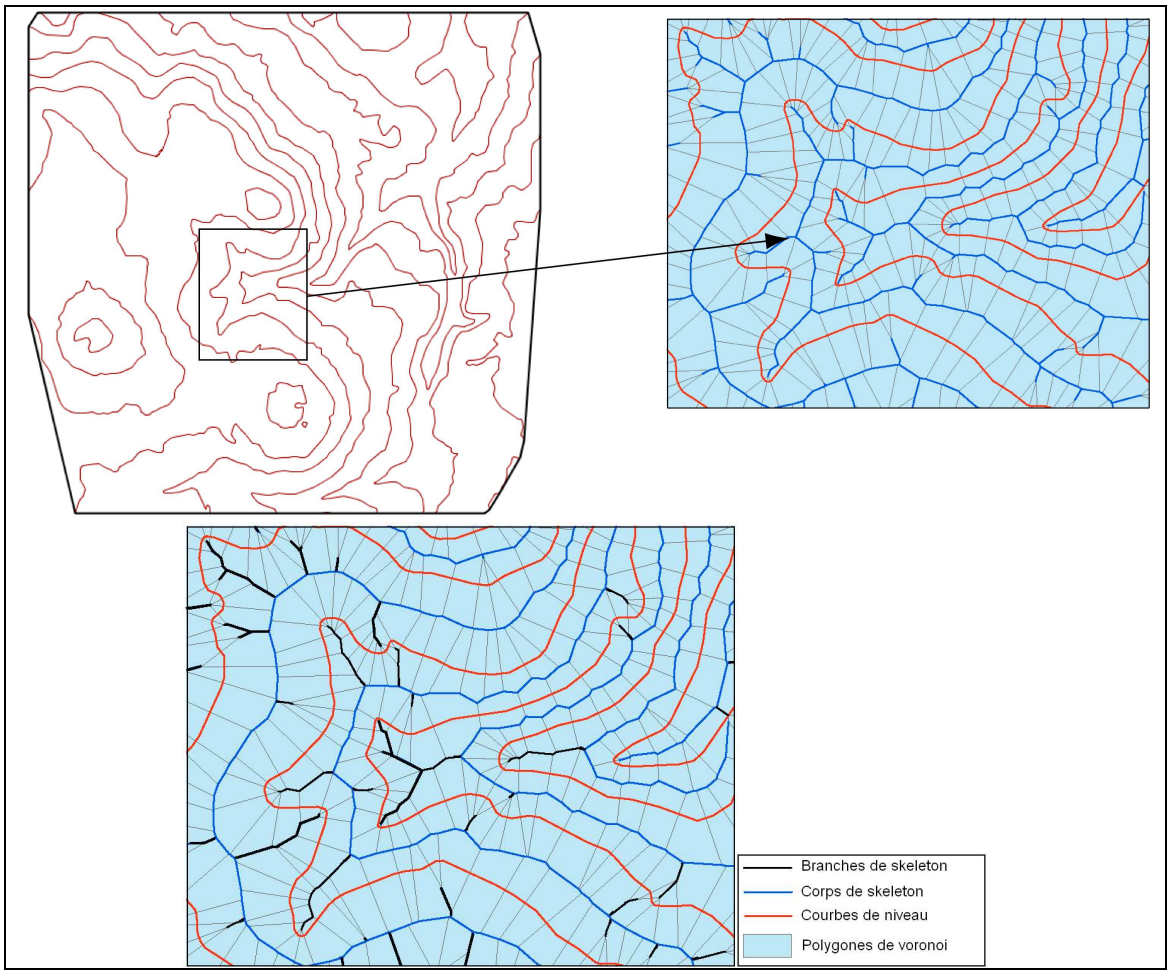


Figure 125. *Calcul et hiérarchisation des skeletons à partir des courbes de niveau (Bocher, 2005)*

2.1.2.2. L'évaluation des altitudes des branches de skeleton

La seconde étape consiste à évaluer les altitudes des points composant chaque branche de skeleton afin que celles-ci puissent être introduites dans la triangulation pour corriger les triangles plats.

Nous appellerons :

- nœud, les extrémités des branches et les points où se croisent plusieurs segments,
- sommet, les points intermédiaires d'une branche,

Nous distinguerons :

- les nœuds formés par la jonction d'une branche et du corps du skeleton,
- les nœuds extrémités des branches,
- les nœuds formés par la jonction des segments d'une branche.

Ces nœuds seront notés respectivement : Njonction, Nbranche et Nsegment. Les points intermédiaires seront notés Psommet.

Le calcul des altitudes des points des branches est inspiré de la méthode « Valley lenght » (Gold et Dakowicz, 2002). Cette méthode consiste à calculer l'altitude du nœud branche à partir de deux distances obtenues en reliant les extrémités de la branche au point le plus proche des deux courbes de niveau qui la bornent (figure 126).

Soit Z la valeur du nœud branche à calculer, Z1 et Z2 l'altitude des courbes de niveau, la formule s'écrit :

$$\mathbf{Z = Z1 + (Z2-Z1)*d/D}$$

Ou **Z1 > Z2**

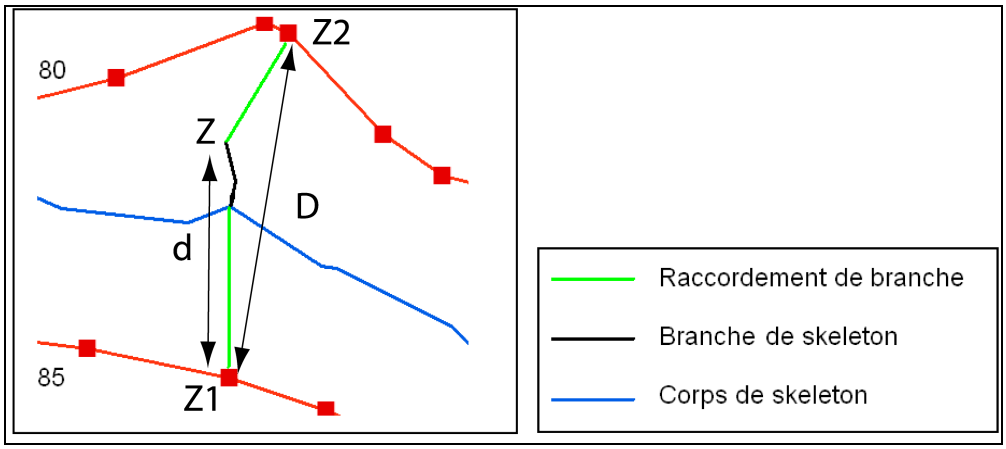


Figure 126. *La méthode « Valley lenght » d'après Gold et Dakowicz, 2002 (Bocher, 2005)*

Si la branche est composée de plusieurs points sommet, leur altitude est calculée selon le même principe.

Relativement facile à mettre en place pour des cas simples, cette méthode impose en revanche des routines algorithmiques plus complexes lorsque la branche est formée de plusieurs segments. Pour calculer les altitudes de tous les points, il faut alors recomposer le chemin parcouru depuis chaque nœud branche jusqu'au nœud de jonction (figure 127).

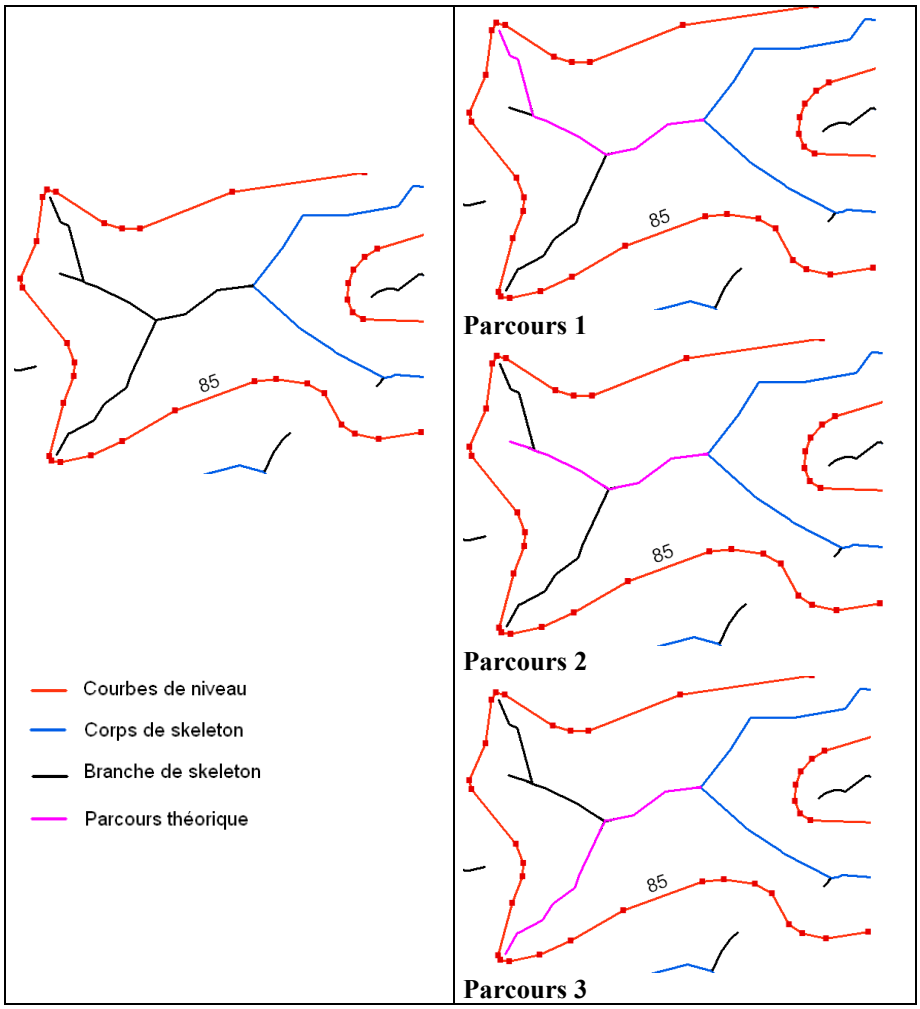


Figure 127. *Exemple de branche complexe et détails des étapes de parcours pour le calcul des distances (Bocher, 2005)*

Cette phase est la plus délicate car elle nécessite de choisir des parcours de référence. En effet, dans les cas complexes comme celui de la figure 6-9, certains points sommets sont inclus dans les trois parcours. La valeur d'un point sommet situé sur le tronçon aval du parcours 3 peut ainsi être estimée aussi bien par les altitudes des nœuds extrémités du parcours 1 que 2. Or le choix de l'un ou l'autre des parcours n'est pas anodin. Les altitudes peuvent être sur ou sous-évaluées.

Face à ces situations, Thibault et Gold (2000) proposent d'utiliser la branche ayant le parcours le plus long comme ligne de référence (figure 128). Ainsi,

- pour le tronçon 1 commun aux parcours A et B, les valeurs d'altitude des sommets seront interpolées sur la base des distances du parcours A.
- pour le tronçon 2 commun aux 3 parcours, le parcours B sera utilisé comme référence.

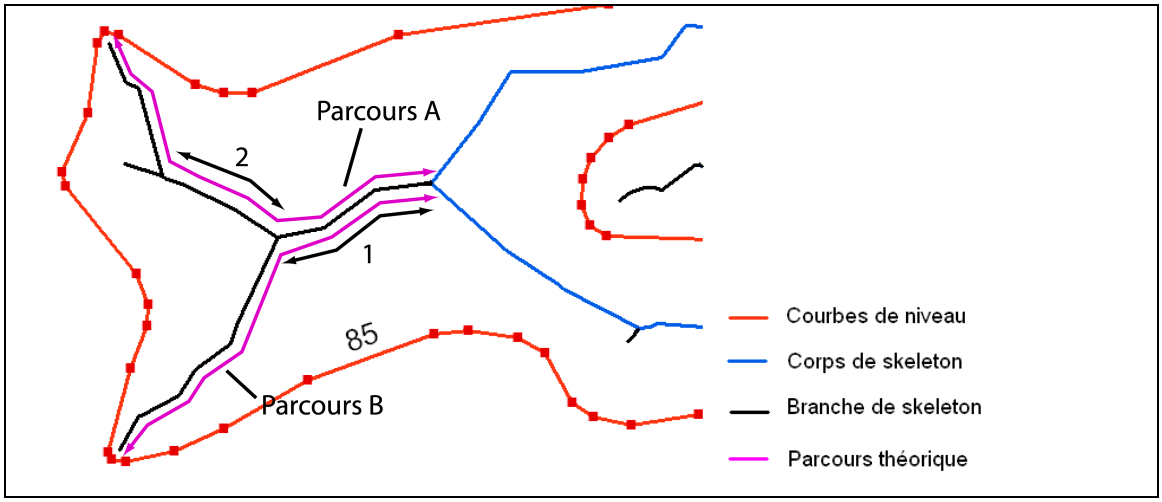


Figure 128. *Sélection d'un parcours de référence pour l'interpolation des valeurs des points sommets communs à au moins deux parcours (Bocher, 2005)*

Comme on peut le voir sur la figure 129, cette solution fonctionne bien lorsque les branches de skeleton sont localisées entre deux courbes de niveau, fond de talweg ou ligne de crête. Elle permet d'obtenir des valeurs d'altitudes cohérentes, décroissantes de l'amont vers l'aval.

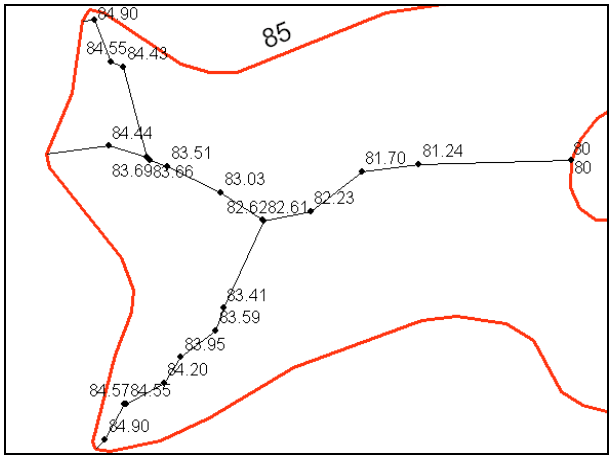


Figure 129. *Résultat de l'interpolation des altitudes des points de la branche skeleton selon la méthode proposée par Gold et al (Bocher, 2005)*

Toutefois, cette méthode doit être adaptée pour certaines configurations géométriques telles que les courbes de niveau fermées ou les bords de couche. Un bord de couche correspond à la limite de représentation graphique des objets d'une couche.

2.1.2.3. Application à des cas particuliers

a. Le cas d'une courbe de niveau fermée

La courbe de niveau fermée est une configuration qui pose problème pour le calcul des altitudes dans le sens où les raccordements des branches ont la même valeur altimétrique (figure 130). Gold et Dakowicz (2002) ont cependant résolu ce problème en admettant l'hypothèse que la courbe fermée représente dans la réalité une zone sur-élevée. Dans ce cas, les auteurs ajoutent aux points du corps skeleton une hauteur qu'il somme avec la valeur d'altitude de la courbe fermée. Cette nouvelle valeur est ensuite utilisée pour calculer les altitudes manquantes selon le principe évoqué précédemment. Le corps du skeleton sert alors de ligne de niveau complémentaire.

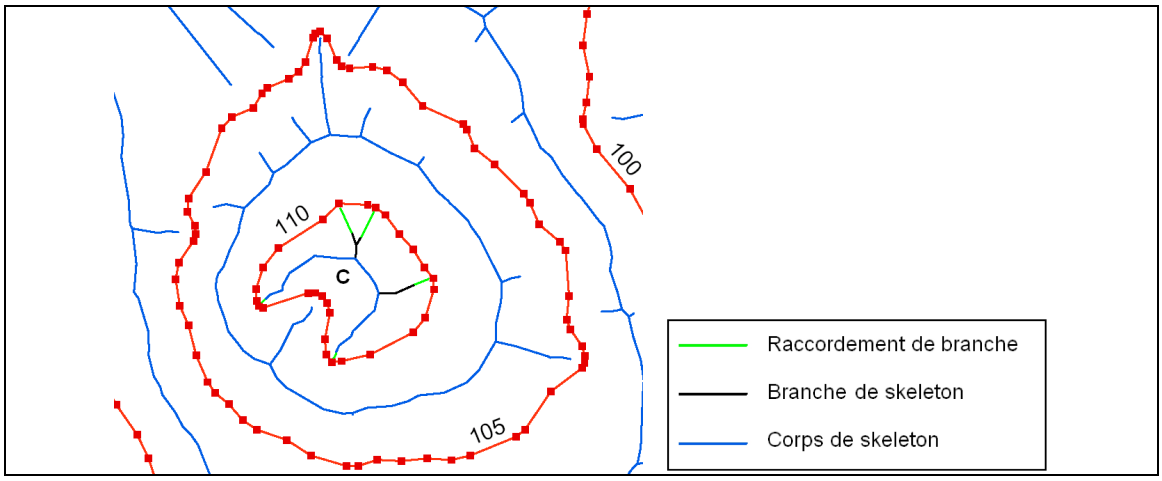


Figure 130. *Représentation d'une courbe de niveau fermée et de son skeleton (Bocher, 2005)*

b. Le cas des bords de couche

Le problème des bords de couche n'a pas été évoqué par les auteurs ayant travaillé sur l'extraction des skeletons à partir de courbes de niveau. Or lorsqu'une branche de skeleton est située en limite d'extension de la couche courbes de niveau, la valeur d'altitude de son nœud terminal ne peut être explicitement connue.

Trois situations sont identifiées :

1. la branche de skeleton est en position de talweg (figure 131),
2. la branche de skeleton est en continuité avec la pente (figure 133),
3. la branche de skeleton est en position de sommet (figure 134).

1. Lorsque la branche de skeleton est en position de talweg

Pour que la branche de skeleton soit considérée en position de talweg :

- elle doit être bordée par une courbe de niveau ayant la même valeur d'altitude

et

- les courbes de niveau adjacentes doivent avoir une altitude supérieure à la courbe qui la borde (figure 131).

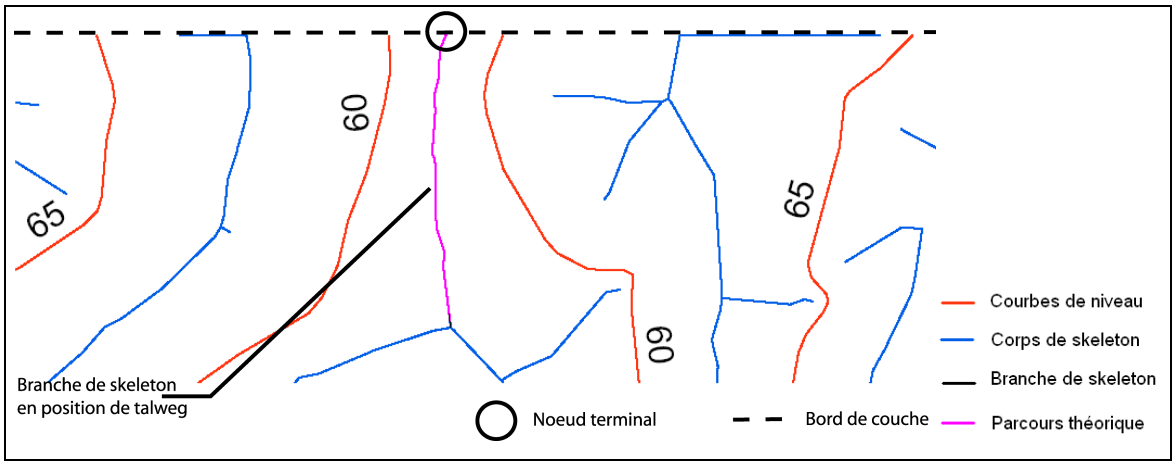


Figure 131. *Branche de skeleton en position de talweg (Bocher, 2005)*

Pour corriger ce problème, deux solutions sont envisageables.

- **Première solution**

Relier les deux points extrémités de la courbe des 60 m par un segment. Ajouter au centre de ce segment un point dont l'altitude correspondra à l'altitude de 60 m auquel est soustraite une valeur de décaissement afin de creuser un exutoire. L'altitude du nœud terminal du skeleton est ensuite interpolée linéairement le long de ce segment (figure 132).

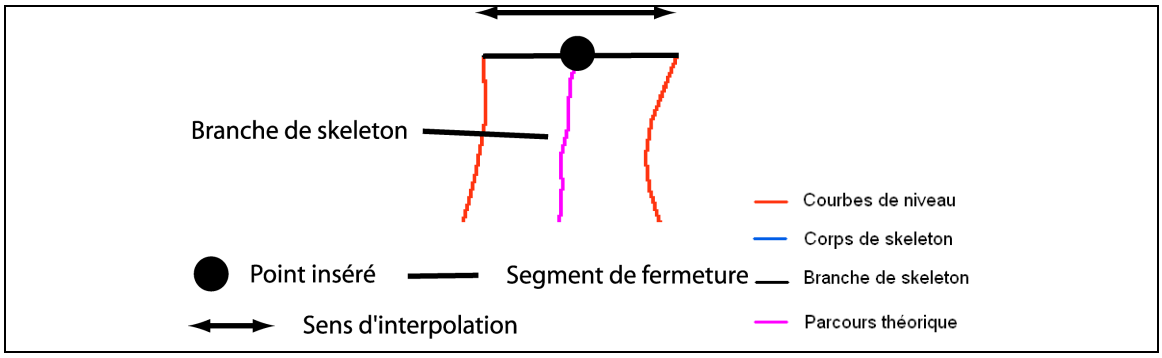


Figure 132. *Schématisation de la méthode de fermeture de la courbe talweg (Bocher, 2005)*

Avantage

La méthode peut être facilement automatisée et les corrections réalisées à la volée pendant la triangulation.

Inconvénients

La courbe de niveau qui borde le skeleton doit se terminer de part et d'autre symétriquement afin d'éviter une évaluation erronée de l'altitude entre les deux courbes.

La valeur de décaissement retenue peut perturber fortement les valeurs d'altitude du TIN notamment si la branche de skeleton marque la fin d'un talweg principal.

- **Deuxième solution**

Détecter cette configuration lors de l'étape de vérification des données d'entrée et proposer à l'utilisateur de définir lui-même la valeur d'altitude du nœud terminal. Le nœud pouvant ensuite être intégré dans la triangulation comme un point coté.

Avantages

Permet de contrôler chaque configuration individuellement et donc d'anticiper les erreurs éventuelles.

Inconvénients

Procédure qui peut être longue et fastidieuse notamment si le fichier de courbes de niveau est important.

Cette deuxième solution pouvant aussi être appliquée aux autres cas, nous ne la développerons pas.

2. Lorsque la branche de skeleton est en continuité avec la pente

Pour que la branche de skeleton soit considérée en continuité avec la pente, les deux courbes qui l'entourent doivent être d'altitude différente (figure 133). La technique d'évaluation du nœud terminal est identique à celle utilisée pour la position de talweg, excepté que les valeurs des altitudes des deux courbes de niveau suffisent pour interpoler linéairement le long du segment. Si le nœud skeleton n'intersecte pas le segment, la branche de skeleton est alors raccordée au segment selon le principe de la distance la plus courte.

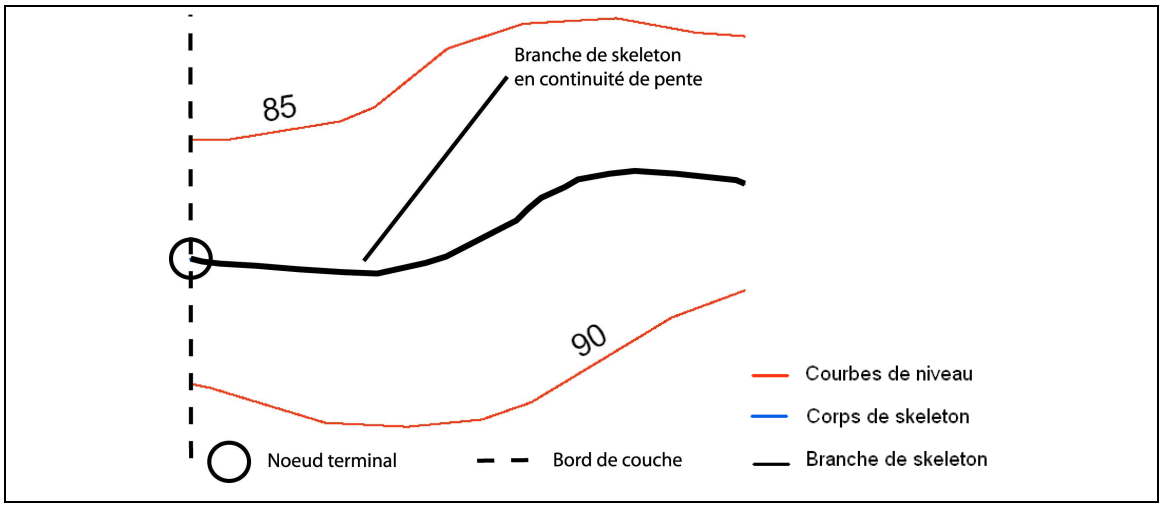


Figure 133. *Branche de skeleton en continuité avec la pente (Bocher, 2005)*

Les avantages et inconvénients sont identiques à la situation 1.

3. Lorsque la branche de skeleton est en position de sommet

Pour que la branche de skeleton soit considérée en position de sommet :

- elle doit être bordée par une courbe de niveau ayant la même valeur d'altitude

et

- les courbes de niveau adjacentes doivent avoir une altitude inférieure à la courbe qui le borde (figure 134).

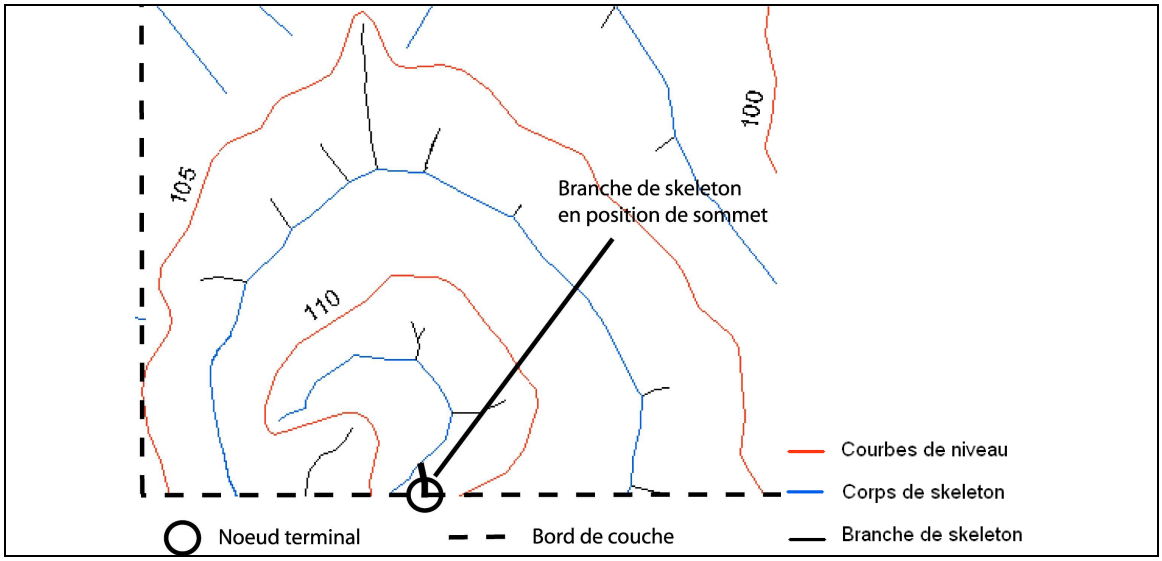


Figure 134. *Branche de skeleton en position de sommet (Bocher, 2005)*

Cette situation correspond à l'inverse de la configuration 1 (position de talweg). L'altitude du point au centre du segment de fermeture est donc rehaussée. Les avantages et inconvénients sont identiques à la situation 1.

Solution retenue pour le traitement des bords de couche

Les tests que nous avons réalisés sur le Sterenn nous ont permis d'extraire 393 branches de skeleton à partir d'un fichier de courbes de niveau contenant 23 entités et représentant une superficie de 370 ha. Sur ces 293 branches, 40 sont en bord de couche. L'un des objectifs de la modélisation étant de pouvoir réaliser des simulations à l'échelle des bassins versants prioritaires (1500 à 2000 ha), il a été décidé d'automatiser les traitements. Toutefois, afin d'offrir un maximum de garantie pour obtenir une triangulation topographique cohérente, nous avons posé deux garde-fous.

- Les courbes de niveau doivent être fermées par une enveloppe géométrique unique. Cette contrainte est vérifiée au cours de la phase de préparation des données du modèle en calculant l'enveloppe convexe de la couche. Les courbes de niveau qui ne parviennent pas en butée de celle-ci sont marquées comme problématiques (figure 135, carré bleu). L'utilisateur a la charge ensuite de les corriger manuellement, soit en homogénéisant l'étendue du fichier, découpage de celui-ci par un rectangle par exemple, soit en étendant la numérisation des entités jusqu'au bord de l'enveloppe.

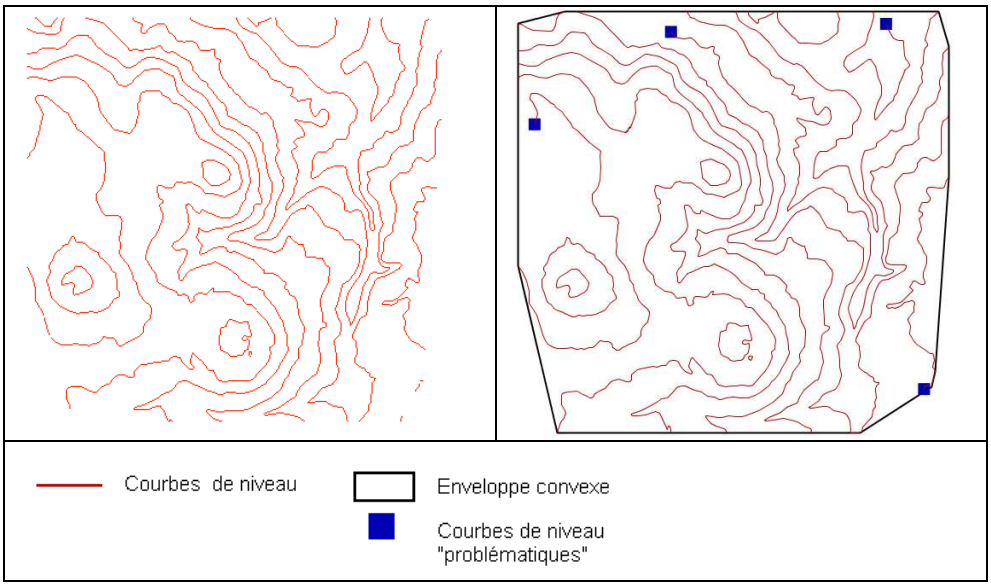


Figure 135. *A gauche un fichier de courbes cohérent, à droite un fichier avec des courbes problématiques*

- Les branches de skeleton calculées lors de la triangulation ainsi que les points sommet sont exportés dans deux couches géographiques séparées afin de pouvoir contrôler la qualité des valeurs interpolées. La cohérence des altitudes est vérifiée dans le SIG en affichant les altitudes des points sommet. Ces valeurs sont stockées dans un champ « altitude ». Les valeurs aberrantes sont modifiées par l'utilisateur manuellement. Lorsque la couche de points sommet a subi des ajustements, celle-ci est intégrée dans la triangulation comme un fichier de points cotés. Ils servent alors de référence pour l'interpolation des branches de skeletons.

2.1.2.4. L'intégration des branches de skeleton dans la triangulation

Les branches de skeleton sont intégrées dans la triangulation topographique comme des contraintes géométriques. La méthode est identique à celle utilisée pour les courbes de niveau (figure 136).

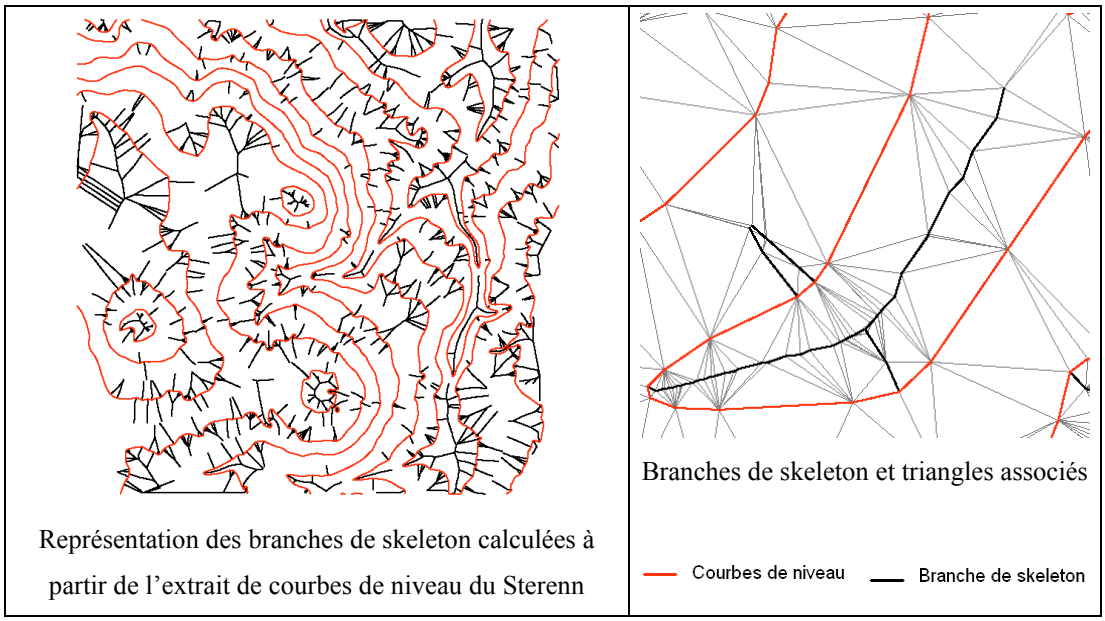


Figure 136. *Extraction et intégration des branches de skeleton dans la triangulation*

2.1.2.5. Conclusion et discussions sur la méthode des skeletons

La méthode des skeletons a permis d'éliminer 99 % des triangles plats sur le TIN amélioré. Les triangles plats restants correspondent à des cas particuliers situés en bord de courbes de niveau. Comme on peut l'observer sur les figures 137 et 138, l'interpolation des altitudes sur les branches de skeleton assure une bonne représentation des formes topographiques. Les branches de skeleton localisées en position de ligne de crêtes (figure 138) traduisent correctement les zones de divergence des écoulements et celles situées en position de talweg, les zones de convergence (figure 138). Le chaînage topographique des écoulements de l'amont vers l'aval est assuré.

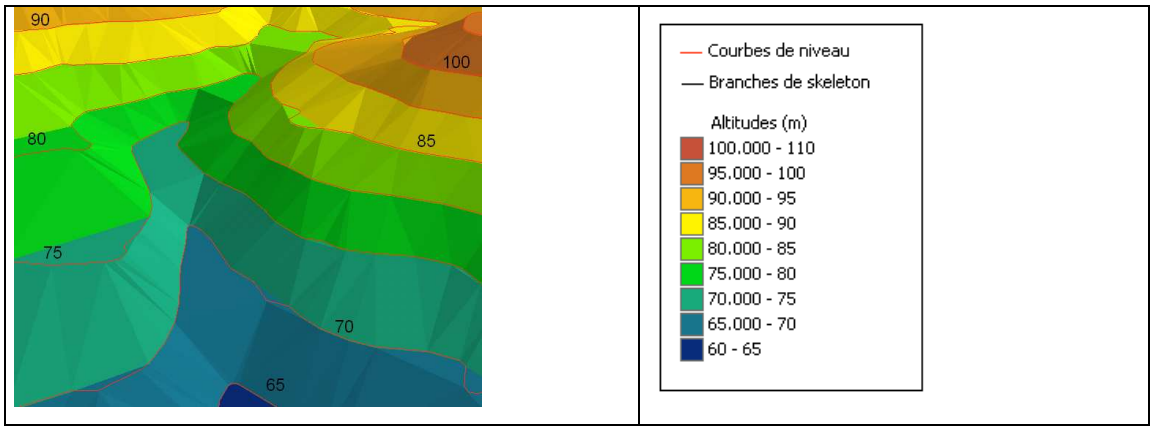


Figure 137. *Représentation en 2D $_{1/2}$ du TIN standard (Bocher, 2005)*

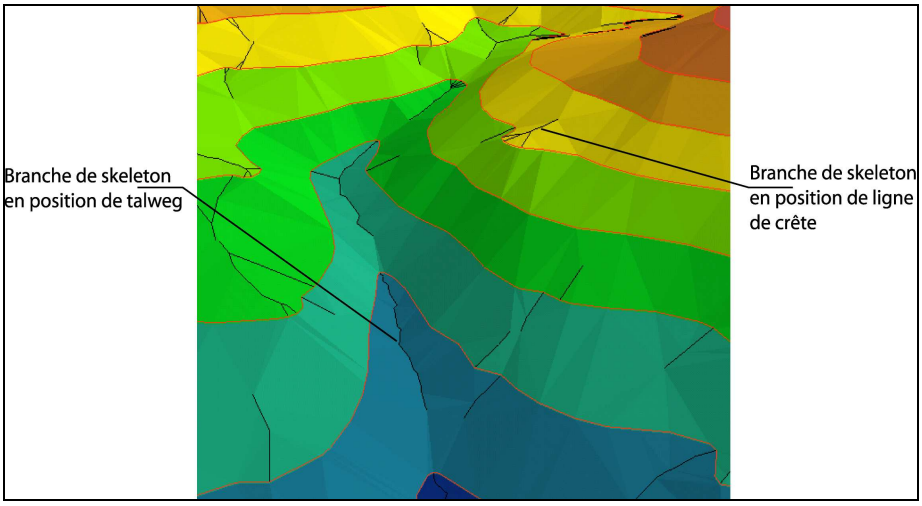


Figure 138. *Représentation en 2D $_{1/2}$ du TIN amélioré (Bocher, 2005)*

Toutefois, ces résultats sont à prendre avec précaution. La qualité des lignes de skeleton est corrélée à la distribution des points sur les courbes de niveau qui peut entraîner la formation de branche de skeleton déficiente. Ces dernières se rencontrent souvent dans les zones de talweg où l'on observe la formation de lignes en escalier (figure 139). Les conséquences sont :

- un déplacement de l'axe du talweg,
- une augmentation des distances d'interpolation entre les nœuds terminaux et par conséquent une sous-évaluation des altitudes.

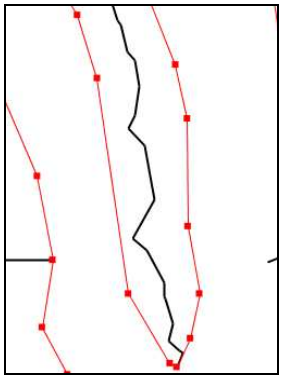
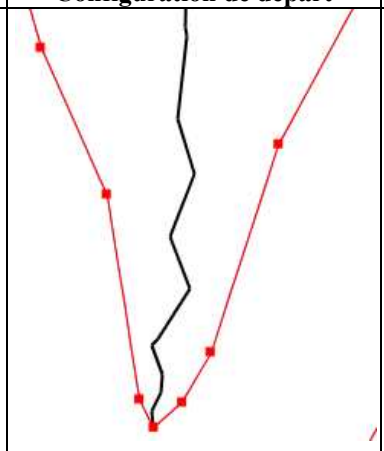
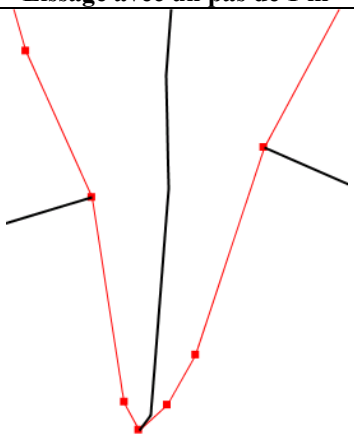
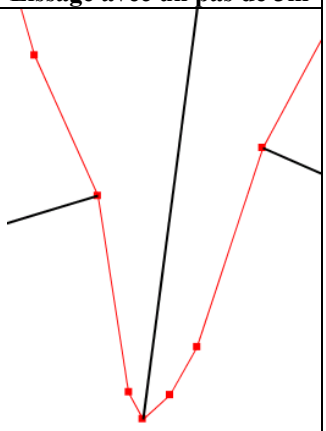
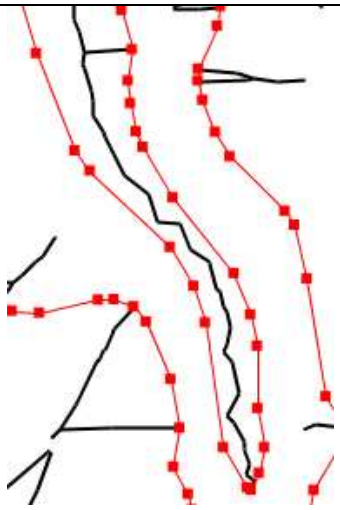
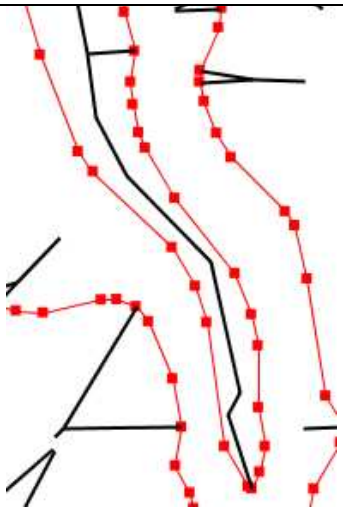
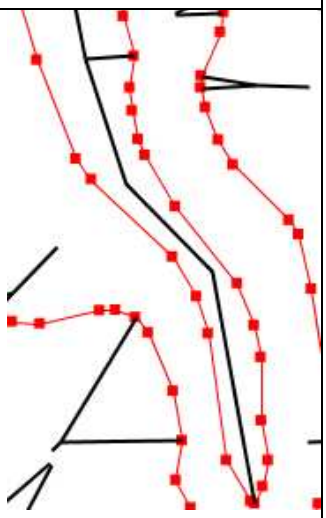


Figure 139. *Exemple de branche de skeleton déficiente*

Deux solutions existent pour limiter ces effets : le lissage ou la densification.

a. Le lissage

Le lissage consiste à transformer une entité composée de plusieurs lignes en une autre, qui se trouve décalée localement vers le centre de la courbure (Devogele, 1997). Plusieurs algorithmes de lissage ont été mis au point ces dernières années, notamment dans le cadre des problématiques d'appariement de base de données géographiques ou de production de données vectorielles à partir de données de télédétection. Parmi les algorithmes les plus utilisés on trouve l'algorithme de Douglas-Peucker. Ce dernier est exploité par De Oliveira (2005) pour corriger des branches de skeleton extraites à partir d'un fichier de polygones. Le tableau 22 donne un aperçu de l'application de l'algorithme de Douglas-Peucker sur les branches de skeleton. Deux distances de lissage sont utilisées, 1 mètre et 3 mètres.

Cas	Configuration de départ	Lissage avec un pas de 1 m	Lissage avec un pas de 3m
A			
B			

Légende

Courbes de niveau — Branche de skeleton

Tableau 22. *Les effets de l'algorithme de lissage de Douglas-Peucker sur des branches de skeleton*

Les résultats montrent que la distance de 3 m permet d'obtenir un meilleur lissage des branches de skeletons et ce dans les deux cas A et B. Les petits méandres présents dans le fichier de départ sont éliminés pour ne conserver que les points de rupture caractéristiques. Néanmoins, on peut aussi remarquer que le lissage conduit à de très importantes approximations géométriques. Les branches dans le talweg sont réduites à de grands segments dont la position tend à s'éloigner de l'axe central (cas B). Or l'intérêt de la méthode des skeletons est justement de pouvoir extraire les lignes caractéristiques du relief : talweg, ligne de crêtes, sommet. Le lissage ne sera donc pas utilisé.

b. La densification

La densification est une opération qui consiste à compléter une ligne ou une suite de lignes par de nouveaux points. Elle peut se réaliser en fonction d'un pas défini par l'utilisateur (tous les 10 mètres on ajoute un point) ou bien en fonction d'une contrainte (deux points d'une ligne ne doivent pas être à une distance supérieure à 10 mètres, si tel est le cas alors on ajoute un point). Contrairement à la méthode de lissage, la densification est une méthode très simple à mettre en œuvre. De plus, il s'agit d'une opération non destructrice. Il s'agit d'enrichir la donnée de départ. Le tableau 23 permet de visualiser distinctement l'intérêt d'une densification des courbes de niveau. On note une meilleure extraction des branches de skeleton dans le talweg. A contrario de la méthode de Douglas-Peucker, les branches se retrouvent à équidistance de la courbe de niveau.

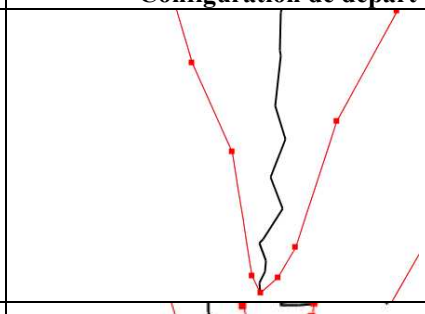
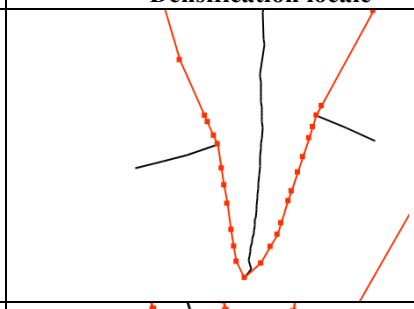
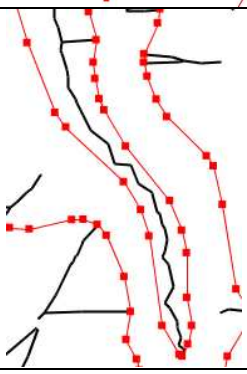
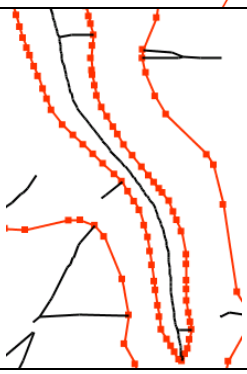
Cas	Configuration de départ	Densification locale
A		
B		
Légende Courbes de niveau — Branche de skeleton		

Tableau 23. *Extraction des branches de skeleton après densification*

Cependant, comme l'opération de lissage, l'opération de densification connaît quelques inconvénients.

- la durée de la triangulation et des traitements annexes augmentent exponentiellement,
- le TIN résultant est considérablement alourdi.

Malgré ces contraintes, nous avons retenu cette solution. Le pas de densification sera un paramètre optionnel qui pourra être modifié par l'utilisateur. La densification sera réalisée lors de la triangulation. Les nouveaux points seront mis en mémoire pour le calcul des skeletons puis supprimés.

2.2. Production du TIN contraint

Les contraintes linéaires sont introduites à l'issue des triangulations topographiques standard ou amélioré. Une attention particulière a été portée à l'ordre d'intégration des contraintes afin d'éviter l'apparition d'artefacts dans le TIN (inversion de pentes).

2.2.1. L'intégration des axes de drainage naturel

Les axes de drainage naturel sont extraits de la couche axe de drainage. Ils sont incrustés dans le TIN pour produire un TIN en cohérence avec l'organisation hydrographique du territoire modélisé. La technique consiste dans un premier temps à produire un arbre hydrographique dont les valeurs d'altitude décroissent de l'amont vers l'aval. Dans un second temps, cet arbre est intégré au TIN standard ou amélioré comme une contrainte linéaire.

a. <u>Méthode</u>

Les entités linéaires de la couche axe de drainage naturel (figure 140) sont segmentées à chaque intersection avec une courbe de niveau (figure 141, rond noir). Au point d'intersection, la valeur z de la courbe de niveau est récupérée et affectée au sommet de la nouvelle entité linéaire. Ensuite, il s'agit d'interpoler les valeurs des points sommet. Pour cela, nous exploitons la méthode mise en œuvre pour les branches de skeleton. Les valeurs d'altitude des sommets sont interpolées à partir des altitudes des nœuds terminaux selon le principe du plus long parcours (figure 141). Pour les nœuds qui ne sont pas situés sur une courbe de niveau (nœud exutoire), leur altitude doit être renseignée par l'utilisateur.

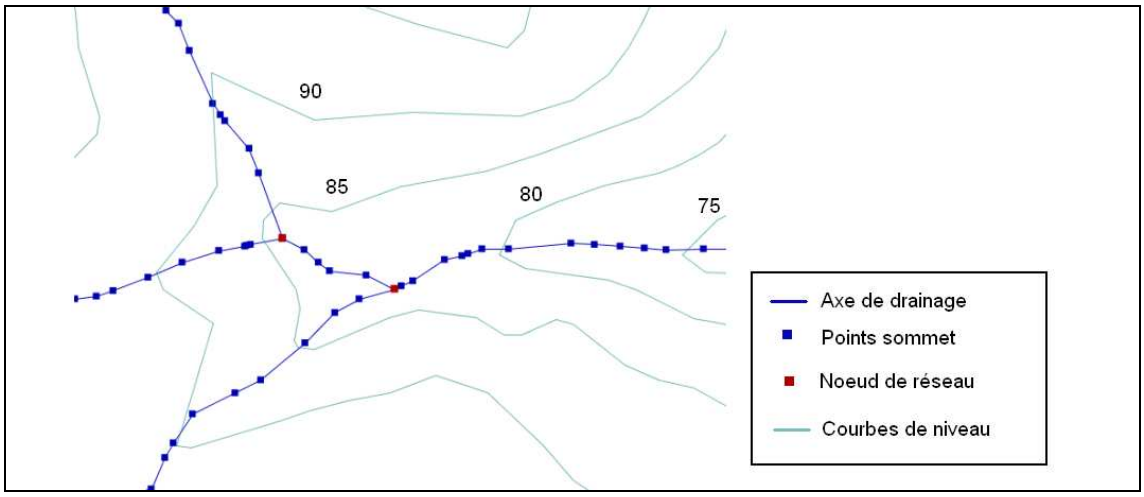


Figure 140. *Donnée de départ (Bocher, 2005)*

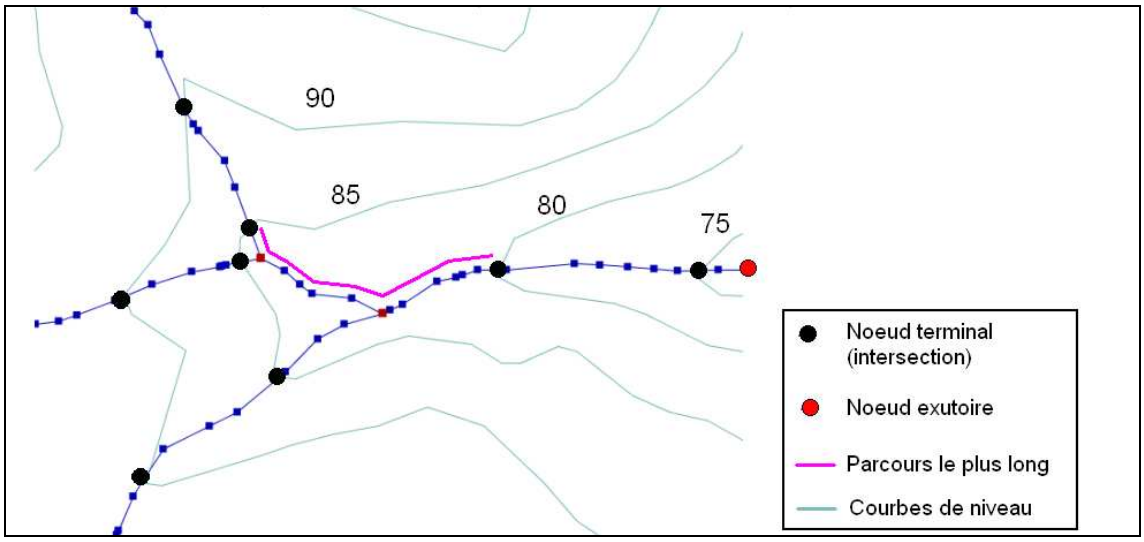


Figure 141. *Méthode d'interpolation des axes de drainage naturel (Bocher, 2005)*

Enfin, une valeur forfaitaire d_Z minime est soustraite à chaque point sommet afin d'incruster les axes de drainage par rapport à la topographie.

Cette méthode fonctionne tant que les axes de drainage sont localisés dans l'axe du talweg, c'est à dire à équidistance de la courbe qui les entoure. Or cette position idéale du réseau hydrographique n'est pas toujours vérifiée car les cours d'eau ont souvent subi de profonds aménagements (dérivation) et les sources de données n'utilisent pas les mêmes référentiels. Les courbes de niveau sont issues du scan 25 et les axes de drainage ont été numérisés sur photographie aérienne après avoir été relevés sur le terrain.

Les altitudes des axes de drainage décalés par rapport au talweg topographique rentrent en concurrence avec les altitudes des courbes de niveau et les branches de skeleton (figure 142, A et B). L'intégration des axes de drainage interpolés entraîne l'apparition d'artefacts topographiques : inversion de pente, création de ligne de crête locale, formation de talwegs

parallèles (figure 142, C)… Ces problèmes se posent surtout lorsqu'il y a discordance entre le tracé des axes de drainage naturel et celui des courbes de niveau : les deux pouvant se recouper.

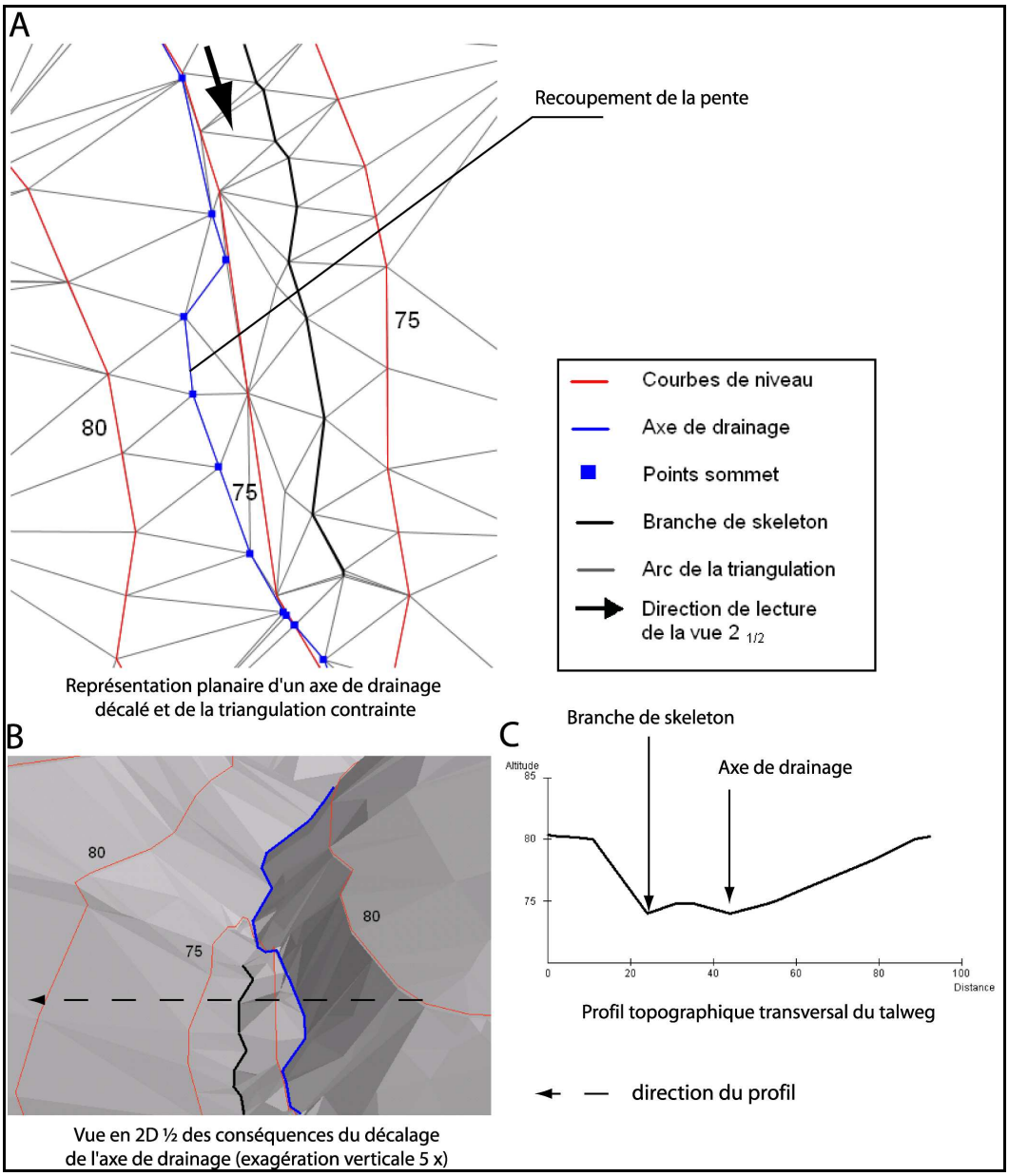


Figure 142. *Exemple d'un axe de drainage décalé et de ses conséquences sur le TIN (Bocher, 2005)*

b. <u>Elimination des recoupements de pente</u>

Un axe de drainage est considéré comme remontant la pente lorsque son tracé forme un méandre sortant puis entrant par rapport à la courbe de niveau qui marque le talweg topographique (figure 142, A). Dans ce cas, le tronçon situé hors de la courbe talweg forme dans la triangulation une suite d'arcs plats (l'interpolation étant réalisée de courbe à courbe). Ces arcs plats ont pour conséquence de bloquer la continuité des écoulements dans le talweg.

Pour limiter les effets de remontée de pente, la méthode d'interpolation des axes de drainage est donc améliorée. Les tableaux 24 et 25 exposent la démarche que nous avons adoptée.

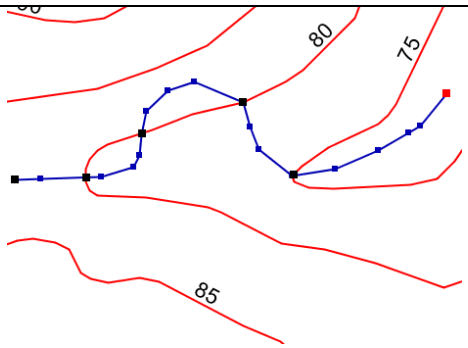
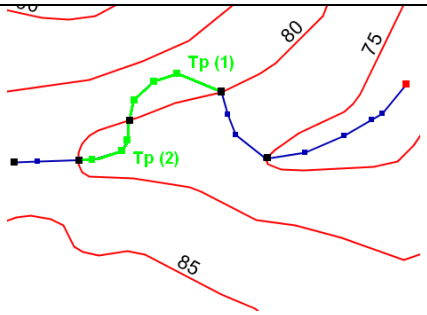
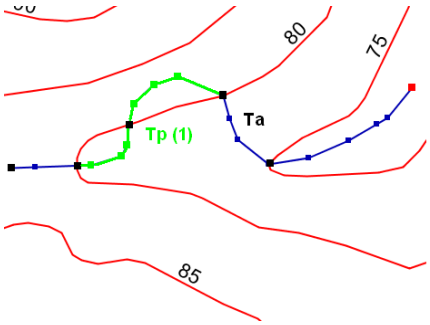
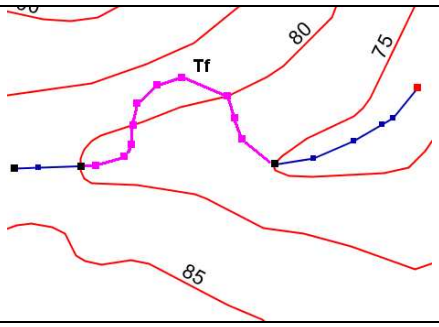
Etape	Représentation graphique	Description des opérations
Configuration de départ		Courbes de niveau Axe de drainage Points sommet Noeud terminal Noeud exutoire
ETAPE 1		Identification des tronçons plats (Tp) à l'aide des altitudes des nœuds terminaux. Les tronçons plats sont marqués avec l'altitude de la courbe de niveau.
ETAPE 2		Les tronçons plats sont fusionnés en utilisant l'attribut d'altitude et le critère de connexité spatiale. Ainsi Tp (1) et Tp (2) ne forment plus qu'un seul tronçon Tp (1). Pour chaque tronçon plat fusionné on recherche le tronçon connexe dont l'altitude du nœud terminal est la plus basse. Ici, il s'agit de Ta. Ce tronçon est marqué avec le numéro de tronçon fusionné auquel il se rattache (Tp (1)).
ETAPE 3		Le tronçon Ta est fusionné avec le tronçon Tp (1) à partir du numéro de tronçon et d'un critère de connexité spatiale. Une nouvelle entité linéaire Tf est produite. Les altitudes des points de cette entité sont ensuite interpolées linéairement à partir des altitudes des nœuds terminaux.

Tableau 24. *Les étapes d'élimination des recoupements de pente (Bocher, 2005)*

c. Cas particulier : lorsque plusieurs tronçons plats sont connexes (tableau 25)

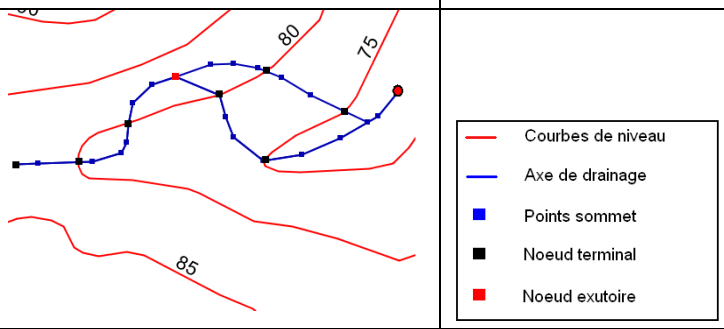
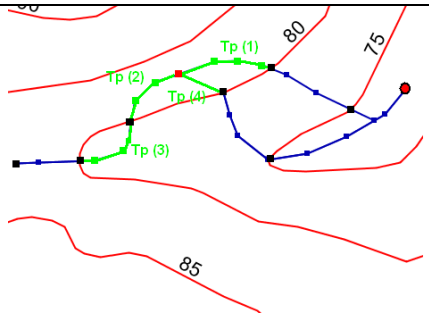
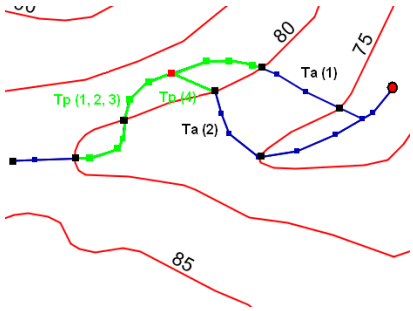
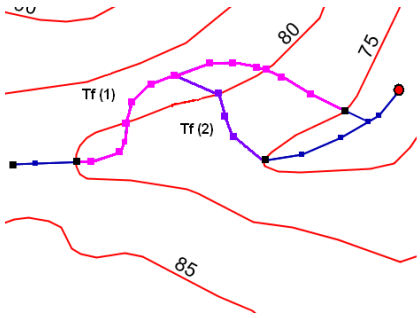
Etape	Représentation graphique	Description des opérations
Configuration de départ		
ETAPE 1		Même démarche que pour l'étape 1 du tableau 24.
ETAPE 2		L'étape de fusion des arcs plats pose problème car il existe plusieurs tronçons candidats. L'approche suivante est donc adoptée : Les tronçons Tp (1, 2, 3, 4) sont considérés comme un graphe. A partir des nœuds du graphe, on recherche la distance de parcours la plus longue. Ici il s'agit de Tp (1) + Tp (2) + Tp (3). Ces tronçons sont fusionnés pour former une nouvelle entité, Tp (1, 2, 3). Le tronçon Tp (4) est marqué avec l'identifiant du tronçon fusionné Tp (1, 2, 3). Un attribut supplémentaire « NonFusion » lui est associé pour le différencier des tronçons plats fusionnés.
ETAPE 3		Une procédure intermédiaire est ajoutée à l'étape 3 du tableau 24. Elle consiste à rechercher les tronçons qui n'ont pas été fusionnés (NonFusion). Si le programme en trouve, alors il applique les opérations de l'étape 2. Le procédé est itératif. L'étape 3 est ensuite appliquée : Tp (1, 2, 3) est fusionné avec Ta (1) Tp (4) est fusionné avec Ta (2) A chaque fusion les attributs sont conservés. Pour l'entité Tf (1) les altitudes sont interpolées à partir des nœuds terminaux. Pour Tf (2) les altitudes sont interpolées à partir du nœud terminal et de l'altitude du vertex interpolé sur Tf (1).

Tableau 25. *Le problème des recoupements de pente connexes (tronçons plats) (Bocher, 2005)*

Cette technique permet d'obtenir une interpolation linéaire régulière pour les tronçons plats. Cependant, lorsque le nombre de tronçons plats connexes est important, des erreurs d'appréciation des objets à fusionner peuvent apparaître entraînant par conséquent des répercutions sur les valeurs interpolées. C'est pourquoi, à l'issue des traitements, les objets produits à l'étape 2 (tronçons plats fusionnés et tronçons adjacents) sont exportés dans une couche géographique. L'utilisateur peut ainsi vérifier dans le SIG la cohérence des regroupements et procéder si nécessaire à des ajustements manuels.

Insistons sur le fait que cette méthode a pour but uniquement de produire un profil topographique longitudinal continu pour les axes de drainage. Elle ne corrige en rien les problèmes de cassure de pente induits par la localisation des entités géographiques. Ces dernières relèvent davantage d'un problème de référentiel des données.

2.2.2. L'intégration des arcs du MTH

Les arcs du MTH sont intégrés dans la triangulation comme des contraintes. Les valeurs d'altitude des points qui les composent sont calculées selon leur position dans le TIN (ArcInfo, help).

- Si le point d'un arc est identique à un nœud du TIN, alors la valeur Z du nœud est transmise au point,

- Si le point d'un arc est situé sur un arc du TIN, sa valeur z est interpolée linéairement le long de l'arc du TIN,

- Si le point d'un arc est situé à l'intérieur d'une face du TIN, l'interpolation est réalisée en plan à partir des valeurs des altitudes des nœuds de la face.

Conclusion sur TopoTIN

Plusieurs traitements ont été mis en œuvre pour produire un TIN le plus cohérent possible dans une perspective de modélisation hydrologique. Ils ont pour objectif de produire des pentes continues en évitant les artefacts induits par l'intégration de données exogènes. Les tests réalisés sur un petit jeu de données permettent d'obtenir des résultats satisfaisants. Cependant, une utilisation a plus petite échelle de ces méthodes, c'est à dire une mise en œuvre sur l'ensemble des données du Sterenn devra faire l'objet d'une analyse afin de vérifier si le changement d'échelle ne conduit pas à produire un TIN avec de nouveaux artefacts.

3. Le prototype HydroTIN

HydroTIN se situe au bout de la chaîne de modélisation. Il s'agit de l'application permettant de représenter spatialement l'influence des aménagements anthropiques. HydroTIN est une extension intégrée à OpenJump. Elle exploite les capacités de traitement de la librairie JTS ainsi que l'environnement de visualisation et de gestion des données d'OpenJump. Nous présentons l'implémentation technique des trois principaux composants utilisés pour le fonctionnement d'HydroTIN : le graphe de cellules, le graphe de bassins et l'automate cellulaire simplifié (figure 113).

3.1. Le calcul du graphe de cellules

Le graphe des cellules est un graphe résultant de la connexion des cellules du TIN en fonction de la qualification morphologique des arcs (cf. chapitre 5). Il ne traduit que le cheminement des écoulements sous l'influence de la topographie, cependant il va servir de support pour la prise en compte des arcs obstacles et collecteurs.

3.1.1. Principe général

La qualification morphologique d'un arc est déterminée par l'étude de deux critères : la pente de l'arc (positive, négative ou nulle), la position du vecteur de plus forte pente des faces gauche et droite de l'arc par rapport à la direction topologique de l'arc. Cette qualification suffit à établir les règles de connexion entre les cellules linéaires et les autres types de cellules (surfaciques et ponctuelles) qui leur sont adjacentes. Nous appelons cellule une entité géométrique du TIN : nœud, arc ou face.

La connexion du graphe s'effectue d'abord par la connexion des cellules arcs (qualifiées morphologiquement), puis des cellules surfaciques (faces) et enfin des cellules ponctuelles (nœuds). Lors de la connexion des cellules surfaciques la proportion de flux qui sera transmise à chaque cellule avale est précisée. Cette proportion est calculée en fonction du vecteur de plus grande pente.

Ainsi, la part de flux sortant d'une cellule surfacique A et transmise à une cellule surfacique D dépend de la proportion de surface de A s'écoulant vers l'arc A-D (figure 143).

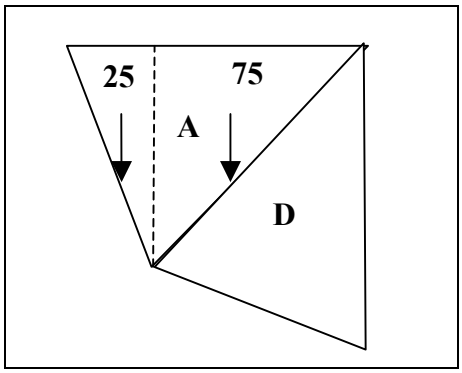


Figure 143. *Répartition du flux sortant de la cellule A selon la ligne de plus grande pente*

La figure 144 schématise la proportion de surface transmise en replaçant les cellules A et B dans un graphe de cellules. Il se lit de la façon suivante :

- 25 % du flux de la cellule A se jette dans la cellule C et 75 % dans la cellule D,
- le flux de la cellule B se jette entièrement dans la cellule D.

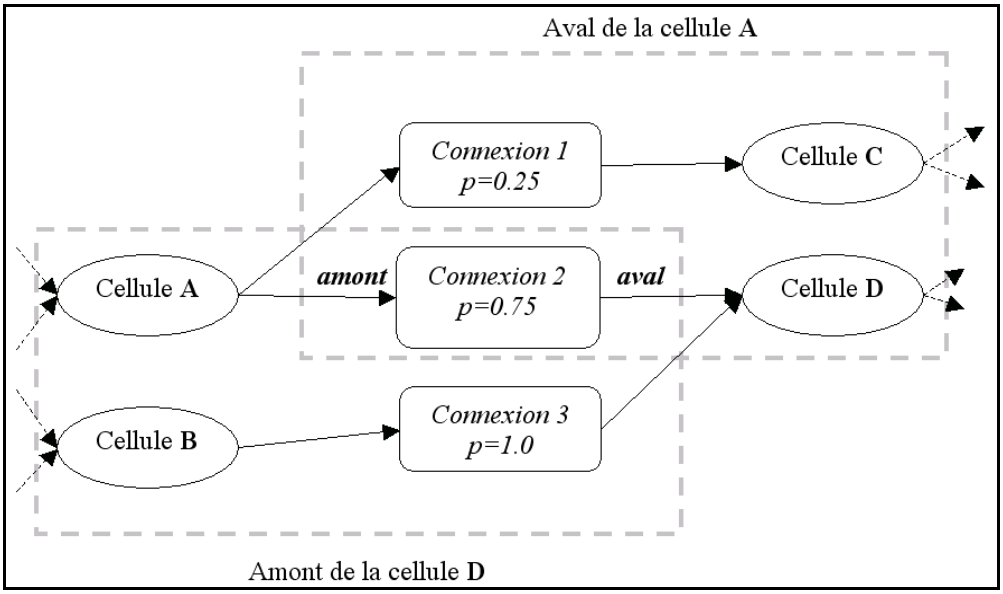


Figure 144. *Principe de connexion entre cellules surfaciques. La valeur de p indique la part de flux transmise de la cellule en amont de la connexion vers la cellule en aval. (Bedel et Bocher, 2005)*

Le graphe des cellules est stocké dans une structure objet composée des trois cellules élémentaires (nœud, arc, face) et d'une cellule supplémentaire que nous appellerons connexion. Une connexion possède trois attributs (figure 145) : la cellule amont, la cellule aval et la part *p* du flux transmis de la cellule amont vers la cellule aval. C'est donc au niveau de la connexion qu'est qualifié le sens des écoulements.

Le cadre B de la figure 145 donne un exemple de structuration des objets du graphe de cellules construit à partir d'un extrait de triangulation (cadre A). La figure 146 constitue sa représentation graphique.

Remarque : Pour faciliter le processus de connexion et de recherche des cellules aval et amont, le graphe de cellules sera simplifié au niveau des arcs perméables (cf. chapitre 5). Lorsqu'un arc est qualifié de « pente à droite » ou de « pente à gauche », la connexion entre la face aval et la face amont sera directe.

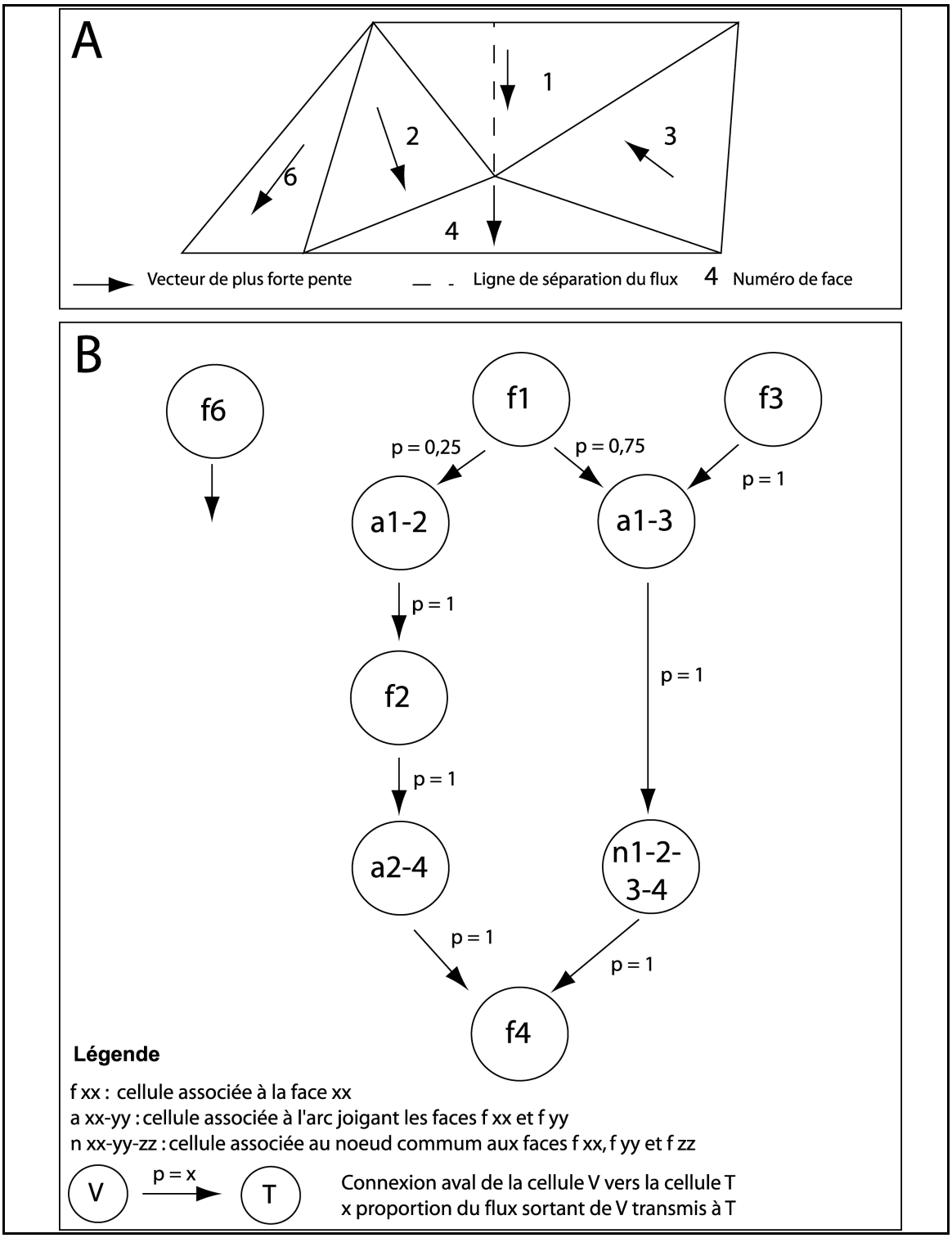


Figure 145. *Le graphe de cellules. Cadre A : données de départ ; cadre B : la structure objet (Bocher et Bedel, 2005)*

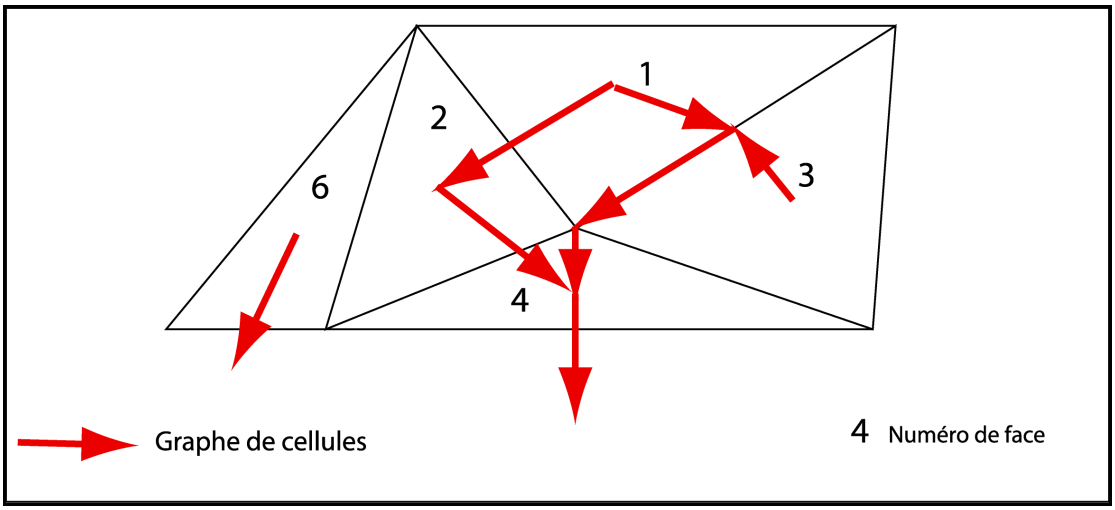


Figure 146. *Représentation graphique du graphe de cellules (Bocher, 2005)*

Cette première phase de la connexion basée uniquement sur la topographie locale du TIN ne permet cependant pas d'indiquer le chemin pris par les écoulements sur les cellules horizontales (cellules où la pente est nulle).

3.1.2. Le traitement des zones horizontales

La méthode employée est identique à celle utilisée par Langlois et Delahaye (2002). L'écoulement de la cellule horizontale ou d'un ensemble de cellules horizontales est orienté depuis les cellules situées en amont vers les cellules en aval. Nous appelons ces cellules aire horizontale.

Dans un premier temps, on établit pour chaque couple de cellules adjacentes appartenant à une aire horizontale une double connexion permettant ainsi au flux de s'écouler aussi bien dans un sens que dans l'autre. Puis dans un deuxième temps, pour chaque cellule en bordure de l'aire horizontale possédant soit une cellule en aval soit une cellule en amont en dehors de l'aire, on supprime les connexions à contre courant avec les autres cellules de la zone. L'aire horizontale non connectée est ainsi réduite. On réitère l'opération jusqu'à ce que chaque cellule de l'aire horizontale initiale soit traitée. La figure 147 montre un exemple d'application de la méthode pour reconnecter des cellules d'une aire horizontale situées dans la courbure d'une ligne de niveau.

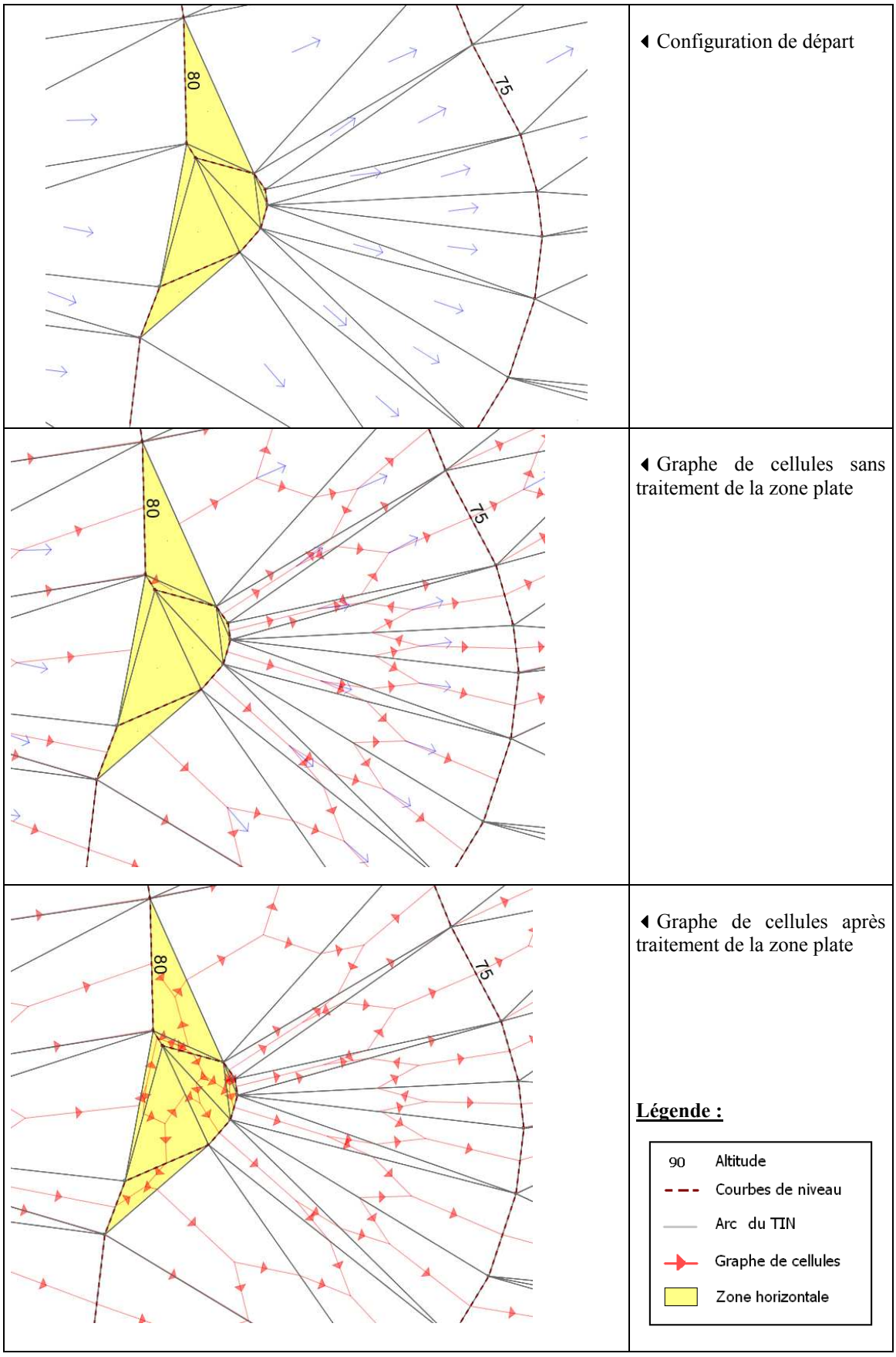


Figure 147. *Résultat d'application de la méthode RuiCells pour la re-connexion d'une zone horizontale*

Une fois les aires horizontales traitées, il peut encore rester de petites dépressions topographiques sur le TIN qui se traduisent par des déconnexions au niveau du graphe de cellules. Ces déconnexions sont caractérisées par des cellules alimentées mais ne se déversant dans aucune cellule. Ces cellules sont appelées cuvettes topographiques.

Lorsque les cuvettes topographiques sont positionnées en bordure du TIN, elles sont considérées comme des exutoires et ne subissent aucune correction. Dans les autres cas, les cuvettes topographiques sont re-connectées au reste du réseau de cellules pour obtenir une continuité dans le cheminement des écoulements.

3.1.3. La connexion des cuvettes topographiques

La méthode de connexion d'une cuvette topographique consiste à simuler un effet de débordement. En effet, une cuvette topographique est caractérisée par un volume de stockage maximal qui, lorsqu'il est atteint, permet à l'écoulement auparavant bloqué de se déverser dans une ou plusieurs autres cellules. La procédure est déclinée en deux étapes :

- détermination des cellules alimentant la cuvette topographique ou cellules contributives,
- recherche de l'exutoire principal.

3.1.3.1. Détermination des cellules contributives

Les cellules contributives regroupent l'ensemble des cellules dont la proportion de flux est égale à 1 et sont contenues dans la cuvette topographique (figure 148). On considère que les cellules qui à la fois alimentent les cellules contributives et se déversent partiellement en dehors de cette zone appartiennent à la couronne de la cuvette (figure 149). La couronne correspond à l'ensemble des cellules périphériques aux cellules contributives de la cuvette. Sont incluses dans cette couronne les cellules qui ne se déversent que partiellement dans l'aire des cellules contributives.

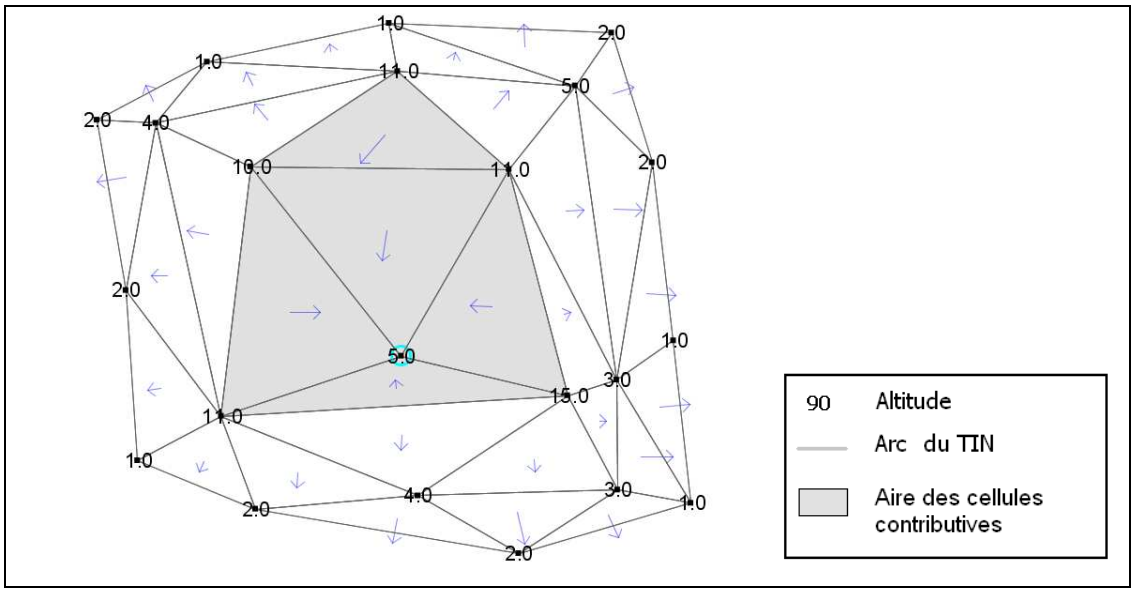


Figure 148. *Représentation d'une cuvette topographique (rond bleu) et des cellules contributives (Bocher, 2005)*

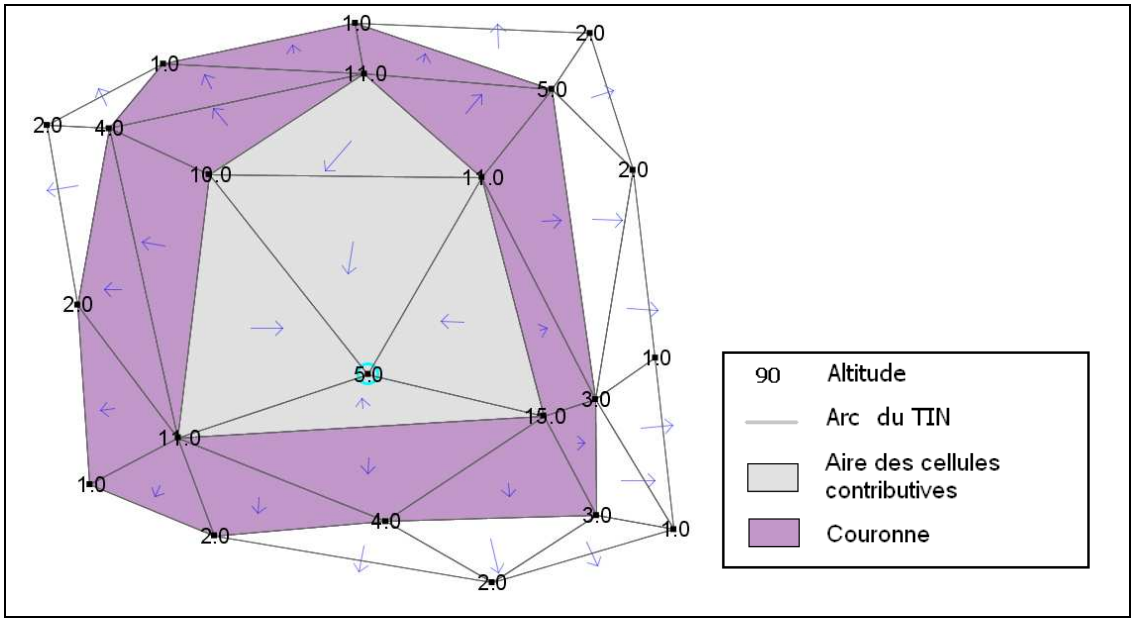


Figure 149. *La couronne de la zone cuvette (Bocher, 2005)*

3.1.3.2. Recherche de l'exutoire principal de la cuvette topographique

En situation de débordement, le volume d'eau accumulé dans une cuvette se déverse dans les cellules de la couronne dont l'altitude est la plus faible. L'exutoire d'une cuvette est défini comme étant la cellule aval des cellules couronnes de plus faible altitude et dont la pente est la plus importante. La recherche de la cellule exutoire se réalise en parcourant les cellules de la couronne adjacentes, c'est-à-dire les arcs et les nœuds. Pendant cette opération, la ou les cellules candidates sont marquées (figure 150). Ensuite, la liste des cellules candidates est

parcourue et la cellule ayant la plus forte pente est retenue comme la cellule exutoire (figure 150). Enfin, le graphe de cellules est modifié localement pour ajouter une nouvelle connexion de la cellule cuvette vers la cellule exutoire (figure 150 et 151).

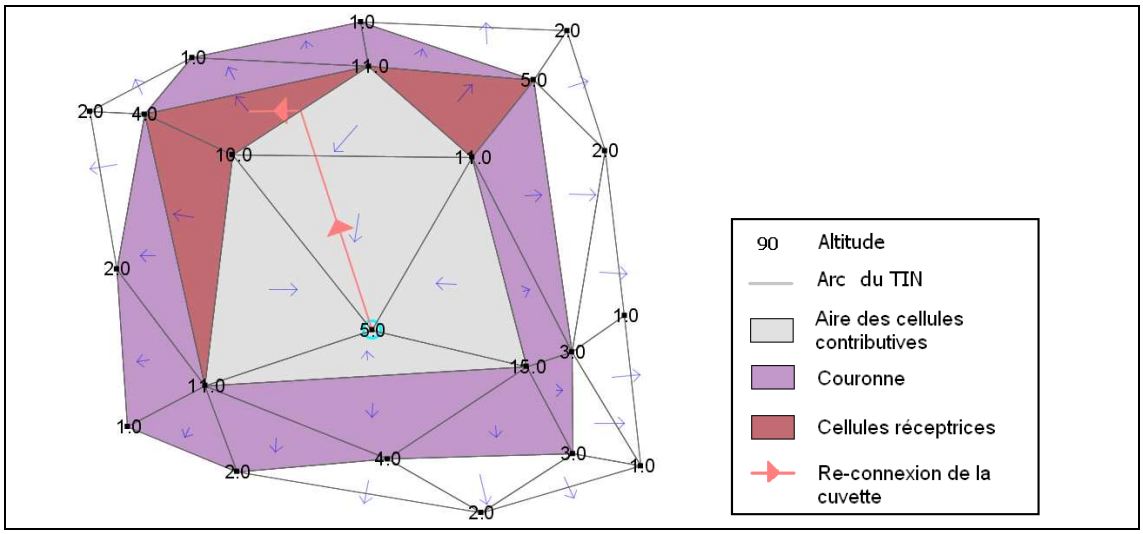


Figure 150. La re-connexion d'une cuvette *topographique (Bocher, 2005)*

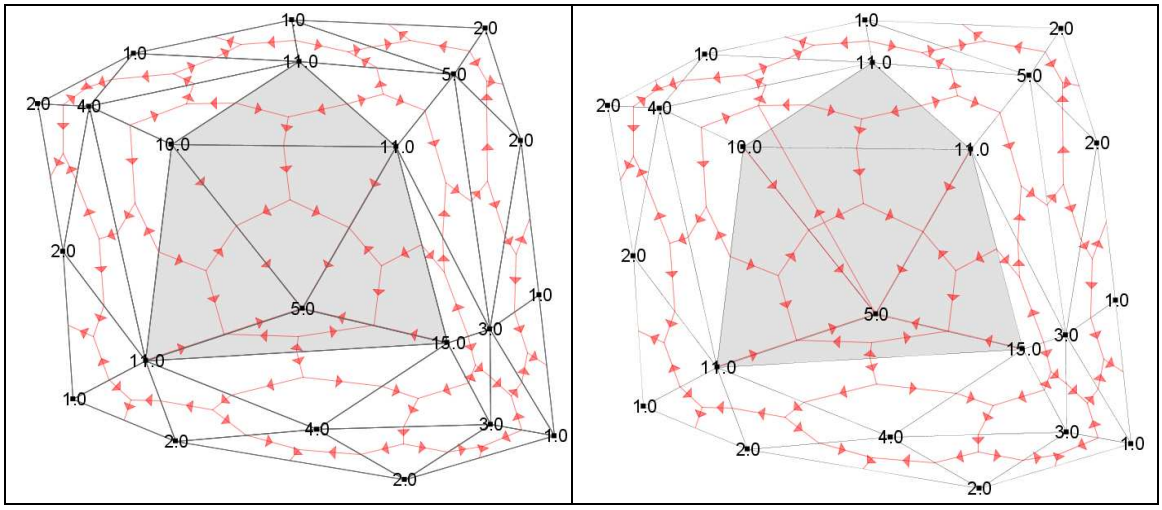


Figure 151. *A gauche, le graphe de cellules sans re-connexion de la cuvette topographique, à droite avec re-connexion (Bocher, 2005)*

Remarque : La re-connexion du graphe de cellules peut induire la formation de boucles dans les écoulements. C'est-à-dire des cellules qui s'auto-alimentent (cf. chapitre 3). Pour limiter l'apparition de boucles lors de la re-connexion, un test local est réalisé sur le graphe de cellules. Si la re-connexion d'une cellule induit une boucle alors on sélectionne une autre cellule exutoire. Le processus est récursif.

3.2. Le calcul du graphe de bassins

Le graphe de bassins intègre le comportement de deux catégories d'objet : les arcs obstacles et les arcs collecteurs (cf. chapitre 5). Ces objets sont qualifiés par des attributs sémantiques qui permettent de les classer par rapport à un comportement potentiel vis-à-vis des transferts de surface. Ces attributs sont transférés aux arcs du TIN lors de la triangulation contrainte. Ainsi pour un objet de la couche obstacle, les attributs « cpGauche » et « cpDroite » des arcs qui le composent auront automatiquement la valeur 1.

Il s'agit maintenant d'utiliser ces informations pour qualifier la réponse hydrologique de ces objets et construire ainsi le graphe de bassins. Nous présentons dans un premier temps les méthodes et techniques mises en œuvre pour prendre en compte les arcs obstacles, dans un deuxième temps celles adoptées pour les arcs collecteurs.

3.2.1. La prise en compte des arcs obstacles dans le graphe de bassins

Ici, la construction du graphe de bassins consiste à rechercher les points de stockage des écoulements de surface le long des arcs obstacles, connus grâce aux attributs sémantiques. Une fois identifiées, ces points de stockage sont connectées entre eux selon une technique similaire à celle utilisée par Duke *et al* (2003, cf. chapitre 3). Les connexions établies auparavant dans le graphe de cellules sont modifiées localement pour dériver le graphe de bassins.

3.2.1.1. Recherche des cuvettes artificielles

Une cuvette artificielle est composée de l'ensemble des cellules (arc ou face) qui alimentent un point de stockage positionné le long d'un ou de plusieurs arcs obstacles. Contrairement au cas des cuvettes topographiques, la recherche d'une cuvette artificielle nécessite d'associer des cellules particulières aux arcs qui caractérisent les obstacles. Elle doit être contrainte par l'élément linéaire et doit être effectuée de part et d'autre de celui-ci. En effet, les comportements hydrologiques d'un obstacle linéaire sont a priori distincts et indépendants pour chacun des côtés des arcs concernés.

Un exemple est schématisé sur la figure 152. Ce dernier est constitué de trois talus :

- en A, orienté perpendiculairement à la pente du terrain ;
- B et C, orientés dans le sens de la pente.

et de quatre parcelles, numérotés 1, 2, 3 et 4.

Pour faciliter la lecture de la figure et des relations spatiales, le côté du talus A compris dans la parcelle 1, s'écrit A1.

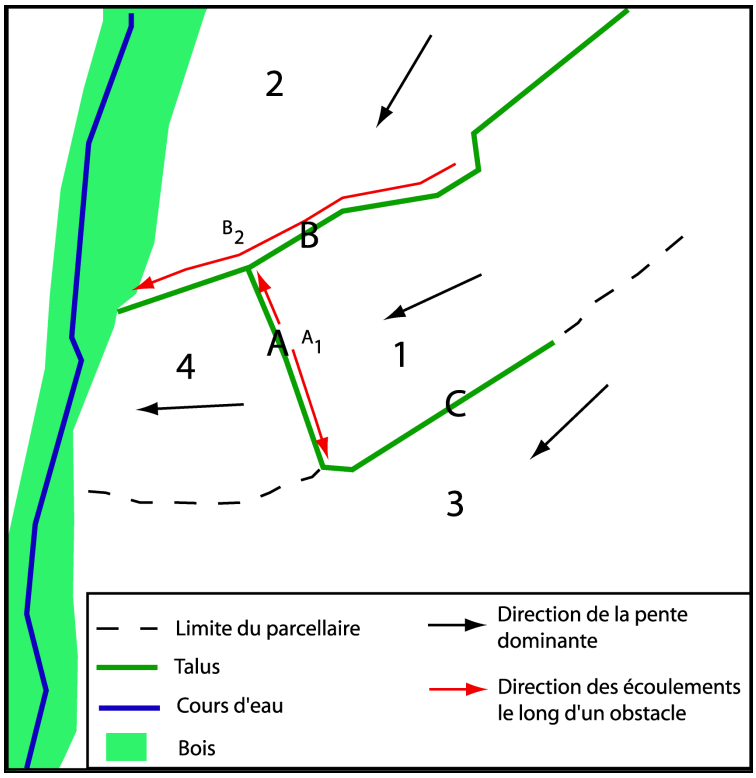


Figure 152. Schématisation d'une configuration bocagère efficace (Bocher, 2005)

On peut retenir que :

- A1 est considéré comme efficace par rapport au ruissellement car B et C assurent par leur connexion avec A un piégeage des eaux de surface de la parcelle 1
- B2 dévie les écoulements de la parcelle 2,
- C3 et A4 n'ont aucun effet sur les écoulements.

Au niveau du graphe de cellules cela suppose donc l'association d'une cellule non plus à l'arc lui-même, mais à chacun de ses côtés. De même, une cellule nœud située à l'intersection de plusieurs arcs obstacles est susceptible d'avoir plusieurs comportements hydrologiques propres. Ainsi, sur la figure 153 le nœud A peut potentiellement représenter le point de stockage d'une cuvette artificielle à gauche des arcs 1 et 2 ou à droite des arcs 2 et 3 ou encore à droite de l'arc 1 et à gauche de l'arc 3. Le nombre de ces cellules est dépendant du nombre de façades à l'intersection du nœud A. Il faut donc pouvoir associer à ce noeud autant de cellules qu'il y a de façades, d'où la notion de cellules façades. Une cellule façade correspond à un dupliquât à gauche ou à droite d'un arc considéré comme obstacle. Les façades peuvent être formées d'un ou plusieurs arcs comme le montre la figure 153.

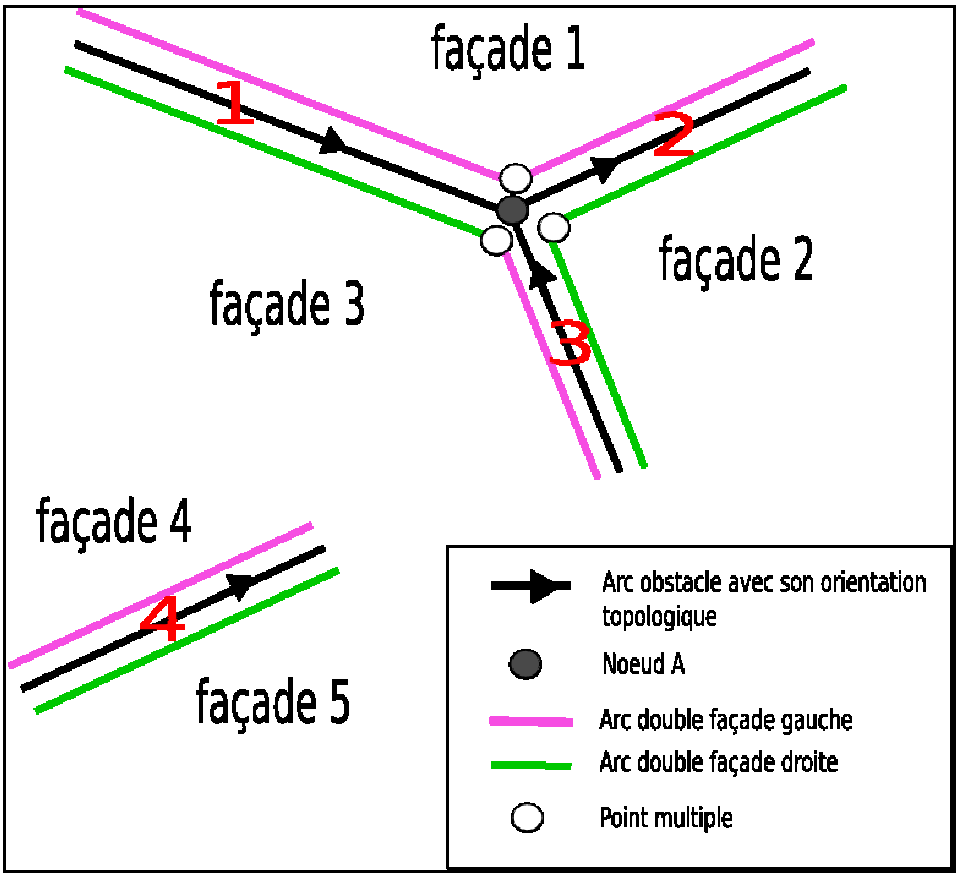


Figure 153. *Façades définies par la convergence de 3 arcs obstacles et cellules associées (Bocher et Bedel, 2005)*

Pour pouvoir associer plusieurs cellules à un même élément du TIN, deux types de cellules « intermédiaires » ont été introduits : l'« Arc double » et le « Point multiple ». La cellule « Arc double » est une enveloppe qui regroupe 2 cellules façade, chacune associée à l'un des côtés de l'arc. La cellule « Point multiple » regroupe un nombre fini de cellules « Point façade ». Une cellule « Point façade » correspond à un dupliquât du nœud A réalisé pour chaque façade.

Ainsi sur la figure 153 :

- le nœud A sera défini comme un « Point multiple » composé de trois cellules point façade ;
- l'arc 1 sera défini comme un « Arc double » composé de deux cellules façade, façade 1 pour la gauche et façade 3 pour la droite.

Ces cellules intermédiaires sont ensuite utilisées pour rechercher de chaque côté des arcs obstacles, les points de stockage des cuvettes artificielles. Le parcours des cellules est réalisé par façade. Le tableau 26 montre une application de la méthode sur un extrait de TIN contraint par une couche d'obstacles.

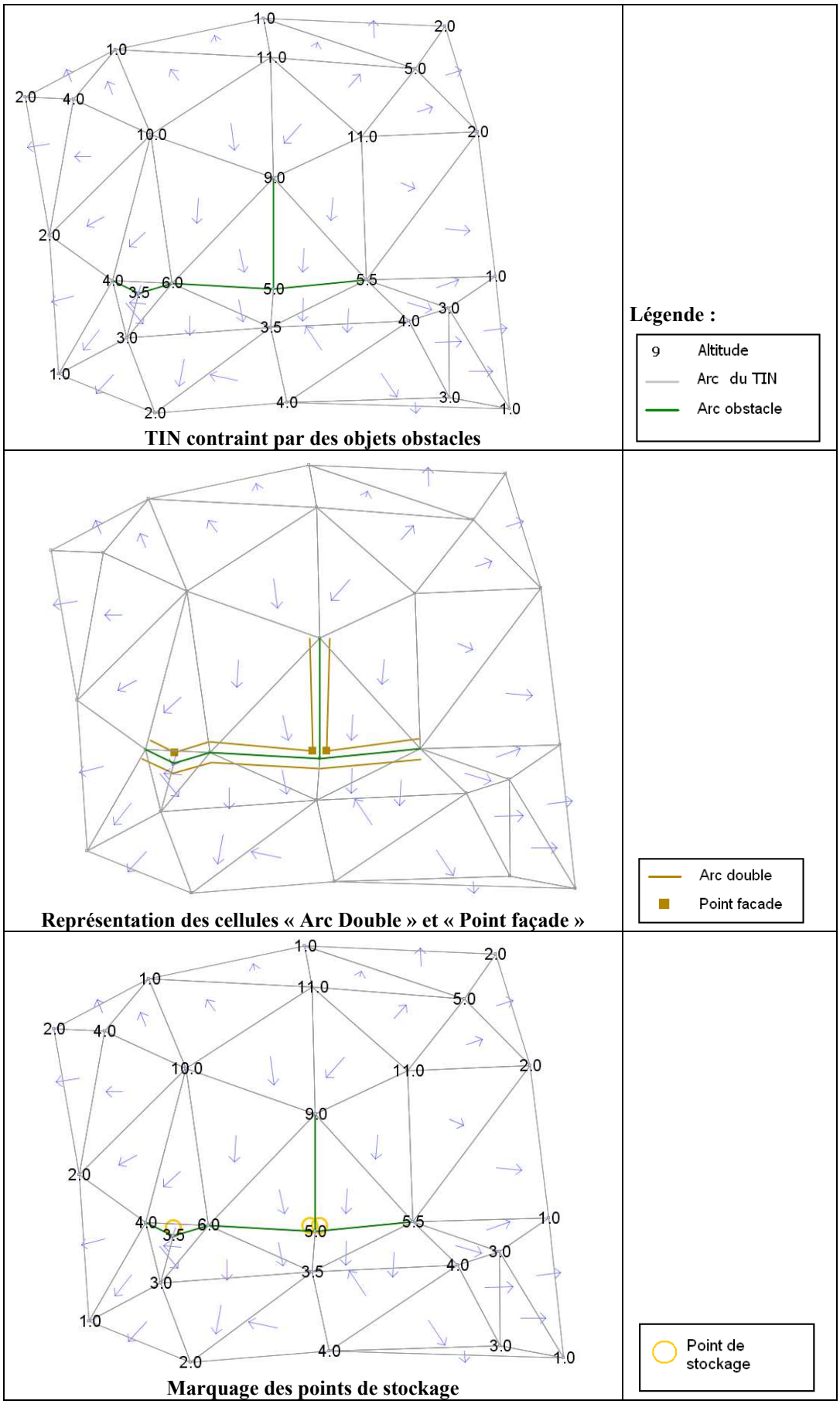


Tableau 26. *Représentation des étapes de recherche des cuvettes anthropiques (Bocher, 2005)*

A l'issue de l'identification des points de stockage, pour chacun d'entre d'eux, nous définissons le bassin d'alimentation (cuvette artificielle). Le calcul est réalisé en remontant les lignes de plus grande pente des cellules aval (figure 154).

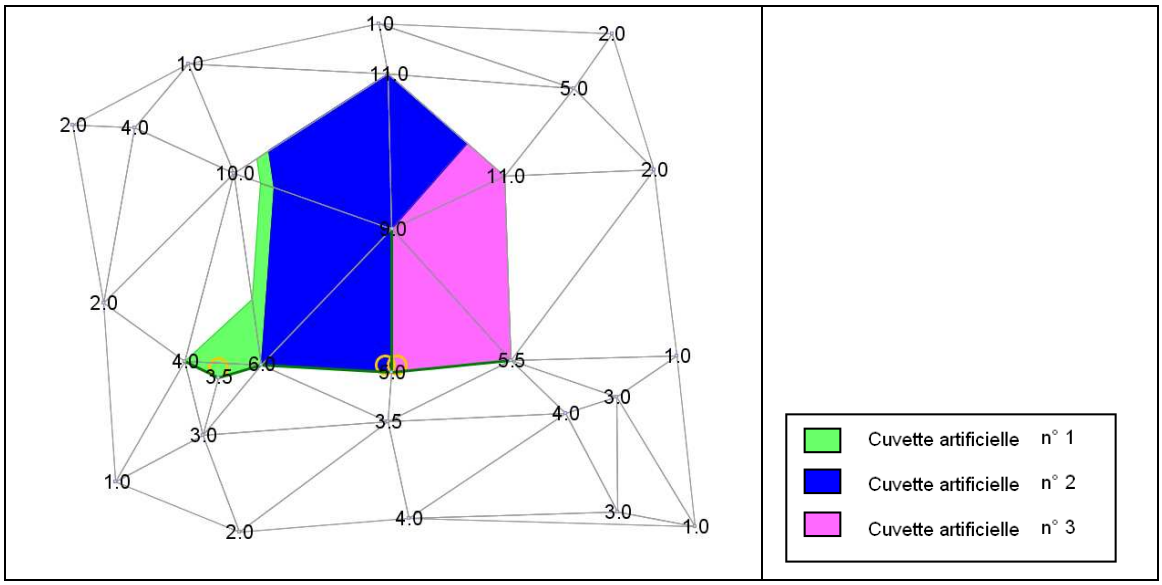


Figure 154. *Représentation des cuvettes artificielles (Bocher, 2005)*

Un graphe des cellules intermédiaire est construit. Dans ce graphe, les cellules topographiques correspondant à des arcs obstacles sont substituées par les cellules « Arc double » et « Point multiple ». Sur la figure 155 on peut voir le résultat de l'introduction des arcs obstacles sur la connexion des cellules du TIN. Dorénavant, les connexions se font parallèlement aux axes obstacles.

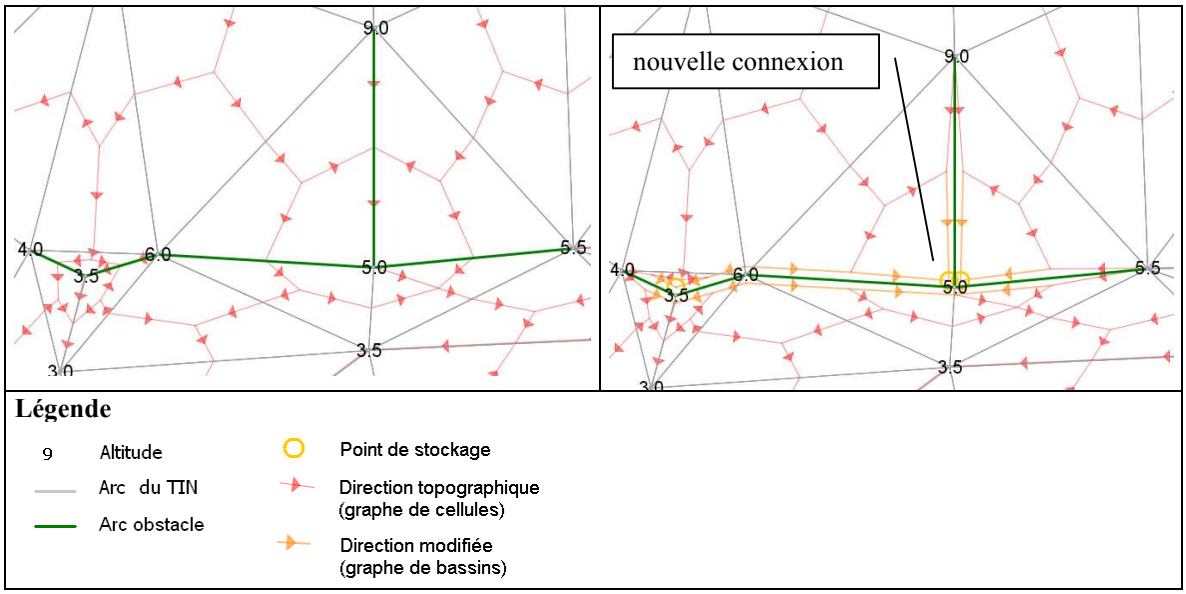


Figure 155. *Effet de la prise en compte des arcs obstacles sur le graphe de cellules. A gauche sans prise en compte des obstacles, à droite avec prise en compte des obstacles (Bocher, 2005)*

3.2.1.2. La connexion des cuvettes artificielles

L'étape de connexion des cuvettes artificielles consiste à transformer le graphe de cellules intermédiaire en graphe de bassins en établissant les connexions entre les cuvettes artificielles. De même que pour le traitement de la cuvette topographique, il s'agit de rechercher la cellule col permettant le débordement des eaux de surface. La recherche de la cellule col est réalisée le long des arcs obstacles. La méthode employée est une adaptation de l'algorithme « Road Enforcement Algorithm » développé par Duke et al (2003) pour simuler sur un MNT raster l'effet des routes sur les directions topographiques.

La méthode est la suivante :

Soit C xx une cellule exutoire anthropique,
Soit Nc xx le nœud représentant le col de la cuvette appartenant à un « Arc Double »,
Soit z une valeur d'altitude du TIN.
Soit H la hauteur de l'obstacle.

On considère à partir des données de la figure 156 que :

- Pour la cellule C1, Nc1 et Nc2 sont les cols. Leurs altitudes sont respectivement 9 et 6 mètres.

Si C1.z + H > Nc1.z alors Nc1 est l'exutoire de la cuvette anthropique C1.
Si C1.z + H > Nc2.z alors Nc2 est l'exutoire de la cuvette anthropique C1.

Si C1.z + H < Nc1.z et < Nc2.z alors C1 est l'exutoire de débordement de C1

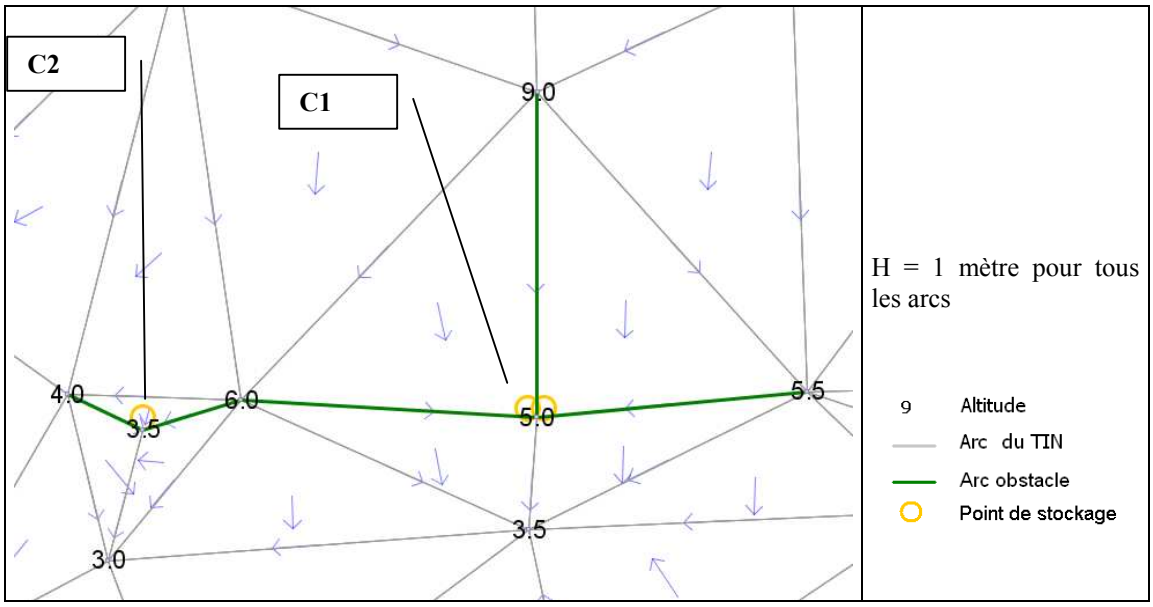


Figure 156. *Données de départ* (Bocher, 2005)

- Pour la cellule C1, la connexion se réalisera vers la cuvette C2. Le col de débordement est la cellule dont l'altitude est de 6 mètres (figure 157).
- Lorsque le col de débordement est situé à l'extrémité d'un arc obstacle non connexe à un autre arc obstacle alors la connexion est réalisée vers la cellule ayant la plus forte pente (figure 157).

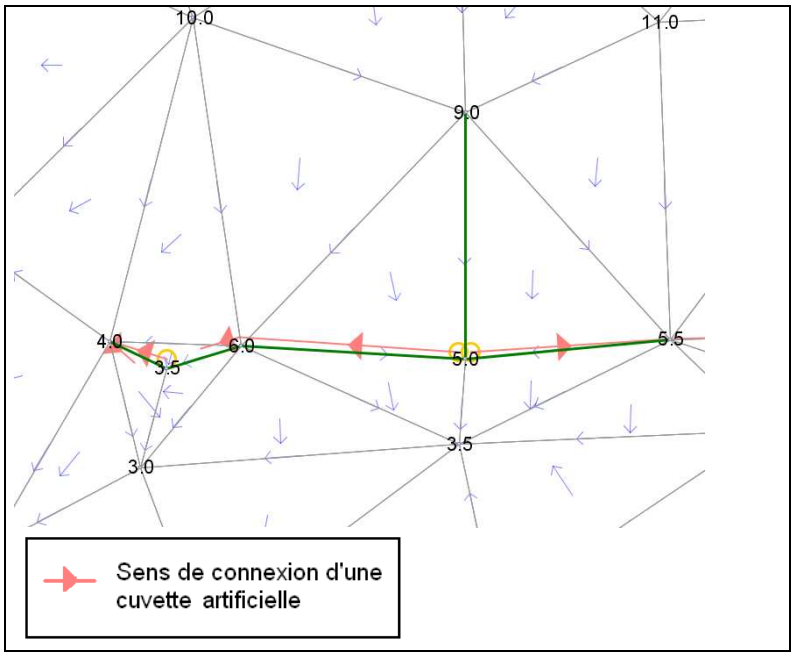


Figure 157. *Résultat de la connexion des cuvettes artificielles selon la méthode de Duke et al (2003).*

Remarques :

Si l'exutoire de la cuvette est une cellule nœud et si les arcs obstacles adjacents ont deux hauteurs différentes, alors la hauteur la plus basse est retenue.

Pour le cas des routes, la technique utilisée est identique excepté pour l'« arc double » situé du côté de la parcelle qui est considéré comme perméable (cf. chapitre 5). C'est-à-dire que dans le graphe de bassins une connexion topographique classique est autorisée des cellules parcelle vers les cellules voirie. En d'autre terme, les écoulements provenant des parcelles peuvent en l'absence d' « arcs obstacles » se jeter dans une route.

Pour intégrer pleinement le comportement spécifique des cellules appartenant à des cuvettes anthropiques, une « super cellule » bassin a été introduite dans le graphe de cellules intermédiaire. A l'image des cellules « Arc double » et « Point multiple », cette cellule recense les cellules exutoire associées à une cuvette ainsi que la cellule de débordement. Le graphe de cellules forme maintenant le graphe de bassins.

3.2.2. La prise en compte des arcs collecteurs

La prise en compte des arcs collecteurs se traduit par une re-connexion locale du graphe de bassins pour les cellules arcs et nœuds qui les représentent. La re-connexion est réalisée dans le sens longitudinal amont-aval (cf. chapitre 5).

Le procédé de re-connexion d'un arc collecteur est le suivant :

- les connexions en amont de celui-ci sont conservées,
- les connexions vers les cellules en aval sont supprimées et remplacées soit
    - par une connexion vers l'arc collecteur aval. Si ce dernier est à contre pente (cf. chapitre 5), la connexion forme une cuvette artificielle.
    - par une connexion vers la cellule ponctuelle associée au point bas de l'arc drainant si aucun arc collecteur vérifiant les conditions précédentes n'a été trouvée.

Un exemple du graphe de bassins re-calculé après prise en compte des arcs collecteurs est donné sur la figure 158.

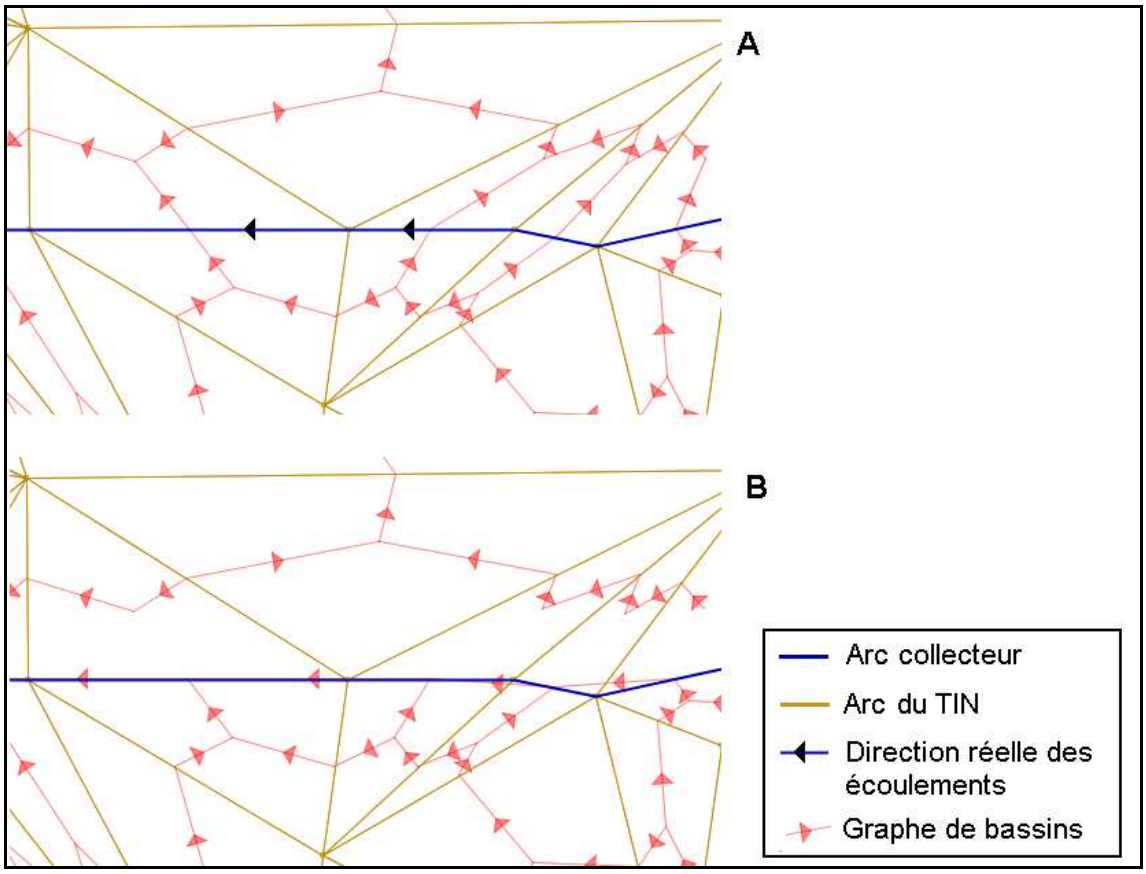


Figure 158. *Effet de l'intégration des axes de drainage sur la connexion des cellules : A avant prise en compte des arcs collecteurs, B après prise en compte (Bocher, 2005)*

Les arcs collecteurs sont considérés comme des arcs prioritaires sur toutes les autres cellules dans le graphe de bassins afin d'assurer une continuité des écoulements de l'amont vers l'aval. En effet, lors de l'expérimentation de la méthode, nous nous sommes aperçus qu'au niveau du nœud marquant l'intersection entre un « arc collecteur » et un « Arc double », l'algorithme identifiait une cuvette anthropique, bloquant ainsi les écoulements. La figure 159 représente le problème dans le cas d'un franchissement de route. La connexion de l'arc collecteur à l'aval du bord route est bloquée par les deux arcs adjacents « bord route ». Le nœud aval de l'arc collecteur est identifié comme un point multiple exutoire déconnectant les arcs A et B ainsi que toutes les cellules en aval.

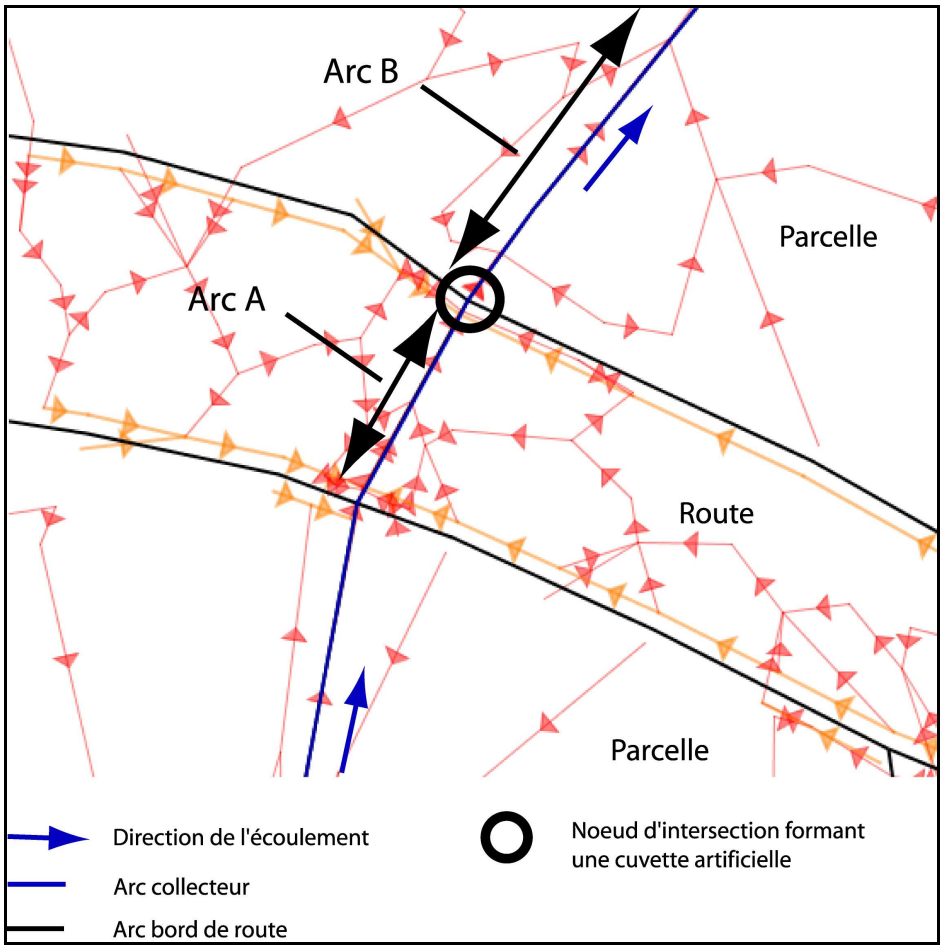


Figure 159. Déconnexion d'un arc collecteur (Bocher, 2005)

Pour corriger ce problème, le nœud exutoire est considéré comme perméable et la connexion rétablie entre A et B.

Remarque :

Les fossés de voirie sont associés au bord de route. Les autres fossés (fossé de talus, drain à ciel ouvert dans une parcelle) sont pris en compte comme des arcs « standards » lors de la connexion du graphe de bassins. Seule la topographie guide le comportement de l'eau dans le fossé. Aucune valeur de hauteur n'est associée pour qualifier sa profondeur.

3.3. Vers un automate cellulaire simplifié

Le temps nous a malheureusement manqué pour mettre en place l'automate cellulaire dynamique décrit dans le chapitre 5. La construction du graphe de bassins a nécessité un investissement très important pour tendre vers une représentation la plus fidèle possible des interactions entre les éléments du paysage et la topographie. L'individualisation des réponses hydrologiques des obstacles et le chaînage des écoulements ont constitué les points centraux. Les objectifs ont donc été réévalués pour proposer un automate cellulaire simplifié.

3.3.1. Principe de l'automate cellulaire simplifié

L'automate cellulaire associé au graphe de bassins est proche de celui décrit dans Langlois et Delahaye (2002). C'est un automate itératif synchrone. Il fonctionne par itérations successives sur l'ensemble des cellules du graphe en considérant que l'écoulement se produit en point de l'espace avec la même vitesse. Pour chaque cellule, deux variables sont dédiées au fonctionnement de l'automate :

- « Etat » qui correspond à l'état de la cellule
- « Valeur » qui est un registre mis à jour lors de chaque itération de l'automate.

Ces attributs sont calculés par itérations successives. Chaque itération comprend deux phases :

- Une première phase de transmission où la nouvelle valeur de la variable « Valeur » de la cellule est évaluée à partir des valeurs du flux sortant transmis par les connexions amont et de l'Etat de la cellule. A partir de cette valeur, le nouvel état de la cellule est calculé.
- Une seconde phase d'actualisation où les variables Etat et Valeur sont mises à jour avec les nouvelles valeurs calculées dans l'étape précédente.

Le nombre d'itérations dépend du nombre de cellules dans le graphe de bassins. Le processus s'arrête lorsque l'état stationnaire est atteint. Autrement dit, lorsque les cellules ne reçoivent ni ne transmettent plus de flux.

Contrairement à l'automate de Langlois et Delahaye (2002), les transferts de flux ne sont pas gérés par des connexions dynamiques, c'est-à-dire des connexions qui deviennent actives en fonction d'un volume d'eau accumulé. Les transferts sont réalisés par un graphe de

bassins où les conditions de débordement sont paramétrables. De plus, le flux correspond ici uniquement à la surface contributive transmise de cellules à cellules.

L'automate cellulaire est utilisé de deux façons :

- pour obtenir un bilan général des superficies cumulées sur les cellules du graphe de bassins
- pour connaître par itération les superficies cumulées de cellule à cellule.

La première opération permet de connaître le total des superficies cumulées pour chaque cellule du graphe de bassins. Le résultat est stocké dans une variable nommée « Accumulation ». Pour visualiser le résultat, un export de toutes les cellules du graphe est réalisé : face, arc, nœud, « Arc double », « Point multiple ». Cette opération peut être comparée au calcul de la grille d'accumulation sur des MNT raster (cf. chapitre 3).

La seconde opération consiste à récupérer pour un nombre d'itérations fixées par l'utilisateur la superficie cumulée sur une cellule du graphe de bassins. On obtient un échantillon de valeurs (itération et accumulation) utilisé pour produire un graphique en courbe : Le surfaçogramme selon Langlois et Delahaye (2002).

3.3.2. Le graphe de bassins paramétrable

Le graphe de bassins paramétrable est une approche qui doit être considérée comme transitoire. Son objectif est de permettre d'exploiter les connexions statiques dans l'automate cellulaire tout en réalisant des simulations cohérentes par rapport aux phénomènes observés sur le terrain.

Pour cela deux paramètres ont été introduits dans la procédure de re-connexion des cuvettes anthropiques. Ces paramètres sont :

- H_m pour la hauteur maximale de franchissement d'un obstacle (« Arc double »),
- H_{mr} pour la hauteur maximale de remontée des écoulements le long d'un obstacle (« Arc double »),

Pour comprendre le choix de ces deux paramètres nous nous appuierons sur les exemples de la figure 160.

Les figures 160 a et b représentent un TIN contraint dont le graphe de bassins a été calculé à partir de la méthode exposée précédemment. La hauteur des obstacles est de un mètre. Trois cuvettes topographiques ont été identifiées. Comme on peut l'apercevoir sur les deux figures, toutes les cuvettes anthropiques sont re-connectées. Or dans une perspective d'utilisation directe du graphe de bassins, toutes les connexions ne peuvent être acceptées,

notamment celles des cellules C1 et C2. Cela conduirait à une élimination systématique de l'effet des obstacles. De plus, sur le Sterenn des débordements de talus d'une hauteur de 1 mètre n'ont pas été observés même si après une succession d'évènements pluviométriques exceptionnels nous avons pu relever des accumulations d'eau atteignant une hauteur de près de 70 cm (cf. chapitre 4).

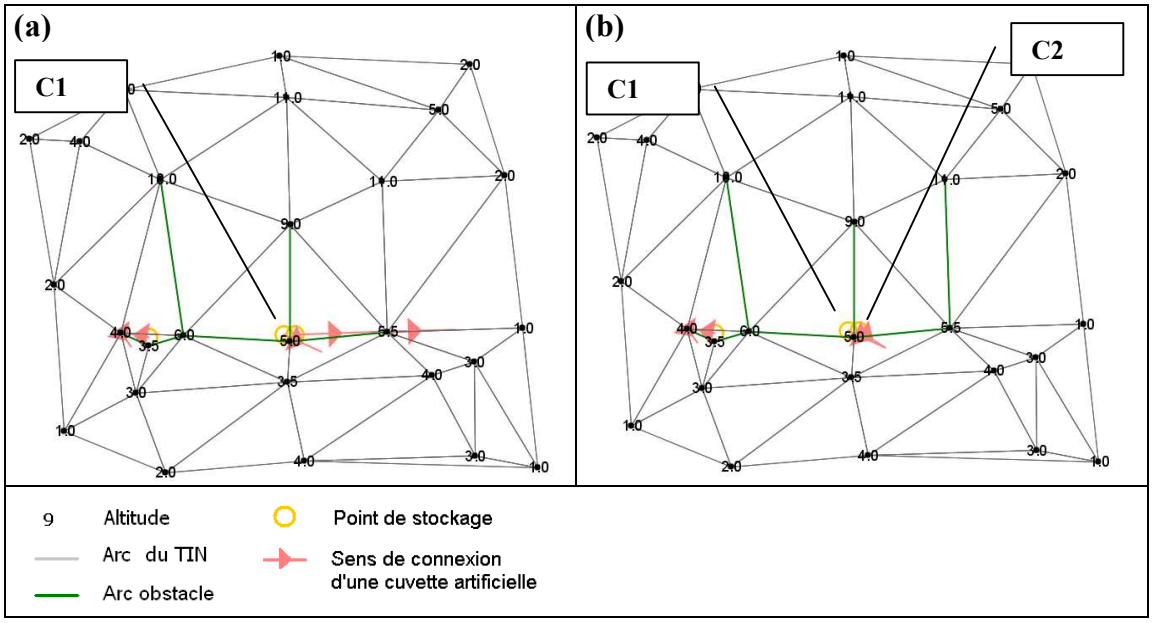


Figure 160. Le problème de débordement en amont des obstacles (Bocher, 2005).

<u>Utilisation de H_m</u>

Le paramètre H_m intervient donc pour limiter ce phénomène.

Soit, C xx une cellule exutoire anthropique,

Soit, Nc xx le nœud représentant le col de la cuvette appartement à un « Arc Double »,

Soit, z une valeur d'altitude du TIN.

Soit, H la hauteur de l'obstacle.

Soit, H_m la hauteur maximale de franchissement d'un obstacle

Soit, H_{mr} la hauteur maximale de remontée des écoulements le long d'un obstacle

L'application est la suivante :

C1 peut franchir l'arc obstacle si

Nc1 et Nc2 sont les cols de la cellule C1.

Si C1.z + H < Nc1.z et < Nc2.z alors C1 est l'exutoire de débordement de C1

ET

$H < H_m$

Les figures 161 a et b donnent le résultat de l'application de la méthode avec un H_m de 0.7 mètres. On peut remarquer que les cellules C1 et C2 sont maintenant déconnectées du graphe de bassins.

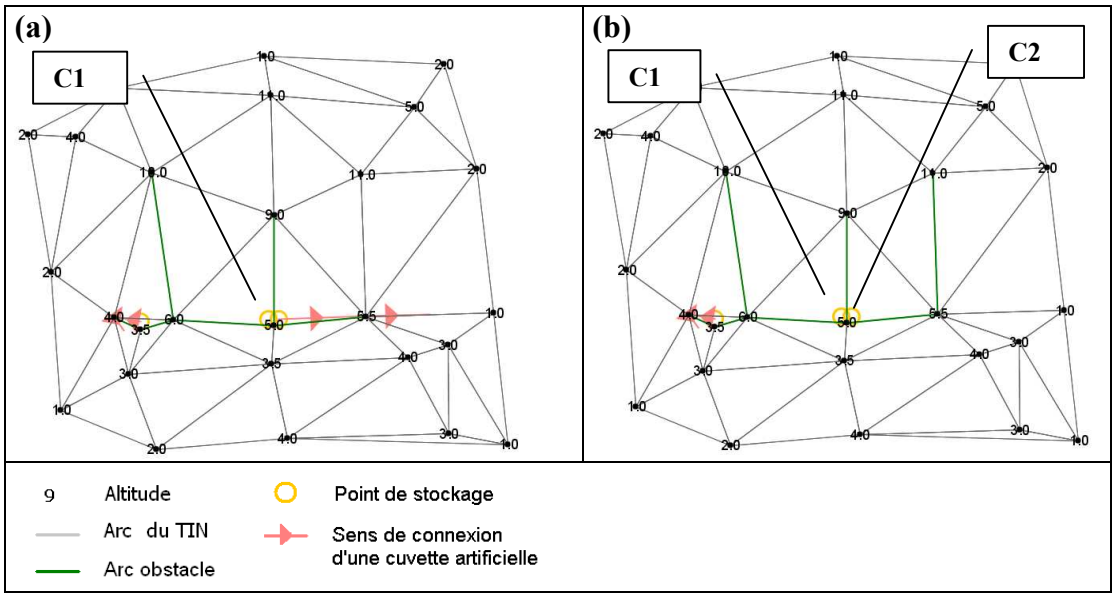


Figure 161. *Résultat avec le graphe de bassins paramétré (Bocher, 2005)*

Le paramètre H_{mr} est utilisé quant à lui pour éviter des remontées de pente trop importantes. Il s'agit de pouvoir contrôler les modifications qui sont induites par le paramètre H_m. Globalement, la connexion de la cuvette topographique le long de l'obstacle est autorisée si la différence de hauteur entre son point bas et son col est inférieure à la valeur H_{mr}.

Si ces paramètres permettent de casser certaines connexions dans le graphe de cellules le long des obstacles, en revanche il est très important d'insister sur le fait que les valeurs utilisées doivent être étalonnées à partir d'observations de terrain au risque sinon d'obtenir des connexions erronées.

3.3.3. Les cumuls de superficies de cellule à cellule

Les superficies transmises de cellule à cellule sont calculées à partir du coefficient de ruissellement *c* associé à chaque cellule surfacique (cf. chapitre 5). Les proportions de surface entrante et sortante dans la cellule sont calculées avec la formule suivante :

$$F_{in} = c * F_{out}$$

Avec $\mathbf{F}_{in}$: flux entrant dans la cellule
$\mathbf{F}_{out}$: flux sortant de la cellule
c : coefficient de ruissellement

Le résultat est stocké dans la variable « accumulation ».

3.4. Récapitulatif du fonctionnement de la modélisation

L'approche mise en œuvre pour modéliser l'influence des aménagements anthropiques sur les écoulements de surface à partir d'un TIN est relativement complexe car elle fait appel à de nombreuses opérations de traitements spatiaux. La figure 162 a donc pour objectif de donner au lecteur une vision plus globale de la démarche de modélisation. Il faut retenir qu'à l'issue de toutes ces opérations, nous disposons d'un graphe de bassins qui traduit par ses connexions les interactions entre les aménagements (voirie, obstacle), le réseau hydrographique naturel (axe de drainage naturel) et la topographie naturelle. Ce graphe constitue ensuite le support pour faire fonctionner l'automate cellulaire (calcul des surfaces cumulées) et dériver des indicateurs tels que les bassins d'alimentation qui seront présentés dans le chapitre suivant.

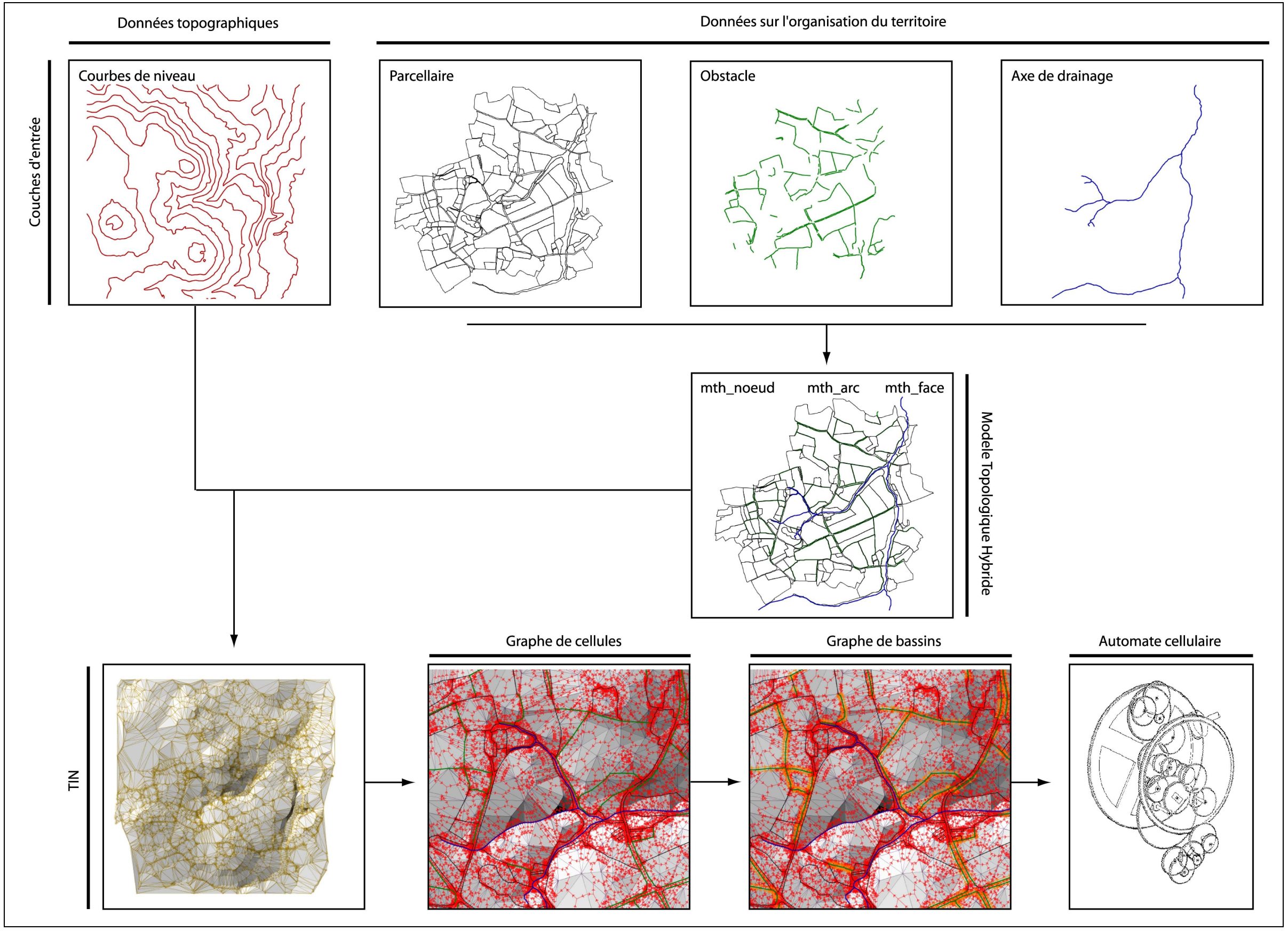


Figure 162. *Schéma récapitulatif des grandes étapes de la modélisation (Bocher, 2005)*

Chapitre 7. Application de la modélisation sur le sous-bassin versant du Sterenn

Ce chapitre traite de l'application du modèle HydroTIN au sous-bassin versant du Sterenn. Son objectif est double :

- valider les hypothèses et les mécanismes de modélisation par un calage terrain des paramètres et des résultats de la modélisation,
- cerner les relations et interactions qui s'établissent entre les éléments du territoire et qui structurent le cheminement de l'eau à l'échelle du bassin versant.

Le chapitre est organisé autour de trois parties :

- Dans la première partie, nous présentons les données utilisées ainsi que les traitements réalisés,
- Dans la deuxième partie, nous proposons un calage des paramètres du graphe de bassins au regard d'observations terrains,
- Enfin, la troisième partie concerne l'application du modèle sur le sous-bassin versant du Sterenn pour deux scénarii d'occupation du sol automne-hiver et printemps-été 2002-2003.

1. Préparation des données

1.1. Construction du Modèle Topologique Hybride (MTH)

Pour construire le MTH, nous avons dû adapter les données d'organisation du territoire que nous avions auparavant numérisées pour le compte du Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien. Ce travail est présenté en détail dans l'annexe 8.

Cette adaptation est déclinée en 5 étapes :

1. réorganisation thématique des couches,
2. contrôle sémantique,
3. complément géométrique,
4. contrôle de la qualité,
5. construction du MTH,

Nous ne présenterons ici que les étapes 1, 2, et 3 les étapes 4 et 5 ayant déjà été décrites dans le chapitre 6.

Réorganisation thématique des couches (couches d'entrée)

Cette étape consiste à réorganiser les données du Sterenn en trois couches thématiques : parcellaire, obstacle et axe de drainage. Pour cela :

- la couche parcellaire d'origine est conservée,
- la couche bocage est transformée en couche obstacle. Seules les entités géographiques représentant des talus sont conservées.
- la couche axe de drainage est formée par l'agrégation des couches fossés et hydrographie.

Pendant cette opération, chaque couche est dotée d'un nouveau schéma de données conformément aux spécifications énoncées dans le chapitre 5.

Contrôle sémantique

Le contrôle sémantique vise à s'assurer d'une part que les attributs nécessaires à la modélisation sont présents dans chacune des couches et d'autre part qu'ils respectent certains formats de stockage (annexe 10). Pour la couche parcellaire, il s'agit par exemple de vérifier si chaque type d'occupation du sol est renseigné par un coefficient de ruissellement.

Complément géométrique

Le complément géométrique consiste à alimenter la couche parcellaire de polygones représentant la voirie. En effet dans le jeu de données du Sterenn, nous ne disposons que de la localisation des axes routiers (figure 163, (a)). Or pour prendre en compte la voirie dans la modélisation, celle-ci doit être représentée par des polygones, qui plus est, jointifs aux bords de parcelles. Compte tenu de la taille du territoire, la production des polygones de voirie a été réalisée par une suite de traitements spatiaux. La méthode est la suivante :

- autour de chaque tronçon de la couche axe de voirie on réalise une zone tampon grossière d'une largeur de 20 m (figure 163, (b)).
- on calcule ensuite la différence géométrique entre les entités buffer et une couche blocs parcellaires correspondant à l'union de toutes les parcelles jointives (figure 163, (c) et (d)).

Au final on obtient des polygones totalement adjacents aux limites des parcelles et correspondant à l'emprise de la voirie (figure 163, (d)).

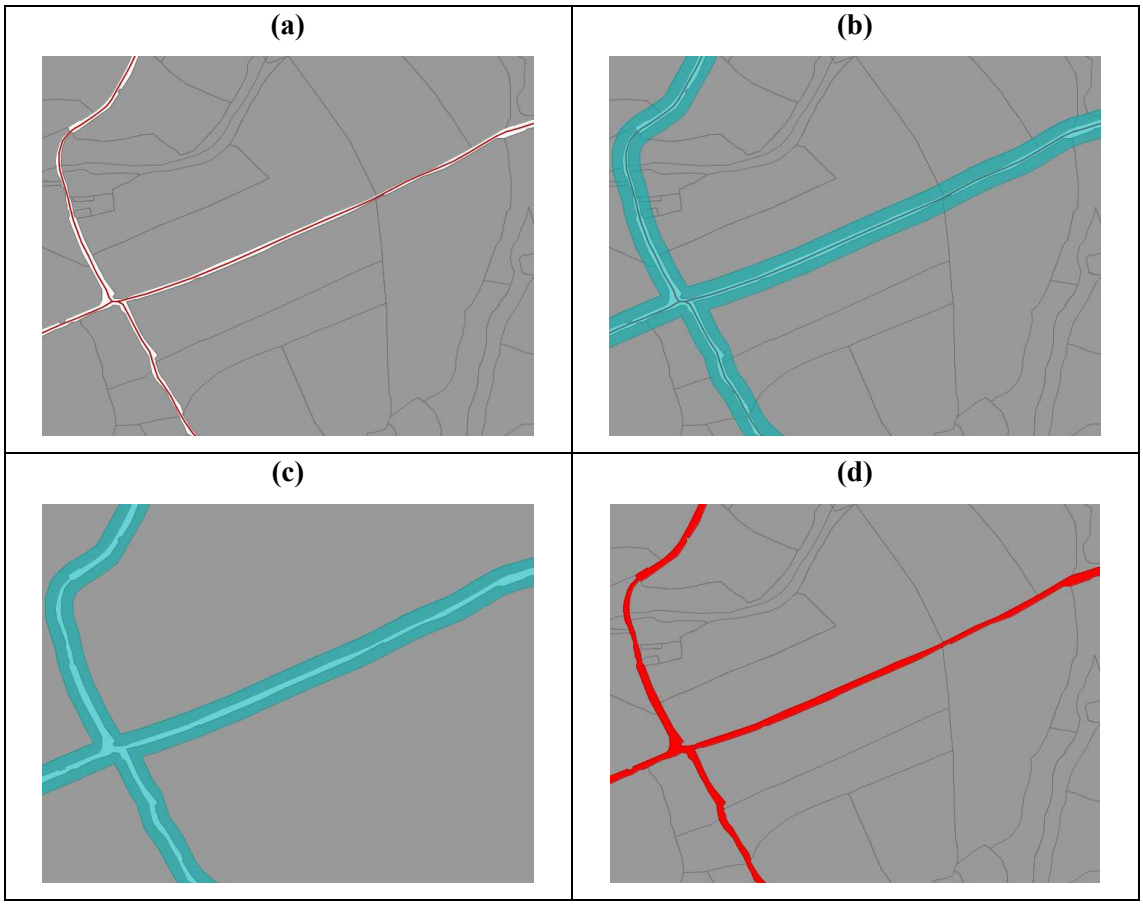


Figure 163. *Méthode de production par traitements spatiaux des polygones représentant la voirie* (Bocher, 2005)

Ces nouvelles entités sont ajoutées à la couche parcellaire et identifiées avec l'attribut voirie dans le champ « type_occ ».

Lorsque ces données d'entrée sont préparées, elles subissent alors les contrôles de qualité présentés dans le chapitre 6, puis elles sont utilisées pour construire le MTH.

Pour terminer, les couches géographiques thématiques ainsi que les couches MTH (nœud, arcs et face) sont importées dans une base de données PostGIS sous la forme de tables spatiales. Afin de retrouver facilement les tables arc, nœud et face, une table attributaire intermédiaire est ajoutée. Cette table appelée « mth_informations » a aussi pour objectif de permettre de stocker plusieurs MTH dans une même base de données. Pour cela, elle archive les noms des MTH existants («nomModele ») , les noms des couches qui les composent (« nomCouche »), le nombre d'objets (« nd_objets ») ainsi que la date de construction du MTH (« date_construction »).

La figure 164 donne une vue de l'implémentation définitive des données dans le SGBD PostGIS. Le MTH est appelé sterenn_2003 en référence au territoire d'étude et à la saison culturale modélisée.

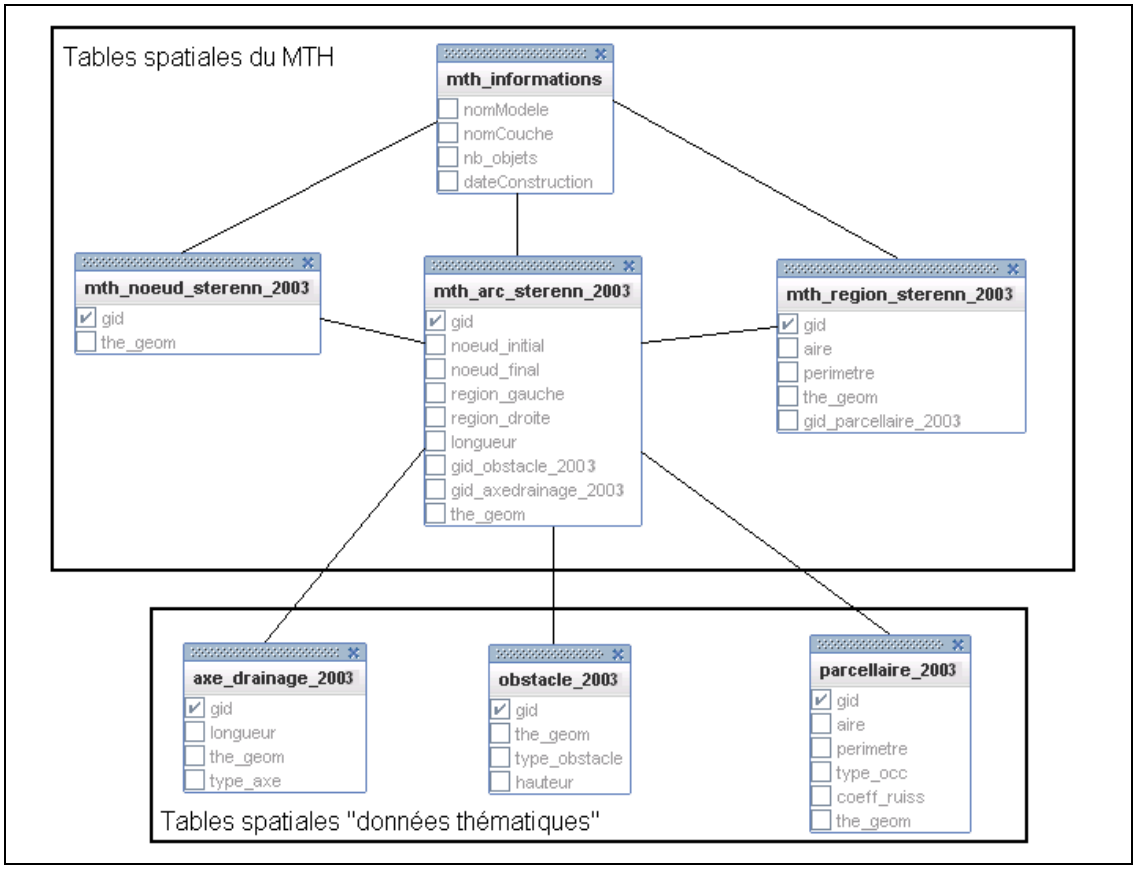


Figure 164. *Le modèle physique de la base de données du Sterenn (Bocher, 2005)*

1.2. Construction du TIN

1.2.1. Source de données

Les données topographiques utilisées sont un fichier de courbes de niveau échantillonnées en altimétrie tous les 4 mètres. C'est après une série de tests que nous avons retenu cet échantillonnage qui offrait un juste équilibre entre une description cohérente de la topographie et le nombre de triangles représenté dans le TIN (environ 105 000 uniquement pour une triangulation topographique avancée).

Ces courbes de niveau ont été extrait d'un MNT raster issu d'une restitution stéréoscopique des photographies aériennes de l'IGN au 1/25 000 pour le vol de 1998. Le MNT a été produit avec l'aide d'un photogrammètre professionnel au cours d'un stage au laboratoire

Reso (Falourd, 2003). L'erreur planimétrique est estimée à +/- 1,3 mètres et l'erreur altimétrique +/- 1,2 mètres, sa résolution spatiale est de 5 mètres.

1.2.2. Données intégrées dans le TIN

Le TIN contraint est produit à partir des arcs du MTH en utilisant la méthode des skeletons densifiés (cf. chapitre 6). Les axes de drainage naturel sont intégrés avec un décaissement de 0,7 mètres. Les altitudes des points sommet sont interpolées linéairement en supprimant les recoupements de pente. A titre d'information, le TIN final comporte 283 199 cellules dont 94 211 faces, 141 599 arcs et 35 007 nœuds.

A ce stade, il est important de signaler que l'introduction des contraintes ne perturbe que très peu la distribution des pentes et des orientations. Les moyennes et les écart-types sont quasi similaires (tableau 27).

	TIN avancé		TIN contraint	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
pente	4,4	4,7	4,6	4,6
orientation	174,1	115	175	114

Tableau 27. *Moyenne et écart type des variables pente et orientation des TIN*

Les cartes de la figure 165 montrent que les perturbations des orientations de versants sont très localisées, principalement sur les bords du TIN. Lors du passage du TIN avancé au TIN contraint la distribution spatiale des orientations est très largement respectée. Dans les deux cas, on distingue nettement la forme de la topographie, les lignes de crêtes et les talwegs. Ces observations sont confirmées par la figure 166 où l'on peut voir que l'intégration des contraintes linéaires conduit à de très faibles variations des pourcentages de surface par classes d'orientation. Ces résultats sont donc encourageants pour mener une modélisation des écoulements de surface en cohérence avec l'organisation de la topographie. Néanmoins, si elles sont très faibles, les variations restent effectives. Il serait donc intéressant par la suite d'étudier localement les conséquences de ces variations afin de vérifier qu'elles n'entraînent pas une modification du parcours de l'eau.

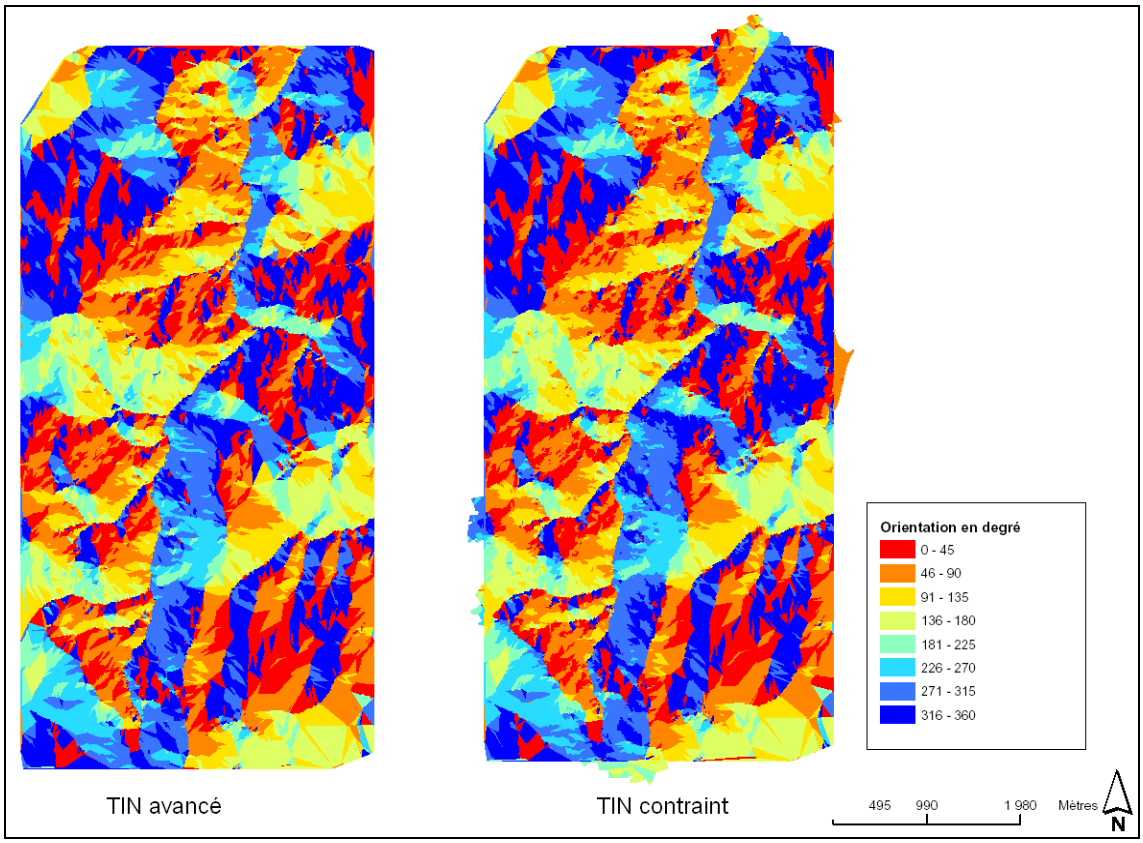


Figure 165. *La distribution spatiale des orientations de versants selon le type de TIN (Bocher, 2005)*

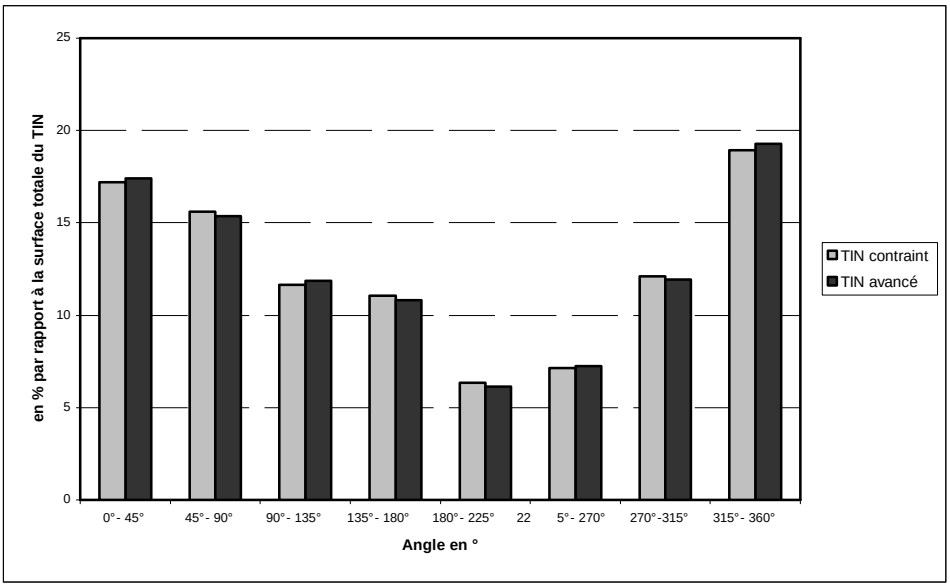


Figure 166. *Distribution statistique des orientations des faces des TIN en pourcentage par rapport à leur superficie totale (Bocher, 2005)*

1.3. Données d'occupation du sol et coefficients de ruissellement

Les données d'occupation du sol dont nous disposons ont été inventoriées au mois de mars 2003. Ces données sont intéressantes pour réaliser un premier diagnostic de l'effet de l'organisation spatiale des cultures sur les surfaces transférées à l'échelle du bassin versant et sur l'importance des aménagements linéaires. Cependant, comme nous l'avons signalé dans le chapitre 4, les phénomènes de ruissellement et les transferts de polluants par ruissellement sont rythmés pendant l'année culturale par deux périodes : automne-hiver et printemps-été.

Pour rendre compte de l'influence de l'occupation du sol d'automne-hiver dans la modélisation, nous avons choisi une démarche simple de recomposition du calendrier agricole de la saison 2002-2003 (tableau 28). Cette recomposition est réalisée sur la base des informations présentées dans le chapitre 4. Une seule hypothèse est émise, elle concerne l'implantation d'une culture intermédiaire piège à nitrate (CIPAN) avant le semis de maïs.

	Oct		**Nov**		**Déc**	**Janv**	**Févr**	**Mars**	**Avr**	**Mai**	**Juin**	**Juil**	**Août**		**Sept**		**Oct**
quinzaine	1	2	1	2									1	2	1	2	1
succession			culture intermédiaire piège à nitrate				labour		semis maïs		croissance maïs					récolte maïs	
succession		semis céréales			croissance céréales							récolte céréales					
succession	croissance colza											récolte colza					
succession	récolte choux																
succession	pâture RGA																
succession	prairie permanente																

Mois de l'inventaire — déduction — hypothèse

Tableau 28. *Recomposition de la saison culturale 2002-2003*

A ce stade, nous avons retenu deux scenarii d'occupation du sol :

- un scénario janvier à mi-février pour la période automne-hiver,
- un scénario avril à mai pour la période printemps-été.

Ils correspondent aux mois les plus sensibles en terme de ruissellement de surface et de transfert de produits phytosanitaires, compte tenu des conditions culturales, des caractéristiques physiques et des pratiques agricoles sur le Sterenn (cf. chapitre 4). Rappelons que ces périodes possèdent des conditions optimales de ruissellement (cf. chapitre 4) :

En janvier-février, la couverture du sol est faible et la battance développée suite aux cumuls des précipitations.

En avril-mai, les parcelles de cultures de printemps sont dénudées et à partir de mi-avril des précipitations de forte intensité peuvent être enregistrée.

L'objectif de ces scenarii est d'essayer de cerner la distribution spatiale des aires émettrices de ruissellement et d'essayer de mettre en valeur le rôle potentiel des aménagements linéaires dans le contrôle des surfaces mobilisées de la parcelle au cours d'eau.

Le tableau 29 récapitule pour chaque scénario les types d'occupation du sol ainsi que les coefficients de ruissellement retenus. Il convient d'être très prudent quant à leur interprétation et à leur généralisation. Les coefficients utilisés sont une transposition de résultats expérimentaux au contexte du sous-bassin versant du Sterenn. Ils correspondent à des conditions spécifiques : type de culture, densité du couvert, antécédent pluviométrique, valeur de la pente, intensité et durée des précipitations lors de l'observation ou de la simulation (Auzet, 1990 ; Delahaye ; 2002). Or ces paramètres sont extrêmement variables dans l'espace et le temps. Les valeurs choisies ne peuvent fournir une représentation précise de la réponse hydrodynamique du bassin versant. Pour cela, il aurait fallu disposer de références expérimentales locales. L'usage de ces coefficients doit être replacé impérativement dans le contexte de ce travail de recherche qui vise avant tout à améliorer la prise en compte des réseaux anthropiques dans le fonctionnement des écoulements de surface à l'échelle du bassin versant. L'utilisation de coefficients a pour objectif de préciser l'influence de l'occupation du sol et de quantifier les aires de production de ruissellement. Il s'agit de comparer deux situations culturales, jugées à risque pour les transferts d'eau et de la charge solide et chimique associée.

Données mars 2003	**Scénario Janvier- mi-février**		**Scénario Avril-mai**	
	Occupation du sol	**Coefficient de ruissellement**	**Occupation du sol**	**Coefficient de ruissellement**
céréales	céréales en croissance	0,2	céréales en croissance stade avancé	0,2
semis de maïs	CIPAN	0,05	semis de maïs	0,4
colza	colza en croissance	0,05	colza croissance stade avancé	0,05
choux-fleurs résidus	récolte de choux	0,2	choux-fleurs résidus	0,2
prairie temporaire (RGA)	prairie temporaire (RGA)	0,05	prairie temporaire (RGA)	0,05
prairie permanente	prairie permanente	0,05	prairie permanente	0,05
bois	bois	0,05	bois	0,05
bâti et voirie	bâti et voirie	0,4	bâti et voirie	0,4
plan d'eau	plan d'eau	1	plan d'eau	1

Tableau 29. *Occupation du sol et coefficient de ruissellement pour chaque scénario*

2. Validation des paramètres du graphe de bassins

Comme nous l'avons signalé dans le chapitre 6, la mise en œuvre d'HydroTIN nécessite une première phase de validation du graphe de bassins afin de définir les paramètres qui assurent la meilleure représentation de l'effet des aménagements anthropiques. Il s'agit de tendre vers un « équilibre » entre le nombre et la localisation des cuvettes artificielles obtenues avec HydroTIN et celles identifiées sur le terrain.

Concernant le Sterenn et plus largement sur l'ensemble du Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien, l'absence de données hydrographiques et de carte des sols rend la tâche délicate. Compte tenu de la taille du site d'étude, nous avons décidé de valider le graphe de bassins à partir d'observations réalisées sur quatre secteurs du sous-bassin versant (figure 168). Ces secteurs ont été retenus car ils permettaient de visualiser très nettement le rôle des aménagements linéaires. Ils ont fait l'objet de trois suivis au cours du mois d'avril :

- début avril (03/04/2004 et 03/05/2004),
- mi-avril (du 16/04/2004 au 19/04/2004),
- fin avril (29/04/2004 et 30/04/2004).

L'objectif est simple : **faire varier les paramètres de calcul du graphe de bassins et comparer pour chaque site les points de stockage non-connectées**, **c'est-à-dire bloquant les écoulements de surface avec celles dont l'efficacité à été confirmée sur le terrain pendant la période d'observation**. A terme, nous devons aboutir à une sélection de paramètres qui validerait la réponse des aménagements modélisée avec HydroTIN.

Nous avons conscience que cette démarche peut paraître réductrice. La localisation des points de stockage artificiels identifiés avec HydroTIN est indubitablement liée à la qualité des données d'entrée, notamment aux données topographiques. Or, nous l'avons largement souligné au cours de ce travail, les données ne sont jamais parfaites et ne traduisent qu'une approximation de la réalité. Il est donc inévitable que des décalages soient observés entre l'objet ou le phénomène modélisé et sa représentation sur le terrain et ce malgré les efforts pour utiliser un même référentiel géographique. Cependant, cette démarche nous a semblé nécessaire au moins pour infirmer ou confirmer la cohérence des phénomènes modélisés, comme par exemple, le déplacement latéral des écoulements de surface le long d'un talus situé en travers de la pente.

2.2. Caractéristiques pluviométriques pour les périodes d'observation

Les données pluviométriques sont issues de la station Météo-France de la commune de Cavan, localisée au sud-ouest du sous-bassin versant du Sterenn (annexe 11).

Le cumul pluviométrique mensuel pour le mois d'avril est excédentaire par rapport aux normales, 126,2 mm au lieu de 90 mm. Le mois d'avril se distingue par trois épisodes pluvieux (figure 167) :

- les huit premiers jours d'avril avec un total 15,8 mm,
- du 16 au 20, avec un total de 26 mm dont 17,6 mm pour le 18,
- du 27 au 30 soit en trois jours, il est tombé pratiquement l'équivalent d'un mois moyen (84,4 mm) dont 41,9 pour la seule journée du 29.

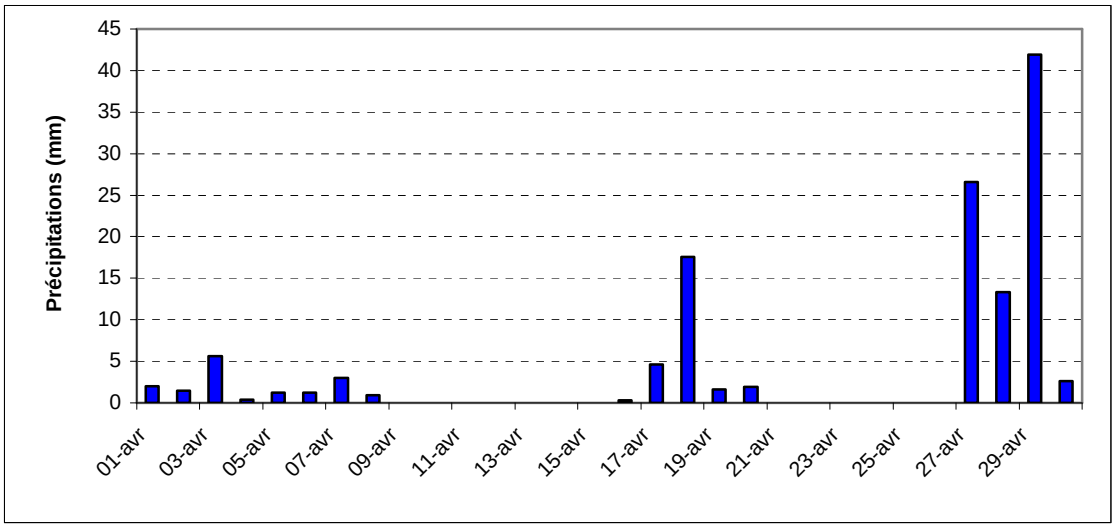


Figure 167. *Cumul journalier des précipitations pour le mois d'avril.*
(Source : station pluviométrique de Cavan, Météo-France)

Sur les parcelles emblavées et battues par les averses hivernales, ces précipitations ont réactivé le ruissellement de surface. Les sols avaient été préparés par un mois de janvier largement excédentaire : 180 mm avec de grosses averses 44 mm.

Sur les semis de maïs, la succession d'épisodes avec des intensités et des apports croissants a favorisé progressivement la formation d'une croûte de battance. Ces conditions météorologiques, nous ont permis, fin avril, d'observer à plusieurs reprises, les phénomènes de ruissellement, d'accumulation d'eau à l'amont des talus et le passage sur la voirie.

2.2. Présentation des sites

Les quatre sites ont été retenus pour leur position dans le bassin versant, leurs caractéristiques topographiques, l'occupation du sol et l'organisation des aménagements linéaires, notamment les talus.

- **<u>Site A :</u> un réseau de talus** (figure 169, 1)

Le site A est localisé sur la rive gauche du cours d'eau du Sterenn. Il correspond à un secteur ou la maille bocagère est structurée. Plusieurs talus sont connectés entre eux, formant des unités potentielles de stockage des eaux. Le site est caractérisé par des pentes régulières.

Il est composé de trois parcelles :

- la parcelle 1 d'une longueur moyenne de 120 mètres est occupée par un semis de maïs orienté parallèlement aux courbes de niveau. La pente moyenne est de 4,5 %.
- les parcelles 2 et 3 d'une longueur de 350 mètres sont occupées par un blé au sol battant. La pente moyenne est faible proche de 2,5 %.

Ces trois parcelles sont ceinturées par un réseau de talus qui dévie et bloque les écoulements de surface. Sur la parcelle 1 et le groupe de parcelles 1 et 2, nous avons pu identifier respectivement deux zones de blocage des écoulements, situées aux extrémités du talus aval. Malgré les fortes précipitations de fin avril (42 mm) le rôle de ces cuvettes reste bien individualisé : aucun débordement latéral le long du talus n'a été observé, les eaux sont restées cantonnées dans chacun des points de stockage.

- **<u>Site B :</u> des talus résiduels** (figure 170, 1)

Le site B est localisé sur le versant est du Sterenn. Il comprend trois parcelles emblavées (1, 2 et 3). Il correspond à un secteur ou le linéaire de talus est résiduel et fragmenté.

Les parcelles 1 et 2

Les écoulements de surface orientés conjointement par la topographie et le sens du travail du sol convergent vers un talus résiduel en bord de route. La topographie des parcelles est perturbée par un micro-talweg dont la longueur est de 200 mètres.

Ce talus est fragmenté en trois entités (t_1, t_2 et t_3).

Les entités t_1, t_2 détournent les écoulements provenant de la parcelle 2. Au niveau des déconnexions, les écoulements déviés se jettent dans la voirie en contre-bas.

L'entité t_3 par sa position topographie (en rebord du secteur de convergence des écoulements) et la forme en v de son talus tournée vers la route, permet le blocage d'une petite partie des écoulements de la parcelle 1.

Lors de l'épisode pluvieux de fin avril, d'importantes concentrations en eau et des dépôts de sédiments ont été observés au niveau de la brèche entre les talus t_2 et t_3. Cette concentration correspond à l'exutoire du micro-talweg et des apports latéraux du talus t_2. Le talus t_3 a quant à lui continué de bloquer une part minime des écoulements de la parcelle 1.

La parcelle 3

La parcelle 3 comprend un talus de ceinture scindé par deux brèches. Une légère dépression le long du talus central avait été identifiée début avril. Elle présentait quelques dépôts de particules de terres. Cependant, dès les pluies de la mi-avril, l'effet de cette dépression a été annihilé par des apports importants de ruissellement qui se sont concentrés grâce au travail du sol.

- **<u>Site C :</u> un talus de ceinture continu** (figure 171, 1)

Le site C est localisé sur la rive droite du Sterenn en partie inférieure de versant. Il s'agit d'une parcelle de maïs dont la limite aval est marquée par un talus de ceinture continu. La topographie de la parcelle est individualisée par deux secteurs : un secteur sud ou les pentes sont légèrement supérieures à 5 % et un secteur nord ou les pentes sont plus faibles de l'ordre de 3 %. Le sol est travaillé dans la direction des pentes.

Le long du talus de ceinture deux secteurs d'accumulation des écoulements de surface ont été identifiés, l'un au nord (A), l'autre au sud (B). La réponse du talus aux précipitations d'avril est identique aux observations réalisées sur le site B. Le point de stockage A est rapidement comblé par les eaux provenant de la parcelle grâce à une situation topographique et agraire favorable. Il est localisé dans un axe de convergence topographique et le sens de travail du sol est orienté dans sa direction. D'ailleurs à l'extrémité du talus, l'accumulation des eaux est telle que l'agriculteur a réalisé une tranché pour les évacuer vers le cours d'eau.

- **<u>Site D :</u> un talus de rive continu** (figure 172, 1)

Le site D est localisé en tête d'un affluant du Sterenn dans un secteur de talus résiduels ou les pentes sont régulières et douces (pente moyenne entre 2 et 3 %). Il comprend deux parcelles de maïs (1 et 2) qui sont déconnectées du talweg principal par un imposant talus de ceinture (220 mètres). Ce dernier joue un rôle prépondérant dans le blocage des eaux provenant

des parcelles de maïs. Quatre secteurs d'accumulation majeure ont été relevés. Le talus est composé par une alternance de décrochements concaves qui permettent un stockage systématique des eaux de ruissellement excepté sur les extrémités latérales où l'on a pu observer une déviation des écoulements vers la zone boisée adjacente au cours d'eau.

2.3. Protocole de validation

Nous calculons plusieurs graphes de bassins en modifiant uniquement le paramètre qui contrôle la hauteur maximale de remontée des écoulements le long d'un obstacle (H_{mr}). La hauteur maximale de franchissement d'un obstacle (H_m) est fixée à 0,7 mètres. Elle correspond à la hauteur maximale d'accumulation observée lors des campagnes de terrain (cf. chapitre 4). Les cuvettes topographiques sont éliminées en forçant la remontée des écoulements. Pour chaque graphe de bassins, nous exportons les points de stockage artificiel connectés et non connectés le long des talus ainsi que les directions prises par l'écoulement. Ces informations sont comparées avec les observations de terrain présentées ci-dessus.

La valeur de départ pour le calcul du premier graphe est fixée 0,05 m. Cette valeur est cumulée jusqu'à atteindre la hauteur de franchissement de 0,7 mètres.

2.4. Analyse des résultats

Dans l'ensemble, on peut remarquer une bonne correspondance entre les points de stockage artificiels identifiés à partir du graphe de bassins et ceux observés sur le terrain.

- **Sur le site A** (figure 169, 2 et 3)

Le graphe de bassins détecte cinq points de stockage artificiels, trois dans la parcelle de semis de maïs (A, B, C) et deux à l'amont du talus des parcelles de blé (D et E). La modification des paramètres ne permet pas d'obtenir le même nombre de points de stockage entre la modélisation et l'observation de terrain. Entre 0,05 et 0,25 le graphe de bassins gomme l'effet de la cuvette A observé sur le terrain et crée une cuvette artefact E le long du talus des parcelles 1 et 2. Cet artefact est éliminé lorsque le paramètre atteint la valeur de 0,3.

- **Sur le site B** (figure 170, 2 et 3)

Un seul point de stockage artificiel est identifié par le graphe de bassins. Il est localisé dans les parcelles de blé 1 et 2. Dans la parcelle de blé 3, les écoulements interceptés par les tronçons de talus sont déviés latéralement. Lorsqu'ils parviennent aux extrémités, ils sont connectés au talweg. Comme pour le site A, l'effet de la cuvette A est annulé lorsque la valeur

de H_{mr} est de 0,3 mètres. L'eau accumulée le long du talus se jette alors dans la route en contre-bas.

- **<u>Sur le site C</u>**(figure 171, 2 et 3)

Trois points de stockage artificiel A B et C sont détectés. De 0,05 à 0,25 seul le point de stockage B est considérée comme bloquant les écoulements. Le point de stockage A observé sur le terrain n'est pas conservé dans le graphe de bassins. Des la valeur de 0,05 il disparaît. A partir de 0,3 le point de stockage B est reconnecté au réseau d'écoulement. Le talus passe alors d'un statut d'obstacle bloquant à un statut d'obstacle déviant. Pour HydroTIN, le talus de ceinture détourne les écoulements de surface de la parcelle vers ses deux extrémités.

- **<u>Sur le site D</u>**(figure 172, 2 et 3)

Trois points de stockage A, B et C sont identifiés. Les points de stockage B et C sont conservés entre 0,05 et 0,2. A 0,25 la cuvette B est connectée à la cuvette C, augmentant ainsi la taille de la cuvette C. Au-delà de 0,3 la dernière cuvette est éliminée. Le talus est considéré sans effet sur les écoulements. On peut voir ici que selon la valeur utilisée, la distance latérale de détournement des écoulements peut être augmentée considérablement. Ainsi avec la valeur de 0,3 les écoulements interceptés de la parcelle 1 longent le talus sur une distance de 200 mètres.

Pour ces quatre sites, la valeur de **0,25** apparaît comme une valeur seuil pour permettre une bonne correspondance entre les points de stockage artificiels observés et modélisés. En effet au-delà la quasi-totalité des points de stockage est éliminée. Pour l'ensemble du sous-bassin versant, cette valeur semble aussi cohérente. Le graphique de la figure 173 montre qu'elle correspond à une rupture significative dans le nombre de points de stockage non-connectés. Cependant, il faut aussi remarquer que cette valeur conduit à la suppression de nombreuses petites dépressions le long des talus. Sur le site A et sur le site D, deux cuvettes dont l'efficacité a été avérée sur le terrain sont ainsi éliminées. On voit ici la limite de la méthode de validation qui ne peut que « approcher » l'effet réel des talus et borne l'utilisation du modèle à des conditions météorologiques spécifiques (date d'observations). A ce stade, il paraît indispensable par la suite de faire évoluer le graphe de bassins pour prendre en compte des connexions dynamiques en relation avec les volumes de stockage ce qui permettrait d'obtenir des paramètres de calage plus proches des conditions au limite. De plus, il serait nécessaire de préciser la sensibilité du modèle en fonction de la qualité des données topographiques utilisées. En effet, à l'heure actuelle rien ne nous garanti que la valeur de 0,25 soit adaptée pour toutes les configurations topographiques. Nonobstant, nous avons décidé de retenir la valeur de 0,25 pour réaliser les modélisations sur le sous-bassin versant du Sterenn.

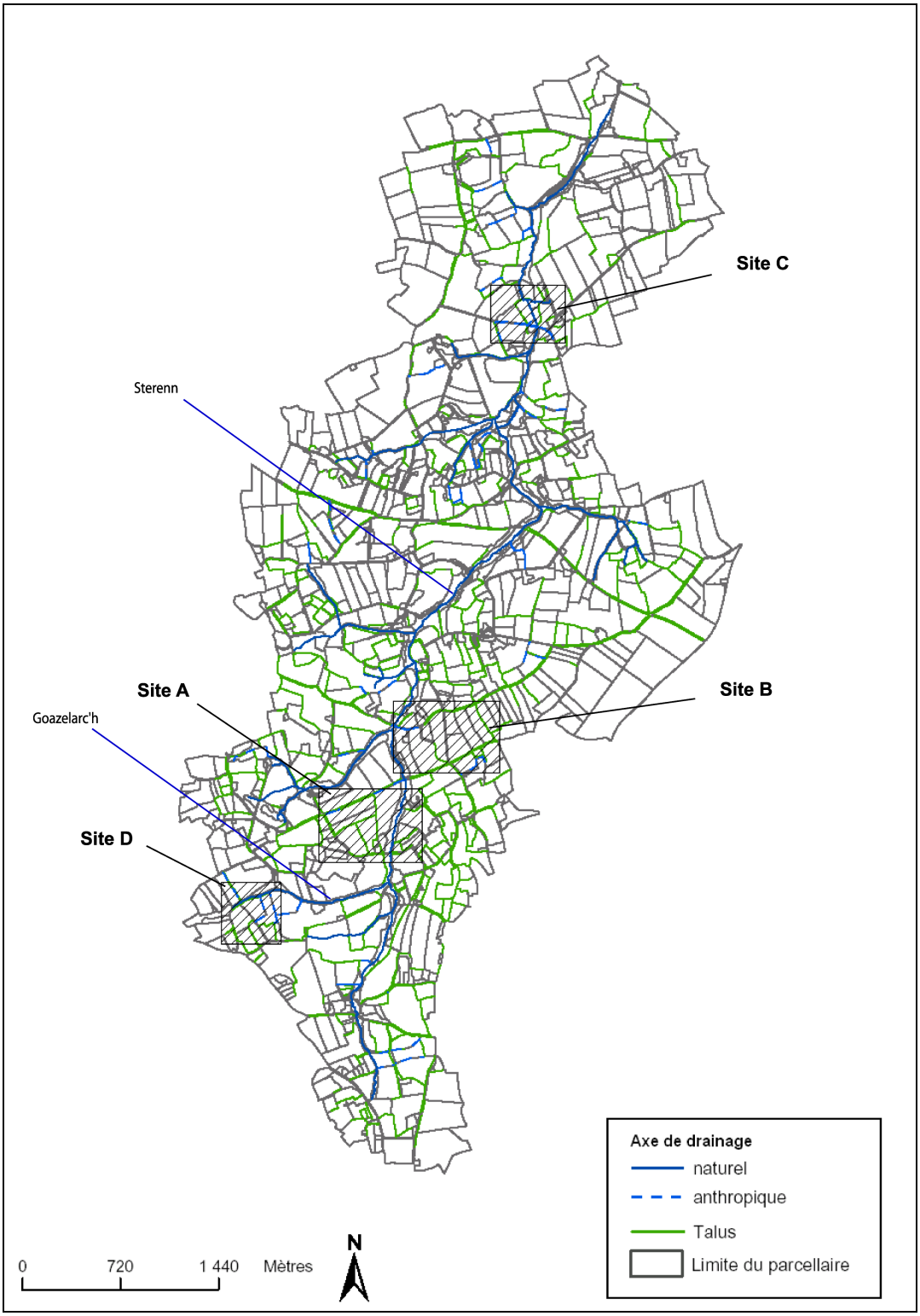


Figure 168. *Localisation des sites pour le calage du modèle (Bocher, 2005)*

Figure 169. *Observation et modélisation des points de stockage sur le site A*

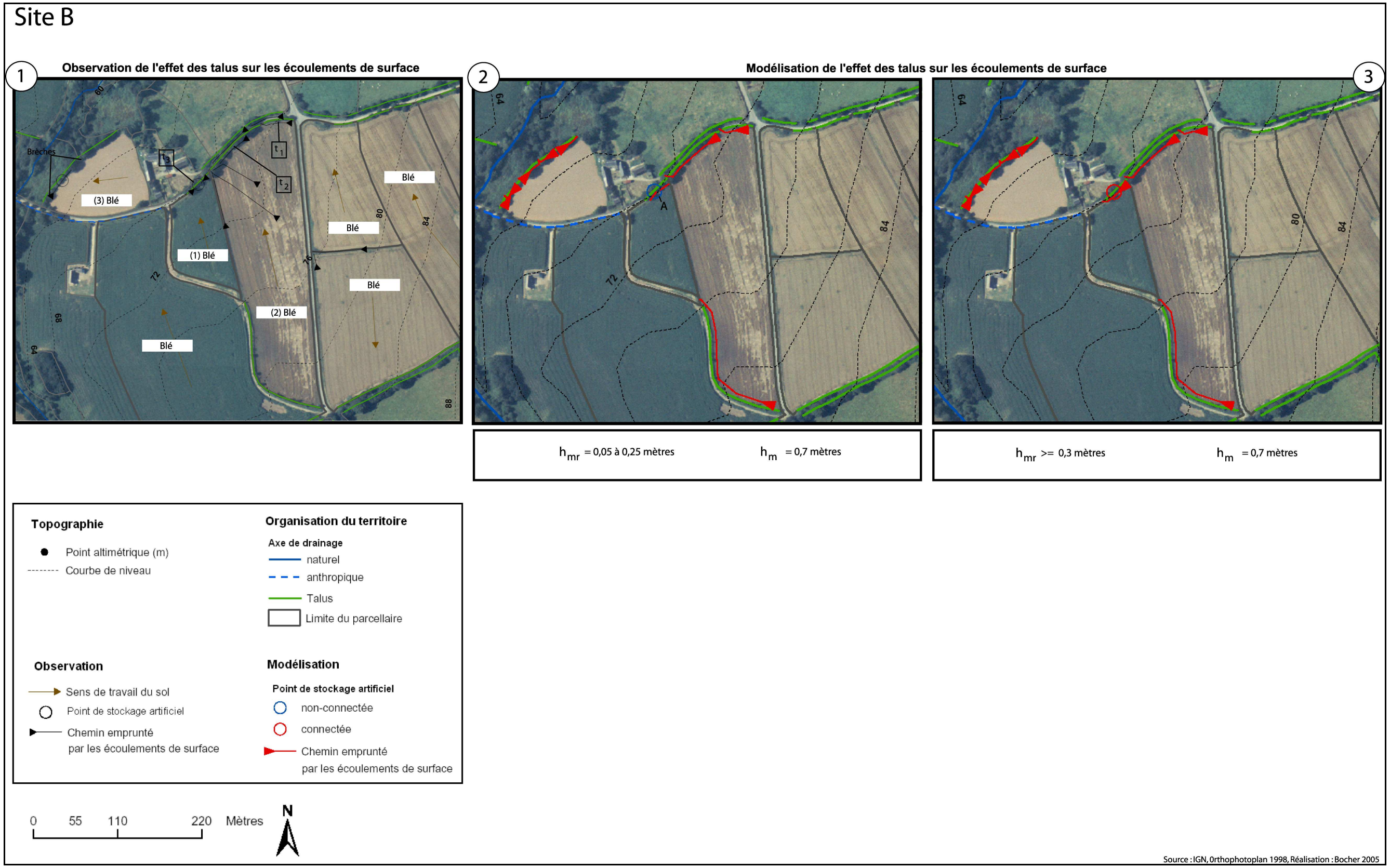


Figure 170. *Observation et modélisation des points de stockage sur le site B*

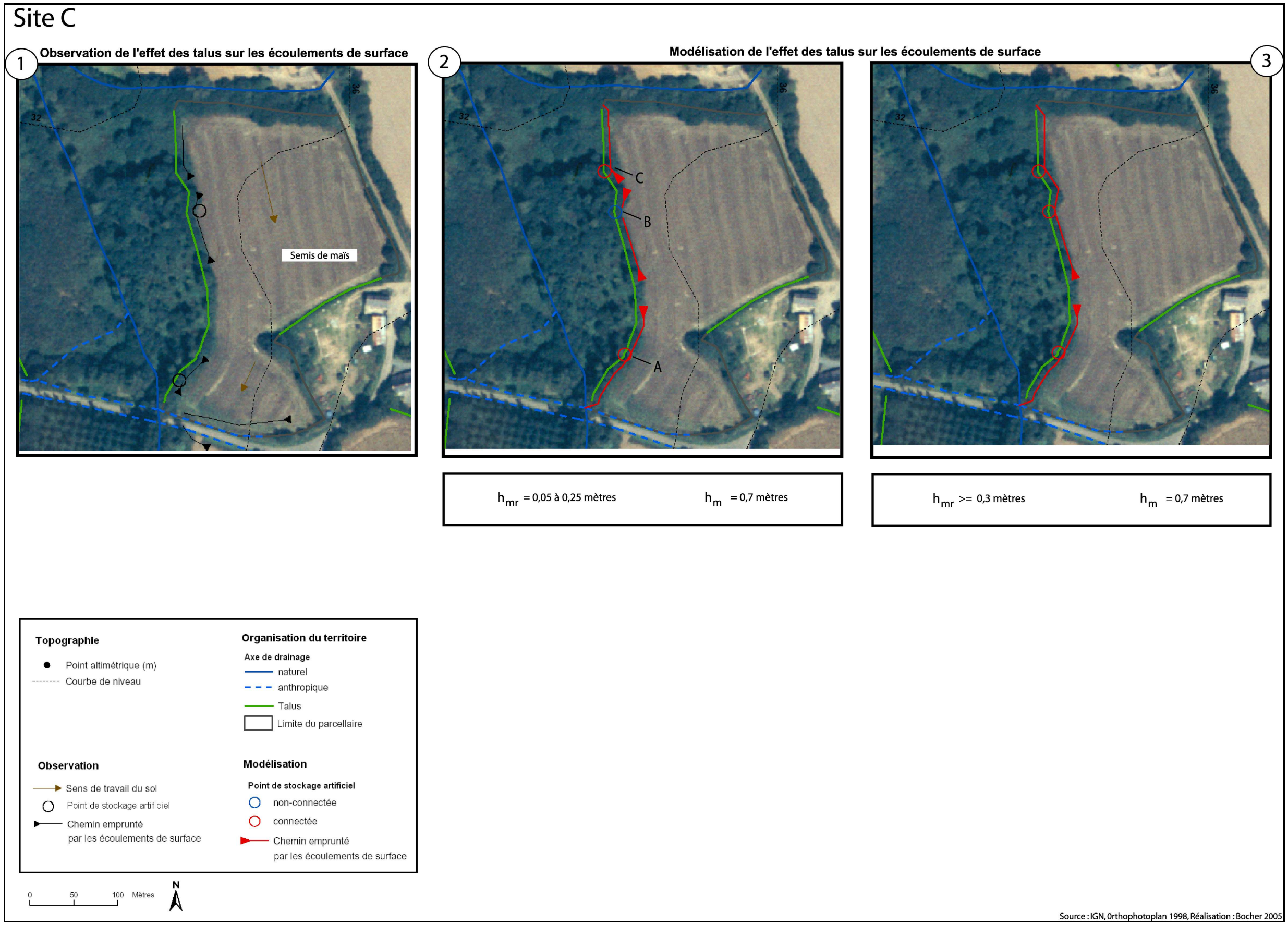


Figure 171. *Observation et modélisation des points de stockage sur le site C*

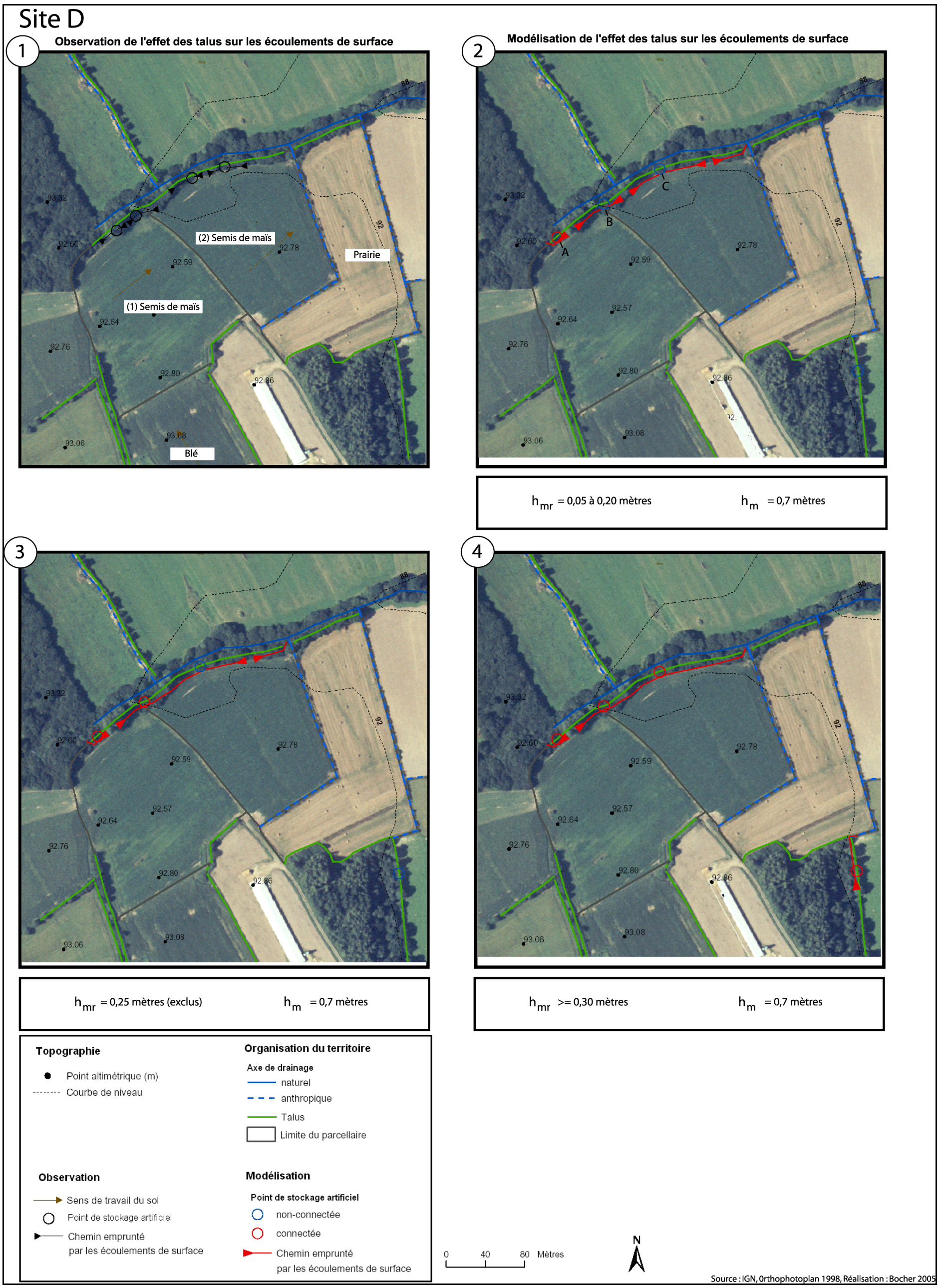


Figure 172. *Observation et modélisation des points de stockage sur le site D*

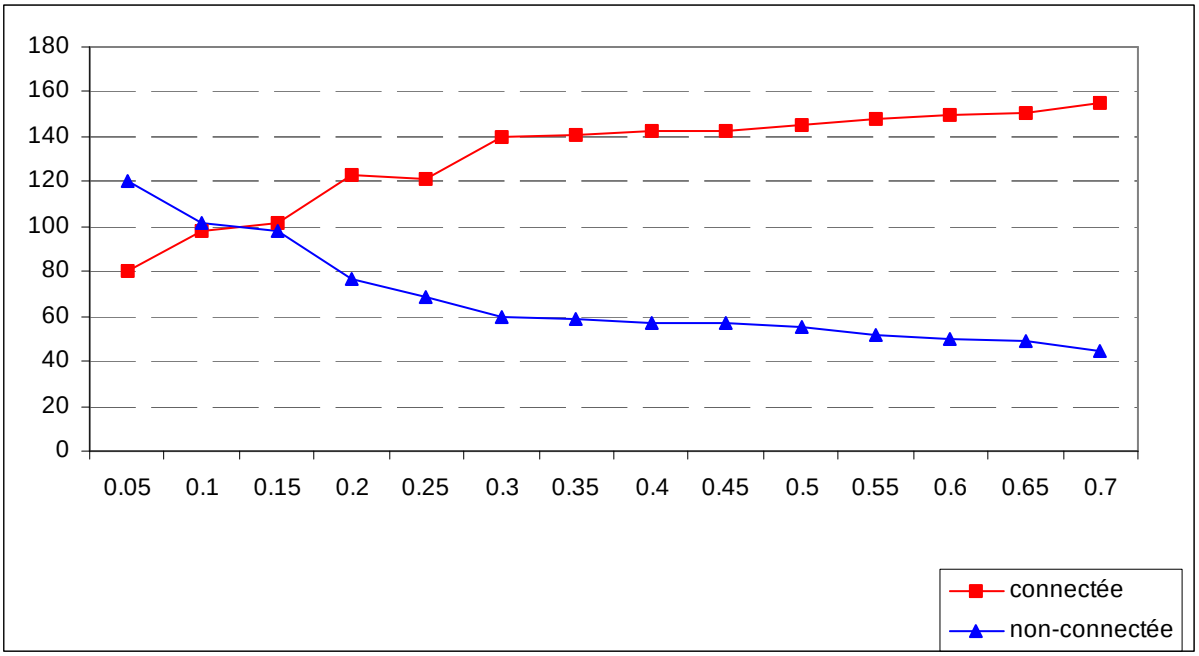


Figure 173. *Influence du paramètre H_{mr} dans la connexion des cuvettes artificielles pour la totalité du Sterenn (Bocher, 2005)*

3. Application aux scenarii automne-hiver et printemps-été

Nous présentons dans cette partie les résultats de la mise en oeuvre d'HydroTIN sur le sous-bassin versant du Sterenn pour les scenarii d'occupation du sol d'automne-hiver et de printemps-été 2002-2003.

Dans un premier temps, une modélisation spatiale est réalisée uniquement avec la topographie et les aménagements linéaires. Elle permet de comprendre l'influence de l'organisation des réseaux et de dégager une typologie pour qualifier les effets des aménagements sur le cheminement des écoulements de surface. Cette typologie nous conduit à isoler des secteurs de concentration linéaire du ruissellement par compartiment respectif dans le bassin versant. Nous différencierons entre autres les secteurs de concentration artificiels « passants » et les secteurs de concentration artificiels « bloquants ».

Dans un second temps, nous avons souhaité analyser l'effet conjoint des aménagements et de l'occupation du sol sur le contrôle des surfaces mobilisées à l'échelle du bassin versant. L'objectif était de mettre à profit la capacité du modèle HydroTIN à restituer le parcours des écoulements de surface pour étudier l'impact de l'évolution de l'occupation du sol entre deux rotations culturales. Ce travail n'a malheureusement pu aboutir. Nous en présentons les causes et discutons des améliorations à apporter.

3.1. Les aménagements linéaires facteur de perturbation des écoulements de surface

Pour étudier l'influence des aménagements linéaires nous effectuons trois simulations :

- la première avec les talus et les axes de drainage naturels (**simulation A**),
- la seconde avec la voirie et les talus (**simulation B**),
- la troisième avec l'ensemble des aménagements: axe de drainage, voirie et talus (**simulation C**).

Le tableau 30 récapitule les valeurs affectées aux paramètres d'HydroTIN pour ces deux simulations.

Paramètre	Valeur
Hauteur de décaissement de la route	0,7 mètres
Hauteur des talus	fixe à 1 mètre
H_m	0,8
H_{mr}	0,25

Tableau 30. *Paramètres utilisés pour les simulations A et B avec HydroTIN*

Il faut préciser que la valeur décaissement de la route est volontairement inférieure à la valeur de franchissement d'obstacle afin d'autoriser le débordement des écoulements de la voirie vers le parcellaire en fond de vallée (cf. chapitres 3 et 6). Les cuvettes topographiques quant à elles sont toutes considérées comme des artefacts. Elles sont éliminées du graphe de bassins en forçant les écoulements.

3.1.1. L'impact des aménagements linéaires sur les aires d'alimentation des cours d'eau

L'impact des aménagements anthropiques sur le cheminement des écoulements de surface est analysé à partir du calcul de l'**aire d'alimentation** d'un cours d'eau. Deux types d'aires sont définis : l'**aire non-connectée** et l'**aire connectée**.

- la première correspond à la somme des faces du TIN bloquées formant une cuvette artificielle. Elle est représentée dans le SIG par un polygone que nous appelons bassin d'alimentation contraint non-connecté.

- la seconde représente les surfaces directement et/ou indirectement connectées à un cours d'eau. Le calcul est réalisé à partir de l'exutoire du cours d'eau.

Pour permettre de comparer ces différents bassins, leur superficie est pondérée avec celle du bassin topographique.

Nous rappelons dans le tableau 31 les caractéristiques des aménagements sur le sous-bassin versant du Sterenn.

Superficie (ha)	**Talus**		**Voirie**			**Axe de drainage**			
						Naturel		**Anthropique**	
	Linéaire (m)	Densité (m/ha)	Superficie (ha)	Linéaire (m)	Densité (m/ha)	Linéaire (m)	Densité (m/ha)	Linéaire (m)	Densité (m/ha)
1 426	81 371	57,1	45	45 000	31,6	19 954	14	8 810	6,2

Tableau 31. *Caractéristiques des réseaux linéaires sur le sous-bassin versant du Sterenn*

- **A l'échelle du Sterenn**

Les pourcentages de surface non-connectée au cours d'eau du Sterenn pour les simulations A et C montrent que les éléments anthropiques modifient la surface d'alimentation. Cependant, cette modification est relativement faible. La proportion de surface non-connectée est de 13,9 % pour la première simulation, elle n'atteint que 15,4 % pour la seconde, soit 1,5 points en plus (tableau 32).

Superficie (ha)	**Simulation A**		**Simulation C**	
	% de surface connectée	% de surface non-connectée	% de surface connectée	% de surface non-connectée
1 426	86,1	13,9	84,6	15,4

Tableau 32. *Pourcentage de surface connectée et non-connectée pour l'ensemble du sous-bassin versant du Sterenn*

La **cartographie des bassins d'alimentation contraints** pour les simulations A et C confirme dans l'ensemble ces résultats. Excepté pour la partie centrale en rive droite du Sterenn (figure 175, cadre A) où l'on peut observer une déconnexion franche du versant, les cartes des figures 174 et 175 présentent de fortes similitudes. Toutefois, une analyse plus approfondie de ces cartes montre qu'il existe en réalité de nombreuses divergences entre la forme du bassin d'alimentation connecté avec la simulation A et celle obtenue avec la simulation C. Nous pouvons ainsi observer très localement une régression de l'aire d'alimentation connectée pour la

simulation C par rapport à la simulation A (figure 175). Inversement, certaines portions de versants sont reconnectées (figure 175).

Cependant, la cartographie des aires d'alimentation à l'échelle du Sterenn pose un problème d'échelle. L'aire d'alimentation est le résultat de l'agrégation de l'ensemble des aires contributives du Sterenn. Elle contribue à gommer la lisibilité des interactions entre la topographie et les aménagements linéaires. Une illustration du problème est donnée sur la figure 176. Sur le cadre A, on peut observer que le calcul de l'aire contributive à l'échelle du Traou-Stang permet de mettre en valeur les portions du bassin versant déconnectées par un talus (figure 176, 1 et 2) ainsi que des apports supplémentaires provenant de versants limitrophes, canalisés par la voirie (figure 176, 3). Avec le calcul du bassin d'alimentation pour l'ensemble du Sterenn, ces interactions ne sont plus visibles, excepté lorsque l'aire d'alimentation déconnectée est comprise en totalité dans le Traou-Stang (figure 176, cadre B). L'aire d'alimentation calculée à partir de l'exutoire du Sterenn ne permet pas de distinguer les échanges entre unités hydrologiques.

Afin d'aller plus loin dans ce constat, nous avons décidé d'analyser pour chaque sous-bassin versant des principaux affluents du Sterenn la part respective des surfaces connectées et non-connectées à leur cours d'eau principal. L'objectif est de voir s'il existe des corrélations ou des regroupements possibles entre sites en fonction des caractéristiques des linéaires anthropiques. Les sous-bassins versants étudiés sont localisés sur la figure 175. Le sous-bassin versant du Plouglaou n'a pas été retenu car les données disponibles ne recouvrent pas la totalité de son bassin d'alimentation topographique.

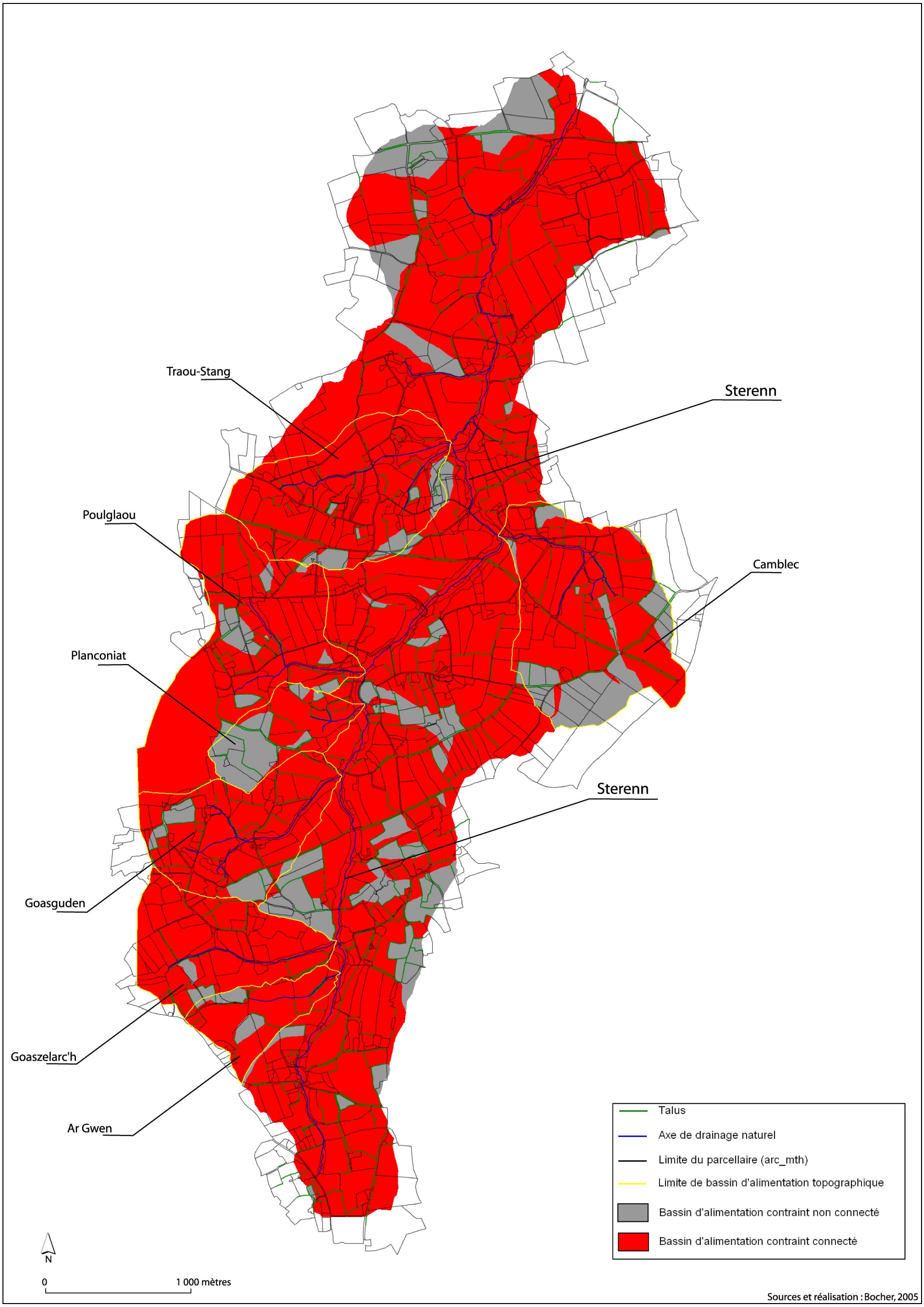


Figure 174. *Bassin d'alimentation contraint connecté et non-connecté calculé en intégrant uniquement les talus et les axes de drainage naturel (simulation A)*

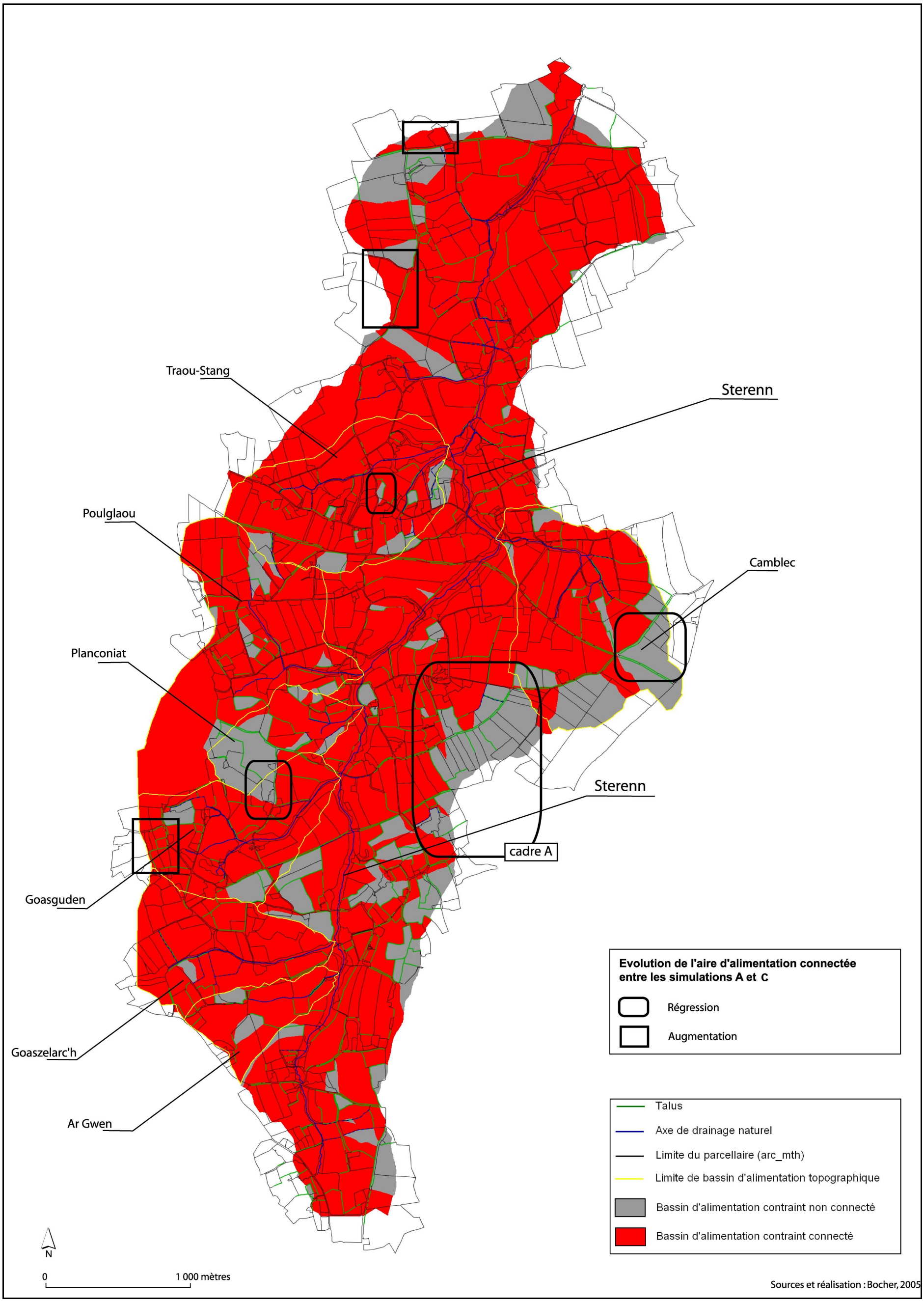


Figure 175. *Bassin d'alimentation contraint connecté et non-connecté calculé en intégrant l'ensemble des aménagements linéaires (simulation C)*

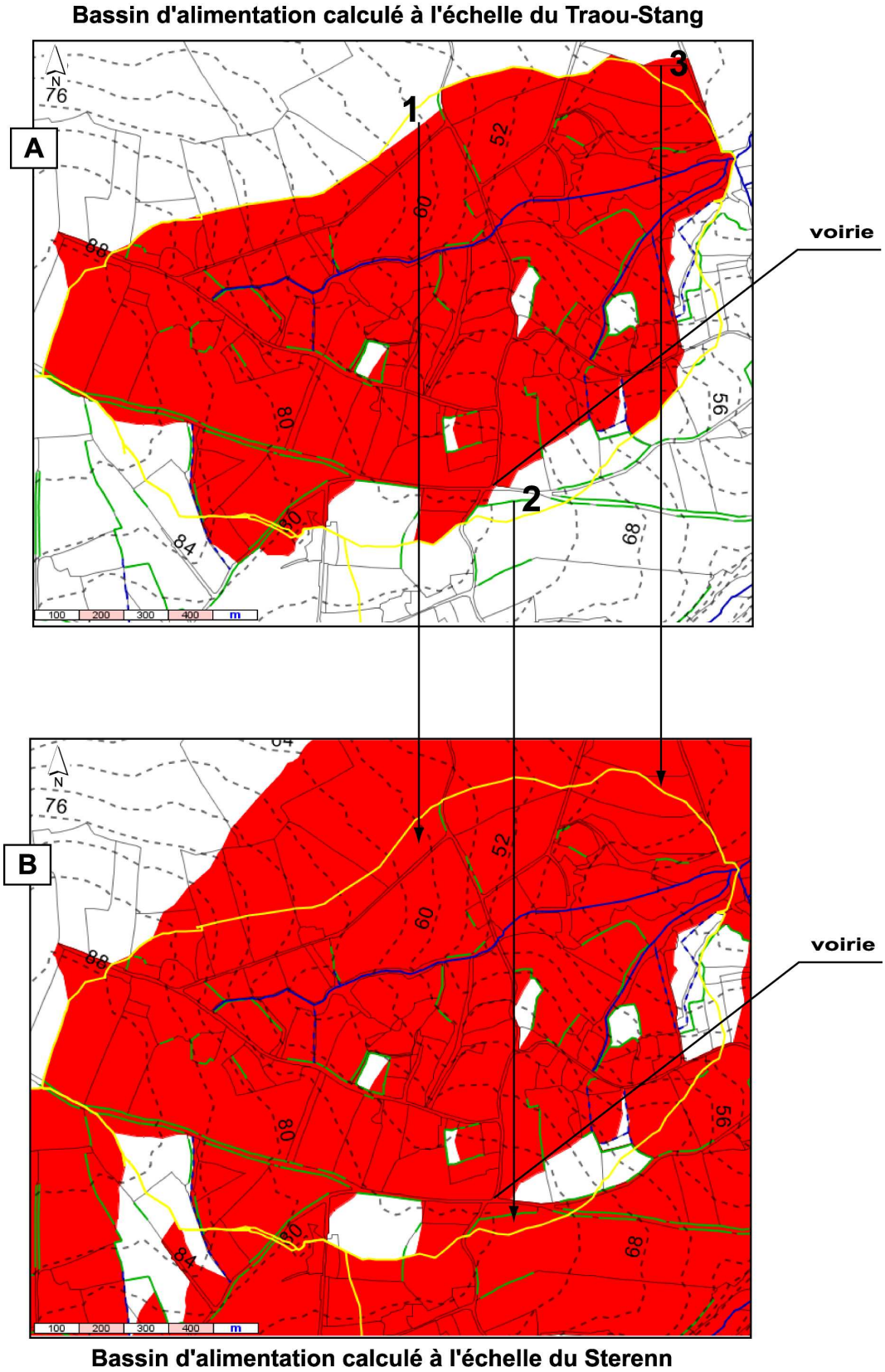


Figure 176. *Différence des aires d'alimentation connectée au cours d'eau en fonction de l'exutoire de définition*[38]*, simulation C (Bocher, 2005)*

[38] Légende cf. figure 175

- **A l'échelle des principaux sous-bassins versants du Sterenn**

Le tableau 33 récapitule les pourcentages de surface connectée au cours d'eau principal de chaque sous-bassin versant par simulation. Globalement on remarque que les pourcentages de surface connectée sont très importants quelle que soit la simulation. Excepté pour le sous-bassin versant du Planconiat, leur proportion de surface connectée est supérieure à 70 % du bassin d'alimentation topographique. Ce qui laisse supposer que les cours d'eau sont peu protégés vis-à-vis des transferts par ruissellement de surface.

	Simulation A	Simulation B	Simulation C	Type
Goaszelarc'h	97	94,9	94,9	C
Planconiat	48,6	67,8	49,8	B
Ar-Guen	85,8	91,6	91,9	A
Traou-Stang	88,9	94,1	91	B
Goasguden	89,4	88,0	88,2	D
Camblec	74,5	72,9	70,5	E

Tableau 33. *Pourcentage de surface connectée pour les principaux sous-bassins versants du Sterenn*

A partir de la simulation A et de l'ajout progressif des contraintes linéaires (simulation B puis C), nous pouvons distinguer cinq types de sous-bassins versants, soit pratiquement autant de types que de sites ! Les types sont construits en comparant la proportion de surface connectée pour la simulation A avec la simulation B puis pour la simulation B avec la simulation C.

- **Le type A** : Il correspond au sous-bassin versant dont la surface connectée augmente entre A et B et B et C.
- **Le type B** : Il correspond au sous-bassin versant dont la proportion de surface connectée augmente entre A et B mais diminue entre B et C.
- **Le type C** : Il correspond au sous-bassin versant dont la proportion de surface connectée diminue entre A et B mais stagne entre B et C
- **Le type D** : Il correspond au sous-bassin versant dont la proportion de surface connectée diminue entre A et B et augmente entre B et C
- **Le type E** : Il correspond au sous-bassin versant dont la proportion de surface connectée diminue entre A et B et B et C.

L'interprétation de ces résultats n'est pas aisée d'autant que leur mise en perspective avec les densités de linéaires ne montre pas de relation évidente (tableau 34). Ainsi pour le Goazelarc'h la surface connectée diminue pour la simulation B par rapport à la A tandis que pour le Ar-Gwen elle augmente, alors que leur densité respective de voirie diffère de moitié,

(30, 4 m/ha pour le premier et 14 m/ha pour le second). Cette différence de réponse des deux sous-bassins suppose donc que la voirie ait, pour le Goazelarc'h, un effet positif puisqu'elle déconnecte des surfaces du cours d'eau alors que pour l'Ar-Gwen elle favorise la contribution au cours d'eau.

Pour le Traou-Stang le pourcentage de surface connectée augmente mais en proportion faible par rapport à sa densité de voirie. Le schéma est identique entre les simulations B et C. Par exemple pour le Planconiat dont la densité de fossés est faible en comparaison au Goazelarc'h, la proportion de surface connectée régresse de façon significative alors que pour le Goazelarc'h, elle n'évolue pas.

Sous-bassin	Simulation A		Simulation B			Simulation C			
	% de surface connectée	**Talus** Densité (m/ha)	% de surface connectée	**Talus** Densité (m/ha)	**Voirie** Densité (m/ha)	% de surface connectée	**Talus** Densité (m/ha)	**Voirie** Densité (m/ha)	**Fossés** Densité (m/ha)
Goazelarc'h	**97**	38,6	**94,9**	38,6	30,4	**94,9**	38,6	30,4	13
Planconiat	**48,6**	86,8	**67,8**	86,8	27,6	**49,8**	86,8	27,6	5,7
Ar-Gwen	85,8	50,9	91,6	50,9	14	91,9	50,9	14	0,5
Traou-Stang	88,9	48,2	94,1	48,2	50,2	91	48,2	50,2	11
Goasguden	89,4	64,2	88,0	64,2	45,3	88,2	64,2	45,3	7,5
Camblec	74,5	58,1	72,9	58,1	35,5	70,5	58,1	35,5	1,4

Tableau 34. *Statistiques sur les linéaires et densités des aménagements anthropiques pour les principaux sous-bassins versants du Sterenn (Bocher, 2005)*

A ce stade, les données statistiques sont insuffisantes pour distinguer une relation quelconque entre l'aire d'alimentation au cours d'eau et les caractéristiques générales des bassins versants. Il manque ici une échelle d'analyse qui permette d'identifier la part du linéaire qui favorise ou limite l'extension de l'aire d'alimentation au cours d'eau. En effet, ici, les variations de surfaces connectées échappent aux logiques émises (ou admises) comme celle d'un rapport entre la densité de haies et leur efficacité tampon vis-à-vis des eaux de surface (Viaud, 2004). La réponse des sous-bassins versants semblerait plutôt à relier à un contrôle des flux par quelques sites clés.

Pour répondre à cette interrogation et appréhender l'influence des réseaux anthropiques sur le cheminement des écoulements de surface, nous proposons de mener une analyse plus fine à l'échelle des versants. Cette analyse doit nous permettre de cerner l'effet de la structuration spatiale des aménagements linéaires sur l'organisation du ruissellement de surface. Il s'agit de mettre en évidence les enchaînements et les interactions spatiales qui articulent les parcours des écoulements de surface d'amont en aval et qui déterminent par conséquent la réponse du bassin versant.

3.1.2. Relais et interactions spatiales dans les systèmes bassin versant : l'exemple du Goasguden

Nous analysons dans ce paragraphe l'organisation des écoulements de surfaces sur le sous-bassin versant du Goasguden pour la simulation C à partir des superficies cumulées sur les cellules du TIN. Ces surfaces sont calculées grâce à l'automate cellulaire. Une cartographie est construite pour les représenter dans le bassin versant (annexe 12). Elle intègre :

- les faces du TIN,
- les arcs talweg,
- les arcs axe de drainage,
- les arcs doubles,
- les points multiples.

Ces deux dernières cellules sont décalées d'une distance de 0,8 mètres par rapport à l'obstacle qu'elles qualifient afin de faciliter leur représentation. On aboutit à la production d'une carte générale des superficies cumulées sur l'ensemble du bassin versant (figure 177, C). Cette carte permet d'apprécier son fonctionnement interne. Elle permet d'opposer les secteurs de concentration des écoulements de surface où les valeurs d'accumulation sont élevées aux secteurs de production du ruissellement où elles plus sont faibles. On peut remarquer que les secteurs de concentrations importantes sont très limités et très localisés (figure 177, C) :

- au niveau des axes de drainage,
- en amont de certains talus (extrait B),
- dans le réseau de voirie (extrait E et D),

On note des superficies de production qui sont de faibles dimensions en relation avec la compartimentation de l'espace.

La carte des superficies cumulées livre des clés de lecture pour comprendre comment les écoulements de surface se structurent dans le bassin versant. Globalement, à partir des figures 177 (B) et 177 (C) on peut distinguer deux catégories :

- les directions d'écoulement gouvernées uniquement par la topographie de versant et qui alimentent directement le cours d'eau (extrait A),
- les directions d'écoulement imposées par les aménagements.

Dans cette dernière, une différenciation est réalisée entre les aménagements qui agissent essentiellement sur le parcours des écoulements à l'intérieur du bassin versant (extrait B, C, D), des aménagements qui perturbent la définition du bassin d'alimentation en exportant et/ou en important des écoulements sur ses périphéries (extrait E et F).

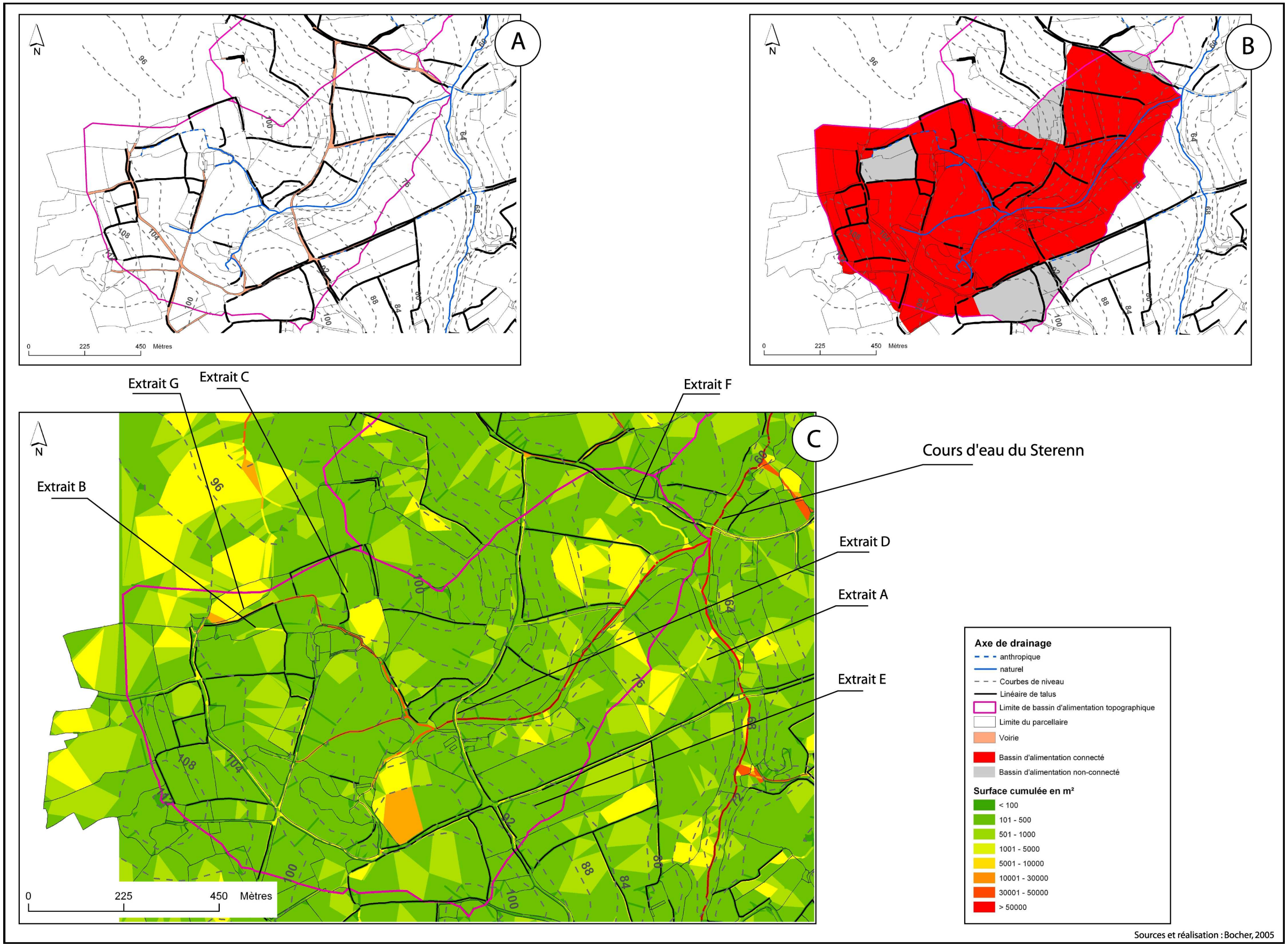


Figure 177. *Cartographie des bassins d'alimentation contraint et des superficies cumulées sur le sous-bassin versant du Goasguden, simulation C*

3.1.2.1.Les apports directs de versant (extrait A)

La figure 178 met en évidence un apport direct des écoulements de la parcelle 1 vers la parcelle 2 puis de la parcelle 2 vers le cours d'eau, représenté en rouge. Ces écoulements se sont concentrés linéairement dans un micro-talweg dont la surface contributive atteint 3,5 ha. En l'absence d'obstacle, ce type de configuration topographique constitue un facteur important de risque d'érosion des sols.

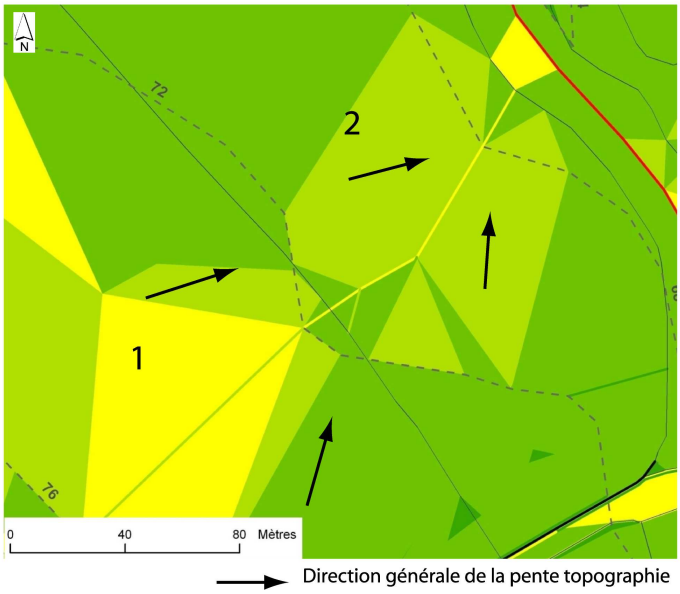


Figure 178. *Concentration linéaire des écoulements de surface sur une parcelle et connexion directe avec un cours d'eau (Bocher, 2005)*[39]

3.1.2.2. Les interactions aménagements-topographie dans le fonctionnement interne du bassin versant

a. <u>Les interactions parcelles-talus (extraits B et C)</u>

- Extrait B : le blocage des écoulements par un talus

La figure 179 permet d'observer le rôle d'obstacle joué par un talus en aval de deux parcelles 1 et 2. Les écoulements dirigés par la pente topographique sont interceptés par un talus qui les concentre vers un point bas de stockage. Ce talus orienté en V dans le sens de la pente forme une cuvette artificielle isolant le ruissellement des parcelles 1 et 2 vers les parcelles 3 et 4. La superficie cumulée au point de stockage représente 2 ha soit la totalité des superficies des

[39] Légende cf. figure 177.

parcelles 1 et 2. L'aire déconnectée par le talus est très bien identifiée sur la cartographie du bassin d'alimentation non-connecté (figure 179, B).

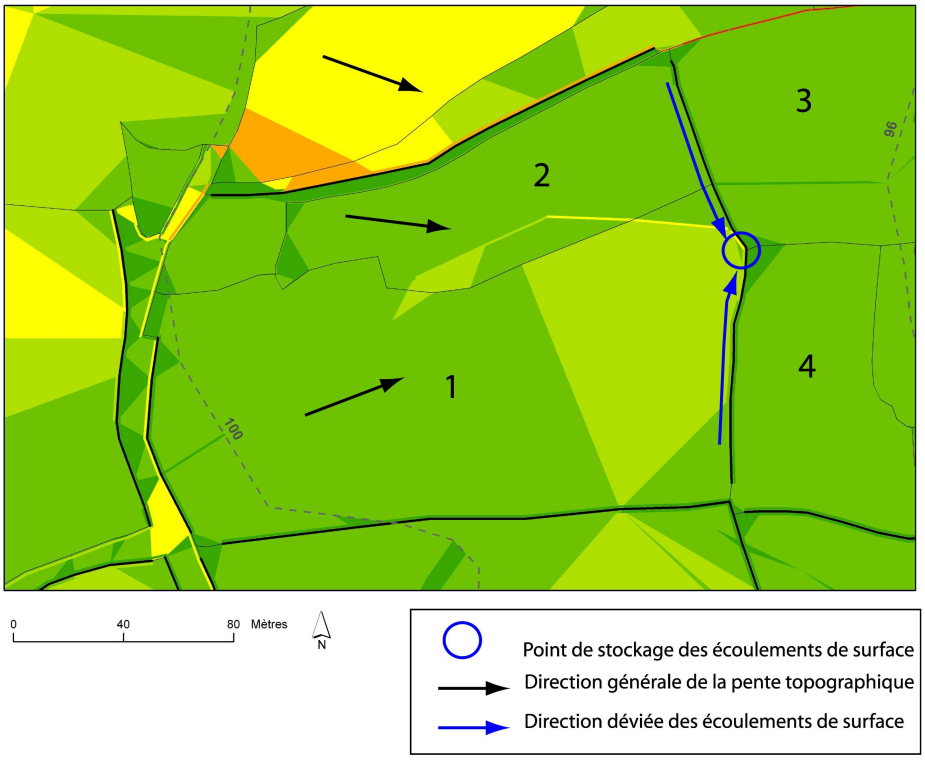


Figure 179. *Le blocage des écoulements de surface dans une parcelle par un talus (Bocher, 2005)*[40]

- Extrait C : la déviation des écoulements par un talus

A l'inverse de l'extrait précédent, la figure 180 montre deux exemples de talus positionnés obliquement à la pente topographique dont les écoulements de surface après avoir été capturés puis déviés latéralement jusqu'à leur extrémité sont de nouveau orientés par la topographie. Ces talus contribuent à favoriser une concentration linéaire de l'eau qui sous l'effet des volumes et des vitesses d'apport peut augmenter le pouvoir érosif du ruissellement et favoriser l'érosion des sols. Dans cette situation pour protéger les sols et limiter les transferts de polluant, un talus de ceinture reliant les talus A et B pourrait être envisagé d'autant qu'en aval il n'existe aucun barrage avant le cours d'eau. Ce talus devra cependant être complété par un autre talus localisé à l'extrémité du talus B au risque sinon de concentrer les écoulements sur l'extrémité du talus A (figure 181).

[40] Légende cf. figure 177.

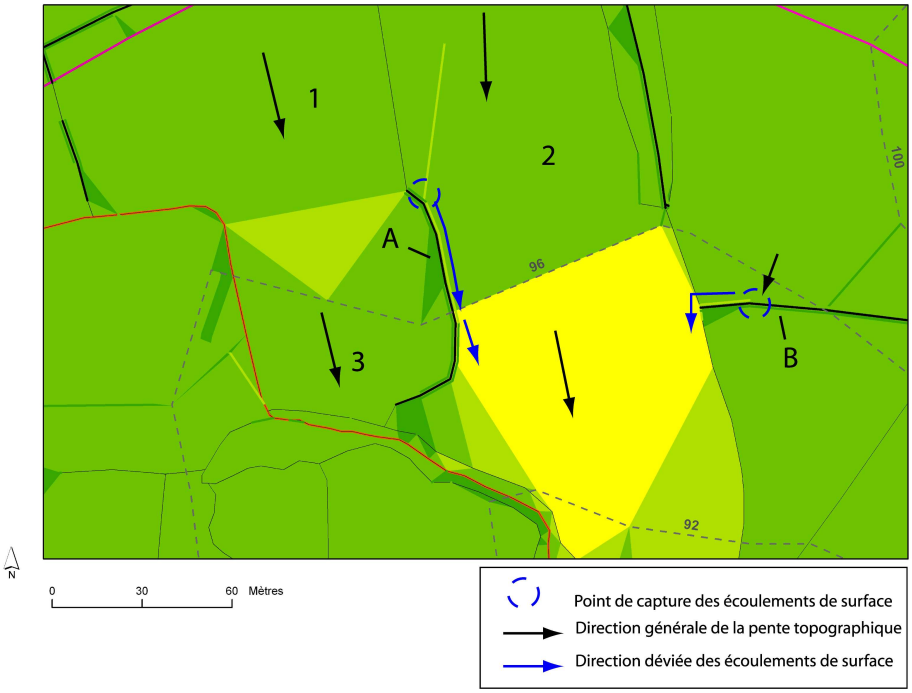


Figure 180. *La déviation des écoulements de surface par un talus (Bocher, 2005)*[41]

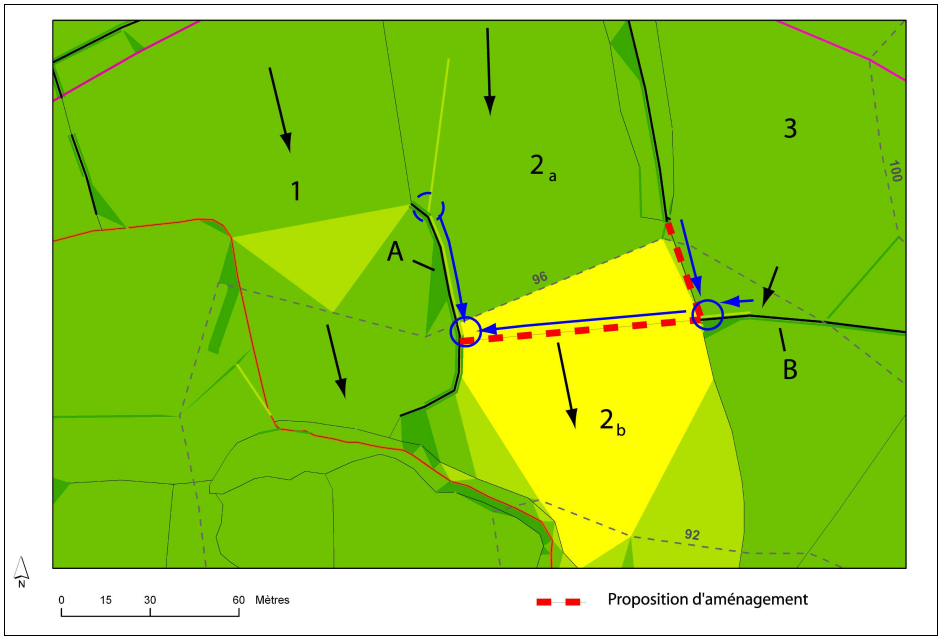


Figure 181. *Proposition d'aménagement et conséquences théoriques sur les écoulements de surface (Bocher, 2005)*[42]

[41] Légende cf. figure 177
[42] Légende cf. figure 177

b. La capture et la connexion des écoulements avec la voirie (extrait D)

La route décaissée (figure 182) collecte une partie des eaux de ruissellement provenant des parcelles 1 et 4. Elles sont ensuite dirigées vers l'exutoire de la route qui correspond au recoupement du talweg occupé par le cours d'eau du Goasguden.

La superficie cumulée à l'intersection avec le cours d'eau représente 4,5 ha. Comme on peut le voir sur la figure 182, l'alimentation se fait de part et d'autre de la voirie. Les écoulements de la parcelle 1 ont parcouru une distance maximale de 250 mètres pour rejoindre le cours d'eau. De plus, cette figure permet de montrer le rôle de la route dans la segmentation du cheminement de l'eau sur un versant. Les écoulements de la parcelle 1 et 4 ne sont plus en continuité avec les parcelles inférieures (2 et 3).

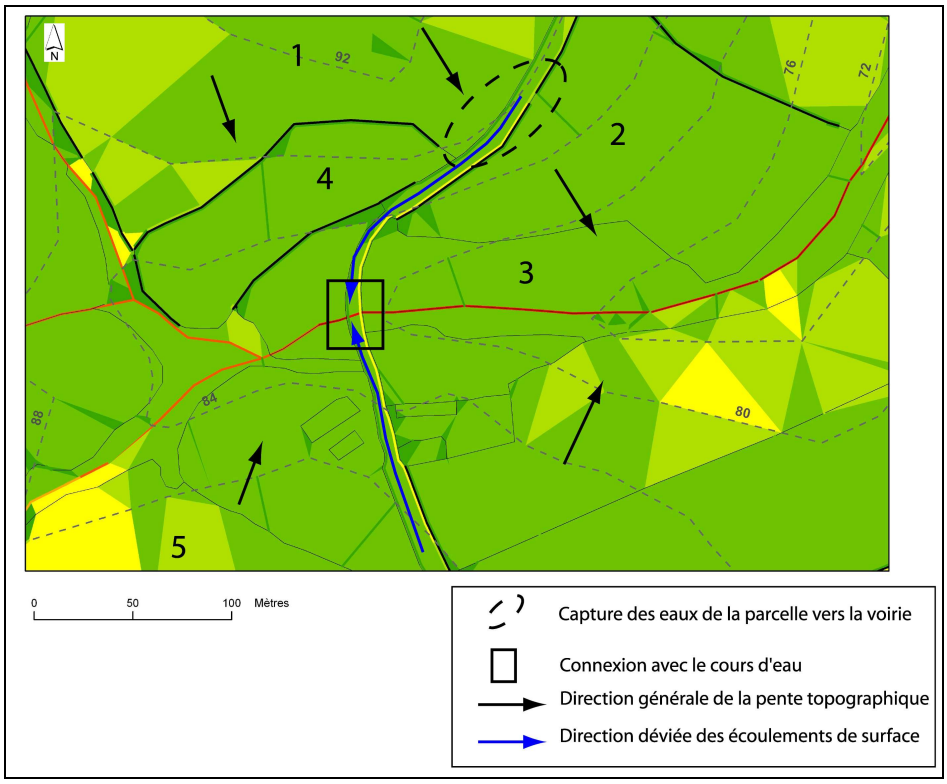


Figure 182. *Connexion des écoulements de surface avec la voirie et le cours d'eau (Bocher, 2005)*[43]

[43] Légende cf. figure 177

3.1.2.3. Les aménagements linéaires facteurs de perturbation des limites de bassin versant (extraits E et F)

a. Exportation des écoulements de surface vers un autre versant (extrait E)

La figure 183 montre l'effet conjoint d'un talus et de la voirie orientés tous deux dans le sens de la pente. Deux situations doivent être considérées : la parcelle 3 est située en position d'interfluve et la parcelle 2 en limite du sous-bassin du Goasguden.

La parcelle 3 en position d'interfluve

Pour la partie sur le Goasguden, le ruissellement s'écoule dans un premier temps dans le sens de la pente. Dans un second temps, une partie se déverse dans la voirie qui exporte vers le bassin versant voisin, une autre partie est déviée par le talus en bord de parcelle et rejoint la partie de la parcelle 3 situé sur le bassin versant voisin.

La parcelle 2 en limite du sous-bassin du Goasguden

Le ruissellement de la parcelle 2 est collecté par une route dont le flux est concentré vers la route en bordure de la parcelle 3. On assiste alors à un cumul des superficies de la parcelle 3 et de la parcelle 2.

La voirie joue ici un rôle majeur dans le contrôle des flux sur le versant, modifiant ainsi la géométrie du sous-bassin versant du Goasguden (figure 177, B).

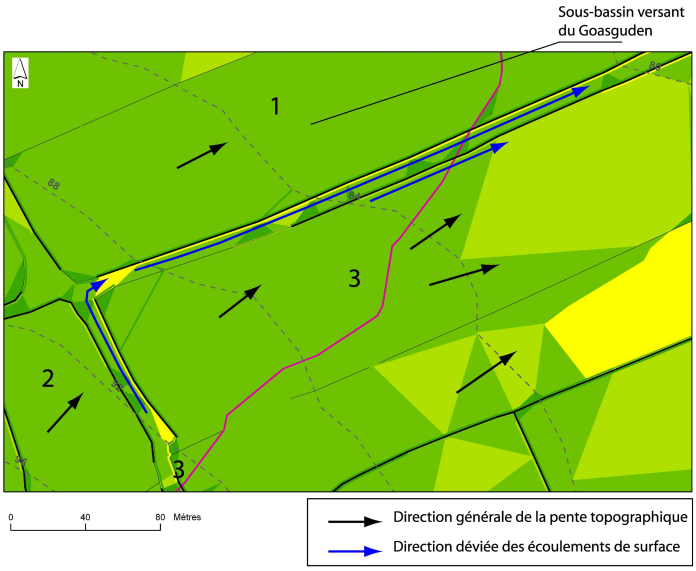


Figure 183. *Exportation des écoulements par les aménagements linéaires (Bocher, 2005)*[44]

[44] Légende cf. figure 177.

b. Importation et exportation d'écoulements de surface (extrait F)

Deux traits majeurs dominent l'organisation des écoulements sur la figure 184 : l'importation et l'exportation de flux. On peut ainsi observer :

Sur la parcelle 3

Les écoulements de la portion amont de la parcelle 3 située dans le sous-bassin versant limitrophe sont détournés par un talus orienté nord nord-ouest/sud sud-est. Avant l'extrémité du talus, la déviation latérale se décroche sous l'effet de la topographie. Les écoulements se concentrent linéairement dans un micro-talweg pour former une aire d'accumulation des eaux dans le fond de vallée et se connecter au cours d'eau. Plus des 2/3 de la superficie de la parcelle se sont ainsi concentrés dans le talweg.

Dans la voirie

A l'opposé, le réseau de voirie après avoir collecté une partie des eaux provenant de la parcelle 2, les exportes vers une unité hydrologique d'ordre supérieur correspondant ici au cours d'eau du Sterenn. La connexion est réalisée dans les mêmes conditions que l'extrait D, lors d'un franchissement de talweg. La superficie cumulée est de 2 ha.

Dans cet extrait on peut aussi porter attention aux très fortes superficies cumulées sur les bords de route situées dans le quart nord-ouest de la figure 184. Les surfaces atteignent la valeur seuil de 20 ha qui transforme la voirie en réseau secondaire de drainage. La surface contributive est aussi élevée qu'au niveau des nœuds des tronçons d'ordre 1 selon la hiérarchisation de Straelher pour le cours d'eau du Goasguden.

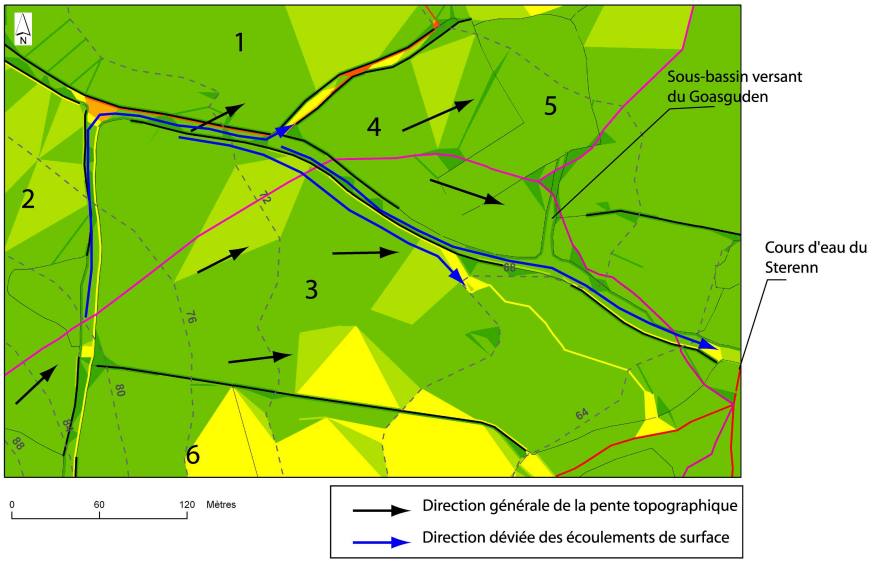


Figure 184. *Importation et exportation des écoulements de surface entre unités hydrologiques (Bocher, 2005)*[45]

[45] Légende cf. figure 177

Conclusion

L'ensemble de ces résultats confirme l'importance des éléments linéaires dans l'organisation du parcours de l'eau à l'échelle des versants et du bassin versant. Ils corroborent les travaux de Mérot *et al.* (1999) qui ont montré l'influence des talus sur la circulation de l'eau. Grâce au modèle nous pouvons ici préciser l'impact de la position et de l'articulation des réseaux linéaires sur le ruissellement de surface. Nous pouvons ainsi restituer des schémas d'interactions complexes notamment les effets conjugués de la voirie et des talus associés à l'organisation des pentes. La voirie apparaît comme une composante déterminante relayant l'impact de la topographie naturelle et des talus. Elle complexifie les processus de transferts en multipliant les interactions spatiales entre les différents compartiments du bassin versant. La voirie, tout comme les talus, permet le raccordement entre des territoires qui auparavant étaient hydrologiquement déconnectés (importation et exportation). Les superficies cumulées parfois très importantes en font dans la hiérarchisation des écoulements selon l'ordination de Straelher un cours d'eau élémentaire de niveau zéro au même titre que les micro-vallons à écoulements temporaires.

Comme le montre la figure 185, sur le versant, l'organisation des aménagements peut donner naissance à un système en relais dans lequel les effets des linéaires se conjuguent pour structurer le long du continuum amont-aval le cheminement du ruissellement de surface. Au départ, les écoulements de versant sont canalisés par un tronçon de route vers un point de stockage A. Selon les paramètres du graphe de bassins, les écoulements débordent dans la parcelle 5 (triangle A) ou ils sont dirigés par la topographie vers un talus (triangle B). Ce talus alimenté par les eaux de la parcelle 5 dévie latéralement le ruissellement vers un fossé situé à son extrémité. Une connexion est établie entre ces deux éléments (triangle C). Le fossé à ciel ouvert joue ensuite son rôle de drain et concentre les écoulements de versant et ceux canalisés par le talus vers une des sources du cours d'eau du Goasguden (triangle D). Les écoulements ont parcouru une distance de 370 mètres pendant laquelle les superficies se sont concentrées par paliers successifs (tableau 35). En épisode exceptionnel, cette configuration peut potentiellement faire remonter la source du Goasguden, augmentant de ce fait la longueur de l'axe hydrographique, son alimentation directe ainsi que les vitesses d'exportation des flux.

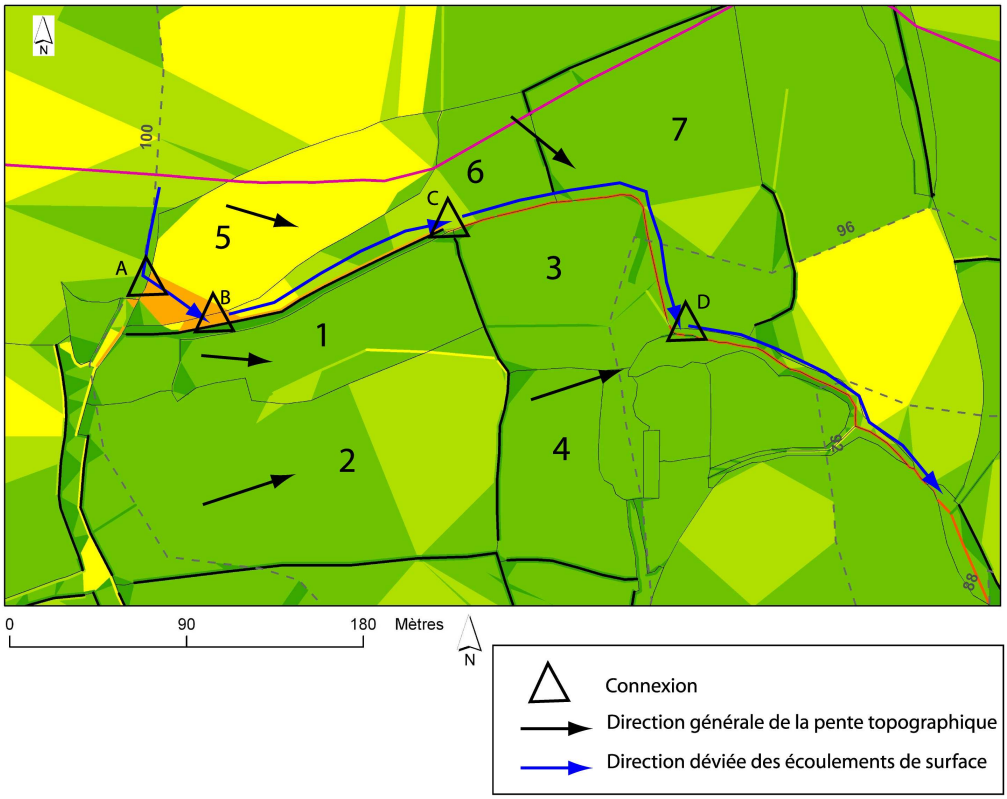


Figure 185. *Système en relais des écoulements de surface (Bocher, 2005)*[46]

Triangle	Superficies cumulées
A	5 ha
B	6 ha
C	10 ha
D	11,7 ha

Tableau 35. *Superficie cumulée selon les différents points de connexion de la figure 185*

En définitive, les aménagements linéaires apparaissent comme des éléments prégnants pour concentrer le ruissellement de surface, se substituant ainsi à la topographie des versants. Ils se comportent comme des micro-talwegs artificiels en canalisant linéairement les flux vers un exutoire. L'absence de protection à leur aval en fait des secteurs potentiellement à risque en terme d'érosion des sols et de transfert de polluants.

[46] Légende cf. figure 177

3.1.3. Vers une typologie des secteurs de concentration du ruissellement de surface

Nous proposons ici une classification des aménagements linéaires en fonction de leur rôle potentiel dans la concentration des écoulements de surface. Au regard des observations réalisées précédemment, on peut distinguer deux grands types :

- les aménagements « passants »,
- les aménagements « bloquants ».

3.1.3.1. Les aménagements « passants »

Un aménagement est dit « passant » lorsqu'il permet la poursuite de l'écoulement de l'eau en le déviant de sa direction topographique naturelle pour concentrer le flux le long de son tracé. Cette qualification est réalisée à partir du graphe de bassins sur les arcs double et les arcs simples. Sont considérés comme des aménagements potentiellement « passant » :

- les arcs talus,
- les arcs bords de route,
- les arcs fossés,

Lorsque plusieurs arcs passants sont jointifs, ils sont fusionnés pour former une unité « passante » d'ordre supérieur. La fusion des arcs est réalisée en analysant leur pente respective. Ainsi pour que deux arcs talus jointifs soient unifiés, leur direction topographique doit être identique. Lors de la fusion des arcs, la surface drainée maximale est retenue.

3.1.3.2. Les aménagements « bloquants »

Un aménagement est dit « bloquant » lorsqu'il permet le blocage des eaux de surface. Les aménagements bloquants sont identifiés par HydroTIN en recherchant les arcs doubles qui alimentent un point de stockage artificiel. Cette méthode est appliquée uniquement aux arcs représentant un bord de route ou un talus. Cependant, en système bocager, il existe un autre type d'aménagement «bloquant » qu'il convient de prendre en compte. Il s'agit des fossés aveugles localisés à l'amont des talus qui ont pour objectif de contenir les eaux de la parcelle. Les fossés bloquant sont identifiés en exploitant la même procédure que pour les arcs doubles. On recherche les points de stockage artificiel appartenant à un nœud ou un arc fossé. Lorsqu'un point de stockage est détecté, on sélectionne alors les arcs fossés amont qui alimentent ce point. L'opération de regroupement en unité linéaire « bloquante » est identique à celle des arcs « passants ».

Selon cette typologie, les arcs talus de la figure 179 (extrait B) seront considérés comme bloquant tandis que les arcs talus limitrophes seront qualifiés d'unité linéaire « passante » (figure 186). Il faut préciser que cette qualification est individualisée pour chaque côté de l'obstacle.

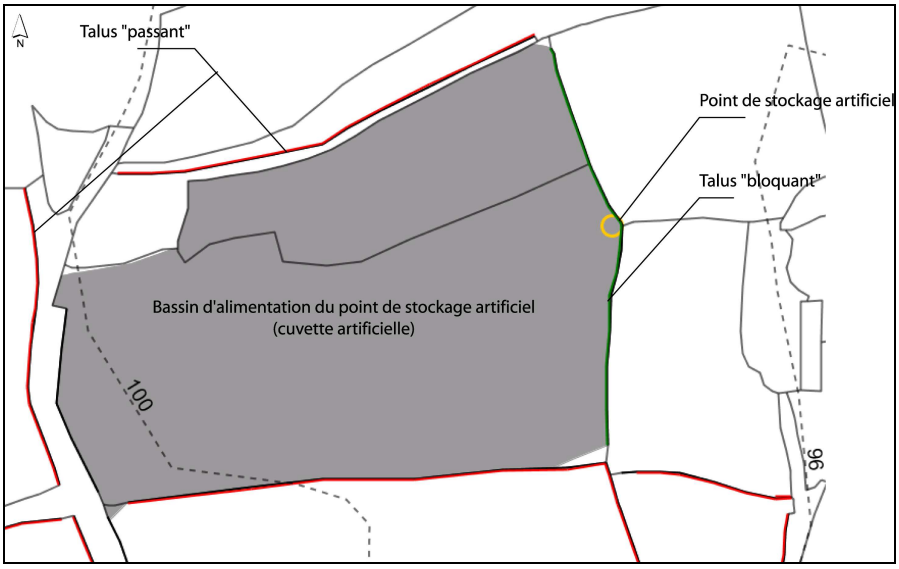


Figure 186. *Exemple de qualification « bloquant » « passant » pour un extrait du linéaire de talus du Goasguden*
(Bocher, 2005)

3.3. L'effet des aménagements linéaires dans le contrôle des surfaces mobilisées : des objectifs à une analyse critique d'HydroTIN

Nous avons mis en évidence précédemment l'existence de perturbations significatives dans le cheminement des écoulements de surface à l'échelle d'un bassin versant anthropisé. Elles conduisent à concentrer linéairement des surfaces importantes qui peuvent atteindre parfois un seuil équivalent à celui d'un petit cours d'eau. Cependant, cette modélisation ne constitue qu'une première étape pour comprendre l'influence de l'organisation des réseaux. Elle ne permet pas de connaître la part respective de ces aménagements dans le contrôle des surfaces émettrices qui est dépendant des cultures, du type de sol, des précipitations…

L'objectif de cette partie était donc de replacer l'application du modèle dans un contexte réel d'exploitation des terres agricoles afin de fournir une appréciation générale de l'effet combiné des systèmes de cultures et des réseaux anthropiques sur les surfaces mobilisées.

L'idée était d'exploiter directement la typologie des aménagements « bloquant » et « passant » définie ci-dessous pour hiérarchiser et localiser leur participation temporelle dans le contrôle des surfaces concentrées. Trois sous-bassins versants avaient retenu notre attention : le Planconiat, le Goasguden et le Goazelarc'h. Cependant, ce travail n'a pu aboutir à des résultats concluants suite à une erreur méthodologique concernant l'automate cellulaire. Les surfaces cumulées obtenues avec la prise en compte des coefficients de ruissellement présentent des résultats erronés. Malgré tout, ils ne remettent pas en cause les fondements du modèle et la méthodologie mise en œuvre pour modéliser spatialement l'impact des aménagements anthropiques sur le parcours des écoulements de surface, objectif premier et principal de ce travail de recherche. Dans une perspective d'amélioration de l'outil, nous souhaitons présenter le problème posé par l'automate cellulaire pour l'intégration de l'occupation du sol. Cette présentation nous amènera à faire un bilan sur les limites et les atouts d'HydroTIN. Elle doit être vue comme une étape de « déconstruction positive » de la démarche de modélisation : étape essentielle pour dégager des pistes d'améliorations.

3.3.1. Identification du problème

L'utilisation d'un automate cellulaire avait été retenue dans cette recherche pour réaliser des bilans des surfaces transférées :

- par cellules pour l'ensemble du TIN (surfaces cumulées sur les cellules du graphe de bassins, cf supra),
- pour un exutoire donné selon un nombre d'itérations défini par l'utilisateur (cf. chapitre 6),

Ce dernier point correspondait en fait à une adaptation du calcul du surfaçogramme proposé par Langlois et Delahaye (2002) au contexte d'un graphe de cellules complexe introduisant les interactions entre les aménagements anthropiques. L'objectif était de tenter de dégager les effets éventuels de l'organisation des réseaux et de l'occupation du sol par sous-bassin versant et de voir si certaines similitudes dans la réponse des sous-bassins pouvaient se détacher.

Six surfaçogrammes ont donc été calculés à l'exutoire des sous-bassins versants du Planconiat, du Goasguden et du Goazelarc'h. Trois pour une simulation à partir des coefficients de ruissellement sur des cultures d'hiver et trois autres pour une simulation avec ceux d'été (figure 188). Parallèlement, une cartographie des surfaces cumulées est construite pour les deux périodes. Les paramètres des simulations sont identiques à ceux utilisés pour la simulation C (cf

supra). Le nombre d'itérations pour produire les surfacogrammes a été fixé à 180 pour les trois sous-bassins versants : au-delà, les surfaces cumulées n'évoluant plus à l'exutoire.

D'emblée les faibles surfaces cumulées obtenues à l'exutoire des sous-bassins versant nous ont interpellé (figure 188 et tableau 36). Les surfaces cumulées maximales pour l'ensemble des itérations par sous-bassin avoisinaient une centaine de mètres carrés. 172,7 pour la valeur la plus forte sur le Goasguden. Elles représentaient à peine 1 pour mille de la surface connectée au cours d'eau. Une explication plausible bien que peu probable, notamment pour le Goazelarc'h où la surface maximale cumulée représentait 83,9 m ² en hiver, pouvait être imputée à l'efficacité des réseaux anthropiques et la présence de parcelles à faible coefficient de ruissellement dans le bassin d'alimentation connecté au cours d'eau.

Sous-bassin	Simulation	Superficie (ha)	Surface maximale cumulée (m²)	Surface moyenne cumulée	P max[47]
Planconiat	Simulation B-hiver	40,1	101,4	9,5	0,5
Goasguden		86,9	172,7	16,8	0,2
Goaszelarc'h		77.7	83.9	6	0.1
Planconiat	Simulation B-été	40,1	101	6,9	0,5
Goasguden		86,9	682,8	30,9	0,9
Goaszelarc'h		77,7	481,6	12,5	0,6

Tableau 36. *Statistiques sur les surfaces cumulées à l'exutoire des sous-bassins versants*

Le calcul du bassin d'alimentation connecté sur le sous-bassin versant du Goasguden suffit à constater l'erreur. Il représente 90 % de la superficie du bassin d'alimentation topographique (figure 187). Pour la période printemps-été, l'aire connectée est occupée à 25 % par des semis de maïs, 15 % par des céréales, 1 % de résidus de choux, 48,3 % de bois et prairie et 7,7 % par la voirie. Potentiellement, en rapport avec les superficies des cultures contenues dans l'aire connectée, la surface cumulée maximale devrait être proche de 14,5 ha (tableau 37). Or selon la simulation, elle est de 682,8 m².

[47] P max correspond à la surface maximale cumulée rapportée à la superficie du bassin d'alimentation connectée en pour mille.

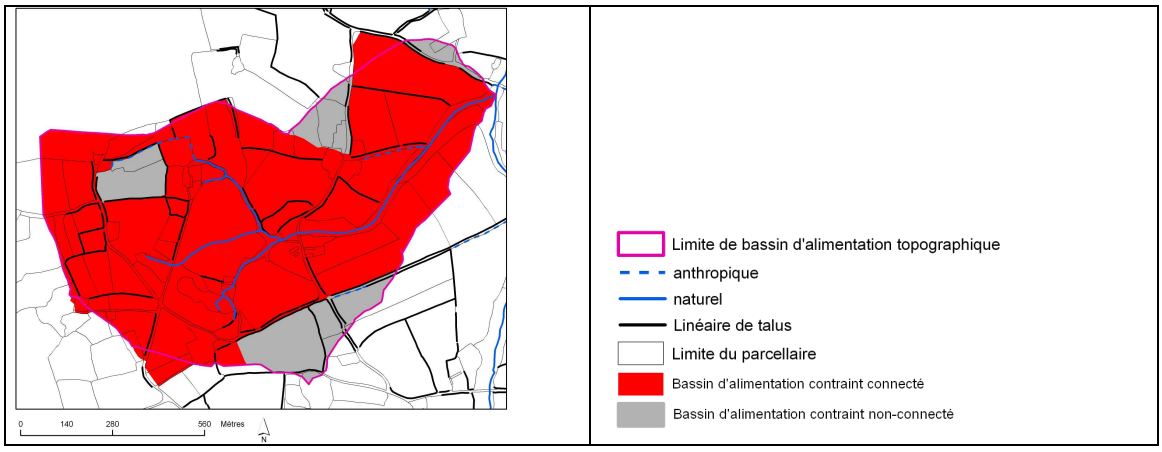


Figure 187. Le bassin d'alimentation connecté et non connecté au cours d'eau pour le sous-bassin versant du Goasguden (Bocher, 2005)

Occupation du sol	Superficie (m²)	% par rapport à la superficie totale	Coefficient de ruissellement	Surface théorique de ruissellement produite (m²)
Semis de maïs	197459,3	25,8	0,4	78983,7
Céréales avancées	114599,8	15,0	0,2	22920,0
Résidus de choux	7453,8	1,0	0,2	1490,8
Bois et prairie	369781,4	48,3	0,05	18489,1
Voirie	59200,2	7,7	0,4	23680,1
Total	748494,5	97,7		145563,6

Tableau 37. *Surface théorique cumulée à l'exutoire du sous-bassin versant du Goasguden en fonction des cultures présentes dans le bassin d'alimentation connecté au cours d'eau.*

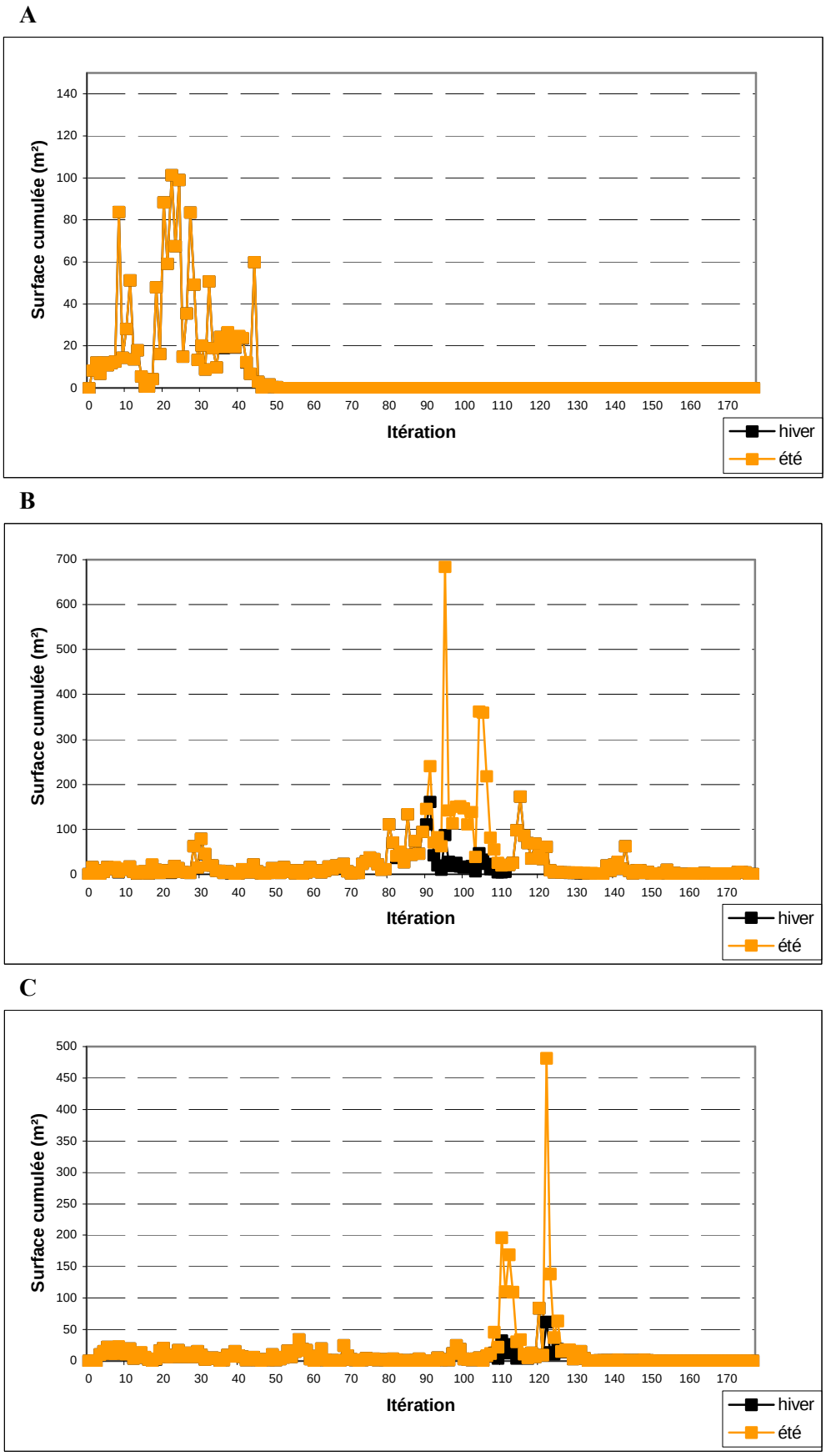


Figure 188. *Surfaçogrammes calculés à l'exutoire des sous-bassins versants du Planconiat (a), du Goasguden (b) et du Goazelarc'h (c) (Bocher, 2005)*

3.3.1. Explication du problème

La cause du problème ne nous a pas paru évidente. Pour tenter de la discerner, nous avons donc construit un cas théorique de simulation. Ce cas est schématisé sur la figure 189. Les surfaces indiquées sur la figure 189 A ne sont pas en relation avec la taille des faces. Elles ont été choisies pour faciliter la compréhension du fonctionnement de l'automate. L'unité de mesure est le m². Nous portons ici l'attention uniquement sur le bassin d'alimentation du nœud n3-7-8 (figure 189, cadre A). Il comprend les faces f1, f2 et f3. Ces faces ont une proportion de flux égale à 1 (cf. chapitre 6), c'est-à-dire qu'elles transmettent la totalité de leur surface à la face aval. Le coefficient de ruissellement attribué ici à ces trois faces est de 0,4.

Les échanges de surface sont récapitulés par itération dans le cadre B.

L'itération 0 correspond à la phase d'initialisation des cellules. Le bilan d'une cellule est égal à sa superficie et la surface transmise est nulle.

L'itération 1 correspond à la première connexion entre les cellules. Le bilan f1 est considéré nul. La surface de f1 a été transmise proportionnellement au coefficient de ruissellement à la cellule f2 en aval, soit 10 * 0,4 = 4 m². Pour les autres faces aval l'opération est identique. Ainsi, la cellule f2 a transmis 2 m² à f3 et f3 0,4 m² au nœud n3-7-8. Le nœud n3-7-8 ne transmet rien car il s'agit d'un point de stockage.

A l'itération 2, f1 ne transmet plus de surface, f2 a un bilan nul et transmet la surface reçue auparavant par f1. Les itérations s'enchaînent jusqu'à ce que toutes les cellules aient une valeur b et t égales à zéro. Ce que nous avons nommé le stade « stationnaire ». Le stade est atteint ici au bout de la 4ème itération.

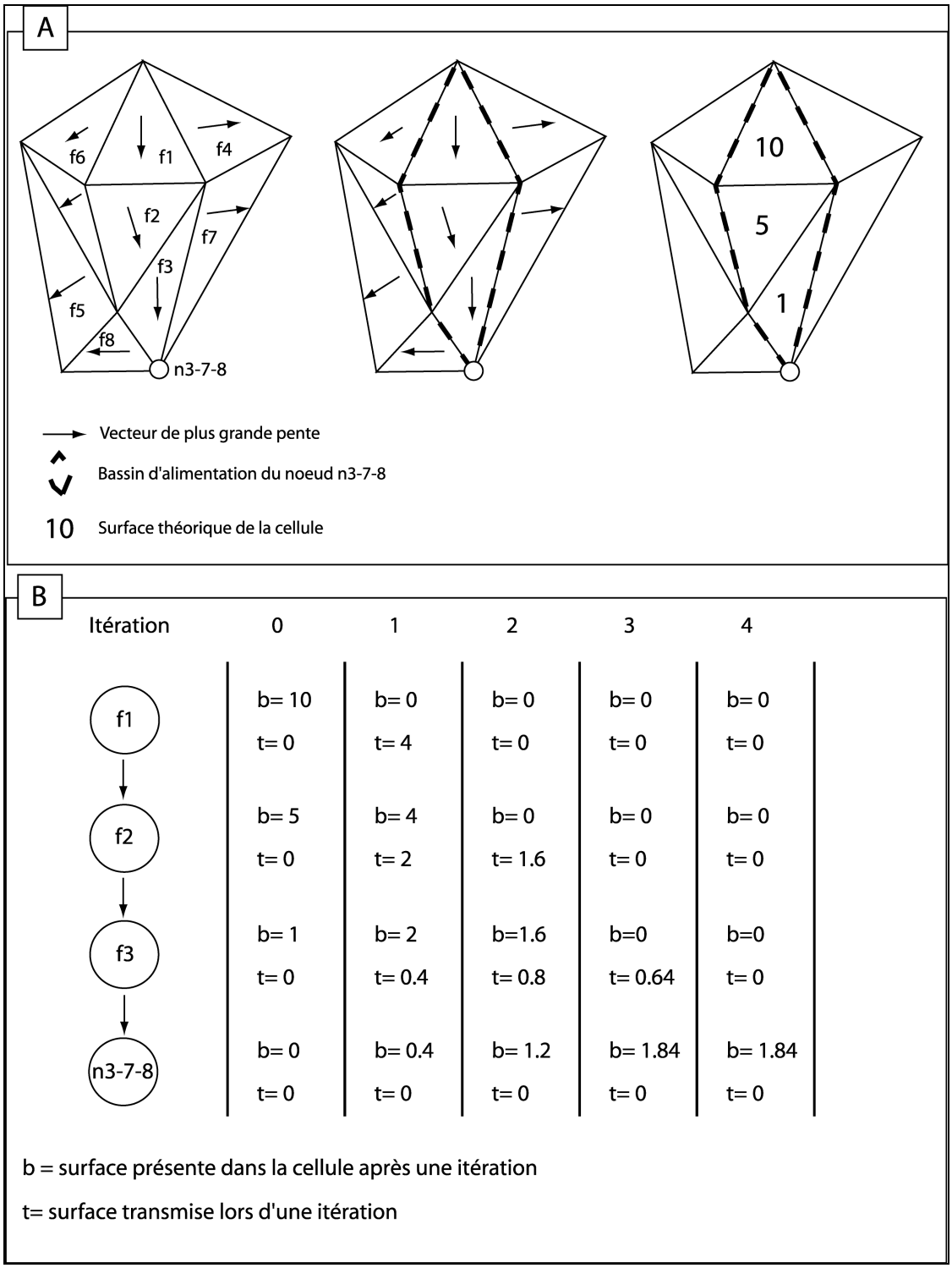


Figure 189. *Le problème des surfaces cumulées dans l'automate cellulaire (Bocher, 2005)*

On remarque que le résultat aboutit à une surface cumulée très faible au niveau de la cellule exutoire 1,84 m². La surface cumulée est très largement sous-évaluée. Or en théorie celle-ci devrait être de 7,4 m² si l'on se place en condition de sols saturés, favorable au ruissellement. Les règles de bilans et de transferts que nous avons définies ne traduisent pas la réalité des surfaces mises en jeu lors des phénomènes de ruissellement parce qu'elles ne

représentent pas la concentration des écoulements. Pour corriger ce problème une solution consisterait à sommer les surfaces amont au bilan de la cellule lors de chaque itération. Cependant, cette solution ne résout que partiellement le problème et ne traduit toujours pas la réalité du phénomène de ruissellement qui est dépendant des précipitations, de l'état du sol et de la pente du terrain. Ce dernier paramètre est d'ailleurs indispensable par rapport à la structure de données que nous utilisons. En effet, nous avions retenu la méthode la plus simple proposée par Langlois et Delahaye (2002) pour représenter les échanges de surface à partir d'un automate cellulaire. Nous avons considéré que les connexions entre les cellules se réalisaient uniformément dans le temps et que la circulation des surfaces entre les cellules était pilotée par les itérations de la machine (Delahaye, 2002). Ce choix peut se justifier pour des structures de données à mailles régulières où les connexions reposent sur une unité homogène. C'est le cas pour Langlois et Delahaye (2002) qui travaillent avec des TIN composés de triangles réguliers ou bien encore du modèle LISEM qui exploite des MNT raster pour simuler un déclenchement progressif du ruissellement au cours de remplissage de dépression (De Roo *et al.*, 1998). Cependant pour des configurations géométriques irrégulières, il est inadapté ; particulièrement lorsqu'il s'agit de simuler dynamiquement des bilans de transfert. Pour illustrer la nature du problème, nous avons calculé un surfaçogramme à l'exutoire de deux TIN dont le nombre de primitives géométriques est différent mais les caractéristiques topographiques identiques. Le TIN (a) est constitué de 268 faces et le TIN (b) de 316. Le TIN (a) a été allégé en triangles en supprimant les courbes intermédiaires 62 et 58 (figure 190).

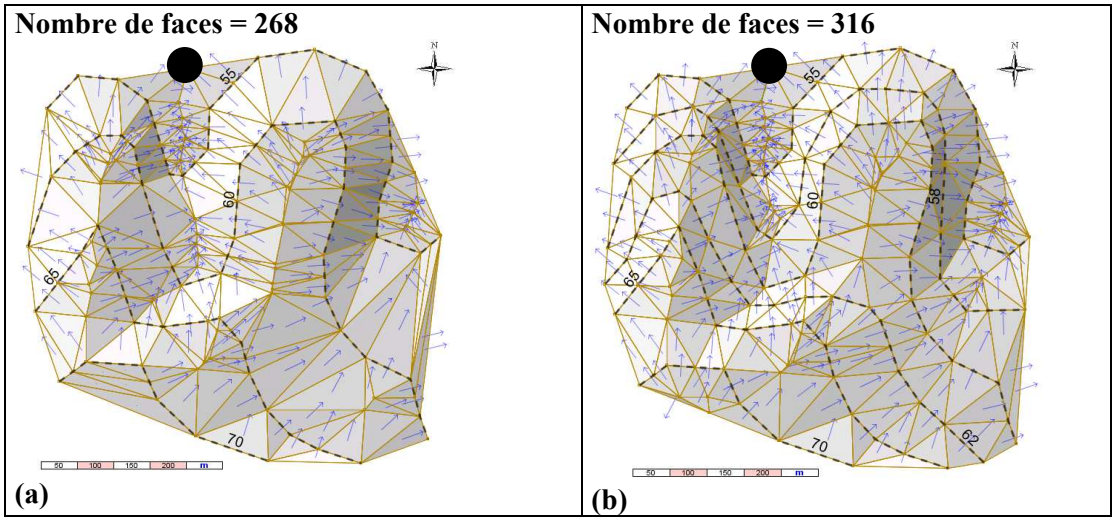


Figure 190. *TIN théoriques utilisés pour représenter l'impact de la structure géométrique dans le calcul du surfacogramme (Bocher, 2005)*

Comme le montre la figure 191, les deux courbes des surfacogrammes ne s'ajustent pas. Sur le TIN (a) les transferts de surfaces sont plus « rapides ». La courbe du TIN (a) a une forme plus ramassée et le nombre d'itérations pour parvenir à l'état stationnaire est de 22. Pour la courbe du TIN (b), les apports de surfaces sont différés. Le nombre d'itérations pour atteindre

l'état stationnaire est de 25. L'exutoire du TIN (b) présente une forte période d'activité pendant laquelle les surfaces cumulées augmentent significativement.

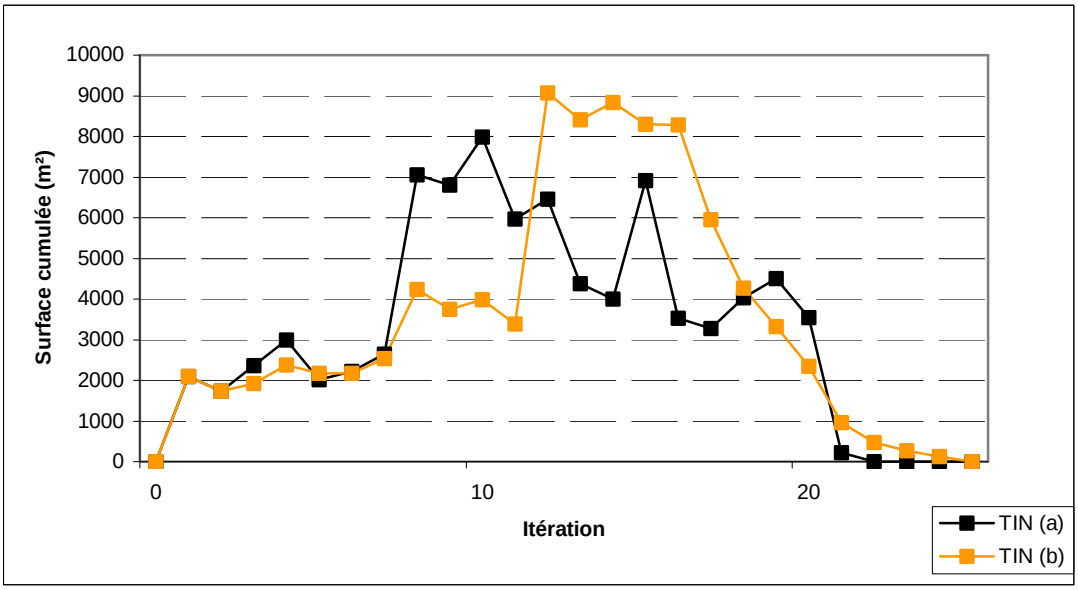


Figure 191. *Surfacogrammes calculés pour l'exutoire du TIN (a) et du TIN (b) (Bocher, 2005)*

Cet exemple permet de mettre en évidence la conséquence d'un maillage sur les surfaces transférées à l'exutoire. Elle montre l'insuffisance d'une approche de connexion de cellules à cellules qui est dépendante du nombre d'objets présents dans le TIN. Ici l'ajout de deux courbes de niveau intermédiaires, soit 48 faces supplémentaires entre le TIN (a) et le TIN (b), a suffit à perturber significativement la simulation de la réponse du bassin versant. L'automate pour parvenir à l'état stationnaire est contraint de traverser un nombre de cellules plus important. De plus, cette approche n'intègre pas la variabilité de la distribution spatiale de la taille des cellules qui modifie les surfaces transmises. L'automate cellulaire interprète toutes les cellules comme une même unité d'échange. Or dans notre cas, comme on peut le voir sur la figure 192, ni leur répartition, ni leur taille ne sont homogènes.

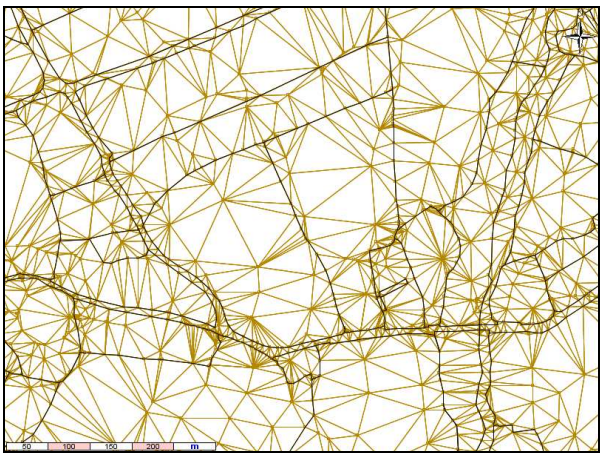


Figure 192. *Extrait du maillage sur le TIN contraint* (Bocher, 2005)

Cette abstraction de la taille de la cellule conduit à rythmer les apports de flux atemporellement et donc à produire des résultats erronés par rapport à la réalité du phénomène de ruissellement. L'exutoire dont les cellules amont sont de grandes tailles ou de tailles homogènes recevra des surfaces importantes sur des temps cours par rapport à un exutoire dont les cellules amont sont plus hétérogènes et plus petites. De plus, cet aspect restreint les possibilités de comparaison entre site.

Pour corriger ces problèmes, il est impératif de prendre en compte la dynamique du ruissellement et de relier les échanges de cellules à cellules entre autre à la topographie. Ce point a été développé par Langlois et Delahaye (2002) pour adapter le modèle Ruicells à la modélisation hydrologique. Les connexions entre cellules du graphe sont exprimées par des équations différentielles permettant d'intégrer la vitesse d'écoulement. Nous n'avons cependant pas utilisé ces travaux pour améliorer l'automate cellulaire car cela aurait supposé de reconcevoir en totalité certains points de la programmation. Or l'objectif de cette recherche était avant tout de proposer une méthodologie pour améliorer la prise en compte de l'effet des aménagements anthropiques sur la spatialisation du cheminement des écoulements de surface à l'échelle de bassin versant.

Conclusion du chapitre 7

Ce chapitre 7 montre la nécessité de la phase d'expérimentation dans un projet de modélisation afin de confirmer ou d'infirmer les résultats. Elle permet de fixer les frontières de validité du modèle et de mettre en lumière d'éventuelles carences. Nous avons pu mettre en évidence les capacités du modèle HydroTIN à traduire spatialement les interactions entre la topographie naturelle et les aménagements linéaires grâce notamment à la production d'une carte des surfaces cumulées pour chaque cellule du graphe de bassins. Nous avons proposé une typologie pour qualifier l'effet de ces aménagements sur la concentration du ruissellement de surface en isolant les unités linéaires artificielles « passantes » et « bloquantes ». Cependant, lors de l'application du modèle dans un contexte d'utilisation des terres agricoles, certaines fonctionnalités se sont révélées inadaptées. L'automate cellulaire censé nous permettre de simuler à partir des coefficients de ruissellement les échanges de surfaces présentait des erreurs méthodologiques. La recherche de ces erreurs s'est avérée une phase longue et fastidieuse pour l'ensemble du site d'étude. Elle nous a contraint à construire un TIN théorique. Ces erreurs ont néanmoins été identifiées et une solution d'amélioration a été proposée.

L'erreur identifiée sur l'automate cellulaire a eu des répercussions au-delà du seul calcul des surfaces cumulées en raison de l'organisation même de la programmation. Ainsi, la surface drainée latéralement (surface transitant par un arc) n'a pu être exploitée pour connaître en fonction de l'organisation des cultures dans un bassin versant, les surfaces contrôlées par une unité linéaire artificielle. Cette variable ainsi que la cartographie de ces unités auraient pourtant permis de les hiérarchiser en vue de proposer des plans de gestion des sols. En effet, l'objectif était à partir de ces données d'identifier spatialement les linéaires susceptibles d'être à risque en terme de concentration du ruissellement.

CONCLUSION GENERALE

Bilan et perspectives de la modélisation spatiale des écoulements de surface sur un bassin versant rural

L'objectif de cette recherche était de proposer une méthodologie pour modéliser spatialement l'impact des activités humaines sur l'organisation des écoulements de surface à l'échelle d'un bassin versant agricole. La diversité des interactions sur le versant et la variabilité spatio-temporelle de certaines activités humaines qui régissent la structuration du ruissellement de la parcelle vers les cours d'eau et l'échelle de modélisation (bassin versant de 1 500 à 2 000 ha), nous ont conduit à ne retenir qu'un certain nombre de facteurs prégnants : obstacle en relief, axes de drainage naturel et anthropique, voirie et occupation du sol.

Un bilan des méthodes et outils actuels pour spatialiser le parcours des écoulements de surface à partir d'un Modèle Numérique de Terrain nous a permis de comparer deux grands types d'approches : les modèles utilisant des MNT à mailles carrées et les modèles utilisant des MNT TIN. Les MNT raster sont apparus de loin comme les plus exploités pour leur simplicité et semblent, malgré les limites connues, offrir des résultats acceptables. Cependant, nous avons aussi souligné que ces modèles imposent des choix arbitraires pour le calcul de la direction d'écoulement que ce soit avec les méthodes mono ou multi-directionnelles. De plus, lorsqu'il s'agit de se rapprocher de l'échelle des pratiques territoriales (parcelle d'exploitation, talus), la structure raster contraint :

- soit à définir des priorités pour conserver les objets (modèle STREAM (Souchère, 1995) modèle TORTRAT (Tortrat et al, 2004),
- soit à augmenter la résolution spatiale (Sebbab, 2000),
- soit à accepter un très haut niveau d'abstraction du réel (fossé représenté par des carrés de 10 mètres de large).

Dans tous les cas, les réponses apportées ne nous ont semblé que partielles et surtout inadaptées à des espaces aussi cloisonnés que des bassins versants bocagers où les linéaires subsistent en quantité variable. Pour notre recherche dont l'objectif était de prendre en compte plusieurs objets dans la modélisation, les méthodes reposant sur des MNT raster ont trouvé leur limite dans la structure même de la donnée qui impose une représentation régulière de l'espace (carroyage). Certes, un compromis aurait pu être réalisé en acceptant une perte d'information et en utilisant un MNT à haute résolution comme par exemple un MNT au pas de 5 m. Cependant,

l'offre actuelle en France en matière de données altimètriques et les coûts élevés d'une telle acquisition nous ont paru un frein suffisant pour nous orienter vers une autre solution. De plus comme nous l'avons souligné précédemment, la direction des écoulements est calculée sur un plan implicite qui n'a pas d'interprétation géométrique. Pour s'affranchir de ces limites intrinsèques, nous nous sommes donc orientés vers l'utilisation d'un MNT à mailles triangulaires irrégulières, ce qui n'est pas neutre de conséquences.

De la définition à la conception de la modélisation des écoulements de surface

Notre modélisation s'est appuyée sur la définition d'un cadre théorique dans lequel nous avons précisé les différents composants de la modélisation et leurs interactions. Nous avons retenu une enveloppe conceptuelle la plus générique possible, détachée des contraintes techniques. Au niveau des données, nous avons ainsi privilégié trois catégories d'objets correspondant à un type de comportement potentiel vis-à-vis des écoulements de surface. Il s'agit des objets linéaires obstacles et collecteurs ou encore des objets surfaciques telle que la parcelle culturale dont la réponse hydrodynamique est traduite par un coefficient. Cette organisation avait pour dessein de permettre une transposition du modèle à d'autres problématiques que la seule modélisation du ruissellement de surface à l'échelle d'un bassin versant. Ces objets sont exploités dans une structure triangulaire affinée, que nous avons nommée TIN contraint.

Le TIN contraint constitue la donnée de base essentielle à la mise en œuvre de la modélisation spatiale. Ce TIN, parce qu'il intègre à la fois des informations sur la topographie et sur l'organisation du territoire, est exploité pour construire un graphe de bassins, traduction numérique des interactions entre les objets artificiels et la topographie naturelle. Le graphe de bassins est la structure qui fait la singularité de notre approche. Il peut être considéré comme une amélioration du graphe de cellules topographiques proposé par Langlois et Delahaye (2002). L'intérêt majeur du graphe de bassins est la possibilité d'individualiser le comportement hydrologique d'un objet en fonction de l'entité géographique qu'il représente sur le territoire et ceci tout en conservant un chaînage des écoulements le plus cohérent possible.

A l'interface entre l'implémentation technique et le cadre conceptuel, nous avons souhaité borner les données d'entrée en utilisant une structure et des règles topologiques spécifiques. Ce choix traduit notre volonté de disposer de données les plus cohérentes possibles - au regard des spécifications que nous avons fixées - pour d'une part tendre vers une modélisation rationnelle et d'autre part éviter d'avoir à traiter des cas particuliers comme des chevauchements d'objets (un fossé qui se superpose à un talus). Cette stratégie a bien sûr comme conséquence de circonscrire l'utilisation du modèle.

Le modèle ou plutôt la chaîne de modélisation a été implémentée dans l'environnement SIG du logiciel OpenJump. Elle a abouti à la programmation de trois prototypes : le premier pour préparer les données (VectorProcess), le deuxième pour construire le TIN contraint (TopoTIN) et le dernier pour réaliser la modélisation spatiale (HydroTIN). Lors de cette phase technique des ajustements se sont avérés nécessaires que ce soit pour la construction du TIN contraint ou pour la modélisation des écoulements. Cette phase a nécessité un important travail de développement notamment pour construire une bibliothèque d'objets informatiques qui par la suite nous permette de produire le graphe de bassins et de l'exploiter. L'un des aspects les plus délicats a été l'individualisation du comportement des arcs obstacles. Ces derniers pouvant être considérés comme obstacle de chaque côté ou obstacle d'un coté et perméable de l'autre. Pour cela, nous avons créé deux nouveaux types d'objets : les arcs doubles et les points multiples. Ces objets nous ont permis de fournir un niveau d'abstraction supplémentaire aux primitives d'un TIN et de **déplacer la modélisation à une seule analyse des objets existants**.

L'application des prototypes au sous-bassin versant du Sterenn

Les prototypes VectorProcess, TopoTIN et HydroTIN ont été appliqués sur le sous-bassin versant du Sterenn, territoire de 1 500 ha caractérisé par une importante activité agricole (elle représente 80% de la SAU) et un linéaire de talus hétérogène.

Trois modélisations ont été réalisées : une première avec les talus (simulation A), une seconde avec les talus et la voirie (simulation B) et enfin une troisième avec l'ensemble des aménagements (simulation C). A l'échelle des sous-bassins versants, les superficies connectées au cours d'eau montrent que les éléments linéaires modifient l'aire d'alimentation au cours d'eau. La superficie connectée varie entre 48,6 et 97 % pour la simulation A, entre 67,8 et 94,9 % pour la simulation B et entre 49,8 et 94,9 pour la simulation C. Cependant, les résultats ne nous permettent pas de faire ressortir de relation évidente entre la densité des aménagements et la surface connectée au cours d'eau. Des hypothèses ont pu être émises sur le rôle prépondérant des aménagements linéaires sur certains sous-bassins versants, le rôle de connexion ou de déconnexion dans le système. Ces résultats ont surtout montré la nécessité de disposer d'un autre niveau d'analyse, celui de la structuration des réseaux dans le bassin versant. Cet aspect a été étudié en focalisant notre attention sur la répartition des surfaces cumulées sur les cellules du graphe de bassins du Goasguden.

A l'échelle du Goasguden, nous avons mis en exergue que le long du gradient amont-aval entre la topographie naturelle et les aménagements se dessine un jeu complexe d'interactions spatiales. La position des linéaires et leur relation topologique (connexion, déconnexion) apparaissent comme des facteurs de premier ordre contrôlant l'organisation des

écoulements de surface dans le bassin versant. Ils déterminent les conditions d'efficacité des linéaires et leur capacité à concentrer les écoulements sur des distances parfois très importantes. Les linéaires (voirie, talus, fossé) peuvent conjuguer leurs effets pour aboutir à la **formation de systèmes en relais** et connecter différents compartiments du bassin versant. Plusieurs cas de figures ont été observés :

- des **zones de blocage** des écoulements (points de stockage) sur les parcelles en amont des talus,
- des **déviations** lorsque les talus redirigent et canalisent les écoulements,
- des **connexions** entre les parcelles et le réseau de voirie. La voirie concentre les eaux provenant de parcelles parfois très éloignées, modifiant ainsi la forme du bassin versant et favorisant les apports au cours d'eau.
- des **échanges avec les bassins topographiques adjacents** qui prennent la forme d'exportation ou d'importation de flux.

Ces résultats ont montré la capacité d'HydroTIN à modéliser et à restituer spatialement les écoulements dans des environnements à géométrie complexe. HydroTIN est ainsi capable de traduire les connexions entre les principaux aménagements linéaires : voirie, fossé et obstacle. Le chaînage des cellules dans le graphe de bassins a servi à définir une qualification de ces aménagements (« passant », « bloquant »). Malheureusement, une erreur d'interprétation du fonctionnement de l'automate cellulaire nous a empêché de mettre à profit ces capacités dans un contexte d'exploitation des terres agricoles. Pour autant ce problème ne remet pas en cause la totalité de cette recherche dont l'objectif principal est atteint : proposer un modèle capable de modéliser spatialement l'impact des activités humaines sur l'organisation des écoulements de surface à l'échelle d'un bassin versant.

Limites actuelles

Nous pouvons distinguer deux grandes limites intrinsèques à notre modèle : les sources de données d'une part, la gestion du temps de propagation et des volumes d'eau d'autre part.

Les sources de données utilisées

Les sources de données utilisées peuvent être à première vue un facteur limitant pour l'utilisation du modèle HydroTIN. En effet, nous avons souligné dans le chapitre 1 l'extrême diversité et difficulté pour acquérir des données géographiques de qualité notamment sur les

composants de l'organisation du territoire. Cependant, nous avons aussi montré que depuis quelques années, les Bassins versants bretons se sont équipés de logiciels SIG. Ils produisent aujourd'hui pour les besoins des actions de classement des parcelles à risque, une grande partie des sources de données nécessaires au fonctionnement du modèle (parcellaire, linéaire de talus, réseau hydrographique, fossé). De plus, l'IGN dans le cadre de la mise en place du Référentiel à Grande Echelle (RGE) devrait apporter d'autres sources de données vectorielles et ce à un coût relativement abordable pour une collectivité. Le RGE correspond à un plan général pour la constitution d'un référentiel de données géographiques d'une précision de l'ordre du mètre. Parmi les bases de données géographiques intégrées au RGE, la BD Topo Pays représentation vectorielle de la topographie, d'une précision planimétrique de 1 mètre pourra servir pour la production du TIN.

La gestion du temps de propagation et des volumes d'eau

La prise en compte du temps de propagation et des volumes d'eau sont deux paramètres indispensables qui devront être intégrés dans une future version d'HydroTIN. En effet, nous avons mis en évidence les conséquences d'un maillage irrégulier qui font de la structure TIN un atout mais aussi un handicap lorsqu'il s'agit de simuler des échanges dynamiquement. Le temps « machine » n'est ici pas suffisant. Une solution simple pourrait consister à utiliser une équation universelle de vitesse basée sur la pente de la cellule pour rythmer les échanges dans le graphe de bassins.

Concernant la prise en compte des volumes d'eau, le sujet est plus délicat parce qu'il faut pouvoir calculer la hauteur d'eau sur chaque cellule afin d'assurer une répartition cohérente. Cela suppose de complexifier le graphe de bassins notamment pour permettre de déverser les eaux vers la cellule exutoire dans le cas de points de stockage artificiel. Actuellement, c'est un problème que nous étudions mais auquel nous n'avons pas trouvé de réponse simple : les volumes sur un TIN sont beaucoup plus complexes à calculer que sur des structures carrées parce qu'une cuvette est composée de plusieurs géométries différentes. Cependant, la prise en compte des volumes d'eau par exemple pour simuler les conséquences d'un évènement pluvieux permettrait de se substituer aux graphes de bassins à paramètre « fixe » et certainement de coller à une représentation des connexions le long des obstacles plus proches de la réalité.

Perspectives

HydroTIN a été appliqué sur un seul sous-bassin versant, le Sterenn et pour un seul jeu de données altimétriques. Si les observations de terrain nous ont permis de valider des

paramètres du graphe, il est indispensable que le modèle soit testé dans d'autres configurations paysagères d'une part afin de disposer de données de références, d'autre part afin d'étudier la sensibilité du modèle aux changements d'échelle.

Enfin, en réponse au constat réalisé dans le chapitre 1 sur l'absence de dispositif d'évaluation des opérations d'aménagement du milieu dans le cadre des actions de reconquête de la qualité de l'eau, notons que HydroTIN fait l'objet actuellement d'un essai d'application opérationnelle sur un sous-bassin versant prioritaire du Jaudy-Guindy-Bizien. HydroTIN y est utilisé pour faire un bilan des surfaces connectées au cours d'eau et identifier les linéaires de talus « passants » et « bloquants ». L'objectif est de tenter de cerner les points noirs de concentration du ruissellement et de proposer en conséquence de nouvelles constructions de talus.

Du reste, cette recherche met en exergue l'intérêt de l'analyse spatiale pour la compréhension de phénomènes complexes.

BIBLIOGRAPHIE

A

ADAMIADE C., 2004, *Influence d'un fossé sur les écoulements rapides au sein d'un versant*, Thèse de Doctorat, Université P. et M. Curie, Paris, 246 p.

AGARWAL P., DE BERG M., PROSENJIT B., DOBRINT K., VAN KREVELD M., OVERMARS M., DE GROOT M., ROOS T., SNOEYINK J., YU S., 1996, *The Complexity of Rivers in Triangulated Terrains*, Proceedings of the 8th Canadian Conference on Computational Geometry, 6 p. http://citeseer.ist.psu.edu/agarwal96complexity.html. Consulté en 2004.

ALBERTS G., GHIDEY F., KRAMER L., 2003, *Impact of Grass Hedges on Sediment Yield from a Hel Watershed*, Proccedings first interagency conference on research in the watersheds. United States department of Agriculture. Washington D.C., pp. 428-433. http://www.tucson.ars.ag.gov/icrw/Proceedings/Alberts2.pdf. Consulté en 2004.

AMBROISE B., 1999, *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, facteurs, modèles*, Ed HGA, Bucarest, 200 p.

ASMUSSEN L., WHITHE A., HAUSER E., SHERIDAN J., 1977, « Reduction of 2,4-D Load in surface runoff down a grassed waterway », *Journal of Environmental Quality*, 6 (2), pp. 159-162.

AUROUSSEAU P., 1999, « Le phosphore dans les sols et les eaux de Bretagne », Conseil scientifique régional de Bretagne, Séance du 14 Décembre 1999 – Version définitive du 11 Mars 2001. http://viviane.roazhon.inra.fr/spanum/diagnostic/phosphore/phospho1.htm. Consulté en 2004.

AUROUSSEAU P., SQUIVIDAN H., 1996, *Correction of Digital Elevation Models using drainage pattern constraints*. http://viviane.roazhon.inra.fr/spanum/publica/contrain/contrain.htm. Consulté en 2004

AUROUSSEAU P., SQUIVIDANT H., BAQUE M.C., SIMON F., 1996, *Analyse des facteurs de risque de transferts de pesticides dans les paysages. Etablissement d'une hiérarchie de ces risques : application au calcul d'un indice de risque par bassin versant et par parcelle,* Rapport de contrat pour l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 22 p.

AUZET A. V., 1990, *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects aménagements*, Ministère de l'Environnement / Ministère de l'Agriculture et de la Forêt, 39 p.

AUZET A. V., BOIFFIN J., PAPY F., MAUCORPS J., OUVRY J.F., 1990, « An approach to the assessment of erosion forms and erosion risk on agricultural land in the Northern Paris Basin, France », in Boardman J., Foster I.D. L., Dearing J.A. (dir.), *Soil Erosion on Agricultural Land*., Wiley J. and sons, pp. 383-400.

B

BALAYN P., 2001, *Contribution à la modélisation numérique de l'évolution morphologique des cours d'eau aménagés lors de crues*, Thèse de Doctorat en mécanique, Université de Lyon 1, 140 p. http://www.lyon.cemagref.fr/doc/these/balayn/index.shtml. Consulté en 2004.

BALLAND P., HUET P., LAURENT J.-L., LUMMAUX J.-C., MARTIN X., SCHLICH R., 2001, *Rapport sur les observatoires pour l'environnement*, Paris, Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement, Ministère délégué à la Recherche, 44 p.

BANOS A., 2001, « A propos de l'analyse spatiale exploratoire des données », *Cybergéo*, n° 197.

BARBALIĆ D., OMERBEGOVIĆ V., « Correction of horizontal areas in TIN terrain modeling algorithm ».
http://gis.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap924/p924.htm. Consulté en 2005.

BAUDRY J., 1988, « Approches écologiques des paysages », *Le courrier de l'environnement*, n° 4, juin. http://www.inra.fr/dpenv/baudrc04.htm, consulté en janvier 2002. Consulté en 2003.

BAUDRY J., JOUIN A., 2003, *De la haie aux bocages. Organisation, dynamique et gestion*, Ed. Inra, Collection espaces ruraux, Paris, 435 p.

BAZIN P., JEGAT R., SCHMUTZ T., 1995, *Les talus du bocage*, Institut pour le développement Forestier, Paris, 56 p.

BEASLEY D. G., HUGGINS L. F., MONKE E.J., 1980, « ANSWERS – amodel for watershed planning », *Trans. ASAE (*American Society of Agricultural and Biological Engineers), 23, pp. 938-946.

BEAUJOUAN V., AUROUSSEAU P., DURAND P., SQUIVIDANT H., RUIZ L., 2000, « Comparaison de méthodes de définition des chemins hydrauliques pour la modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant », *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 10, n°1, pp.39-60.

BEAUJOUAN V., 2001, *Modélisation des transferts d'eau et d'azote dans les sols et les nappes. Développement d'un modèle conceptuel distribué. Application à de petits bassins versants agricoles*, Thèse de Doctorat, ENSAR, 208 p.

BEVEN K., 1989, « Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models », *Jour. Hydrol.*, 105, pp. 157-172.

BEVEN K., 1996, « The limits of splitting : Hydrology », *Science of the Total Environment*, n° 183, pp. 98–97.

BOCHER E., 2002, *Transfert de produits phytosanitaires dans un système bocager, proposition d'une méthode de hiérarchisation des sous-bassins versants, application au bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien*, Mémoire de DEA, Université de Rennes 2, 98 p.

BOCHER E., 2003, *Diagnostic des structures bocagères et hydrauliques sur le sous-bassin versant du Sterenn*, Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien, Trélévern, France, 118 p.

BOIFIN J., PAPY F., EIMBERCK M., 1988, « Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion », *Agronomie*, vol. 8, n°8, pp. 663-673.

BOLLINE A., 1974, « L'érosion des sols limoneux cultivés », *Bulletin des recherches agronomiques de Gembloux*, tome 9, n° 3, pp. 353-369.

BORDIN P., 2002, *SIG concepts, outils et données*, Lavoisier, Hermès science, Paris, 259 p.

BRUNEAU P., 1992, *Modélisation hydrologique distribuée. Influence de la topographie et des sols. Application au transfert de nitrates en Bretagne*, Thèse de Doctorat, Université P. et M. Curie, Paris, 207 p.

BUREL F., BAUDRY J., 1999, *Ecologie du paysage – concepts, méthodes et applications*, TEC & DOC, Paris, 362 p.

BURROUGH P., MCDONNEL R., 1998, *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press, 333 p.

C

CANEVET C., 1992, *Le modèle agricole breton*, Presses Universitaires de Rennes, Rennes, 397 p.

CANEVET C., LEBAHY Y., 1994, « Aménagement rural : le remembrement et les aménagements fonciers », in Le Rhun P.-Y., Le Quéau J.-R., *Géographie et aménagement de la Bretagne*, Skol Vreizh, Morlaix, 240 p., pp. 156-157.

CANEVET C., 2004, *Du remembrement des terres agricoles à l'aménagement foncier rural et à la mise en valeur des paysages*, 21 p.

CANN C., BORDENAVE P., SAINT-CAST P., BENOIST J.-C., 1999, « Transfert et flux de nutriments-Importance des transports de surface et de faible profondeur », in Merceron M., *Pollutions diffuses : du bassin versant au littoral*, Editions Ifremer, Plouzané, 350 p, pp. 125-140.

CARLUER N., 1998, *Vers une modélisation hydrologique adaptée à l'évaluation des pollutions diffuses : prise en compte du réseau anthropique. Application au bassin versant de Naizin*, Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 381 p.

CARNET C., 1978, *Etude des sols et de leur régime hydrique en région granitique de Bretagne : une approche du rôle du bocage*, Thèse de Doctorat d'agronomie, Université de Rennes 1, 235 p.

CERDAN O., 2001, *Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivés*, Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, INRA, 172 p.

CHARLEUX-DEMARGNE J., 2001, *Qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie. Application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants*, Thèse de Doctorat, ENSG Marne la Vallée, CEMAGREF de Montpellier, 350 p.

CHRISMAN N. R., 1991, « The error component in spatial data », in Longley P., Goodschild M., Maguire D., Rhind D., *Geographic Information Systems and Science,* 447 p., volume 1, pp. 165-174. http://www.wiley.com/legacy/wileychi/gis/volumes.html. Consulté en 2005.

CLARK M. J., 1998, « Putting water in its place : a perspective on GIS in hydrology and water management », in *Hydrological Processes*, vol. 12 (6), pp. 823-834.

CLEMENT M., CANN C., SEUX R., BORDENAVE P., 1999, « Facteur de transfert vers les eaux de surface de quelques phytosanitaires dans le contexte agricole breton », in Merceron M. coord., *Pollutions diffuses : du bassin versant au littoral*, Actes du colloque de Ploufragan septembre 1999, Editions Ifremer, 350 p., pp.141-156.

COLLET C., 1992, *Systèmes d'information géographique en mode image*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Collection Gérer l'environnement, 186 p.

COSANDEY C., ROBINSON M., 2000, *Hydrologie continentale*, Armand Colin, Paris, 359 p.

COSTA-CABRAL M., BURGES S-J., 1994, « Digital Elevation Model Networks (DEMON): A Model of Flow Over Hillslopes for Computation of Contributing and Dispersal Areas », Water Resources Research, 30(6), pp. 1681-1692.

COURS DES COMPTES, 2002, *La préservation de la ressource en eau face aux pollutions d'origine agricole : le cas de la Bretagne*, 294 p.

CROIX N., 1999, *La terre entre terroir et territoire. Mutations foncières et organisations des campagnes armoricaines méridionales (1968-1998)*, HDR, Université de Nantes.

CROS-CAYOT S., 1996, *Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte armoricain*, Thèse de Doctorat à l'Ensar, 218 p.

CROS-CAYOT S., GASCUEL-ODOUX C., 1998, « Les transferts à la surface du sol », in Cheverry C., *Agriculture intensive et qualité des eaux*, Inra Editions, Collection Science Update, Paris, 295 p., pp. 143-156,

D

DANAIS M., 1987, *Evolution des bocages de l'ouest : contribution à un premier bilan et approche prospective*, pp. 134-153.

DARBOUX F., 1999, *Modélisations numérique et expérimentale du ruissellement. Effet de la rugosité sur les distances de transfert*, Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 170 p.

DAUTREBANDE S., 2003, *Guide méthodologique pour le choix d'aménagements appropriés en matière de conservation des sols et des eaux*, Fascicule 2, Région wallonne - Direction générale de l'Agriculture - Division de la gestion de l'espace rural direction de l'espace rural, 133 p.

DAVIS., 2003, *JUMP, Technical Report*, 22 p.
http://www.jump-project.org/project.php?PID=JUMP&SID=DOCU. Consulté en 2005

DELAHAYE D., 2002, *Apport de l'analyse spatiale en géomorphologie. Modélisation et approche multiscalaire des risques*, Mémoire HDR, volume 1, Université de Rouen, 259 p.

DENIEL J., 1965, « Les talus et l'aménagement de l'espace rural », *Pen ar Bed*, n° 41, nouvelle série, Volume 5, fascicule 2, pp. 41-54.

DE OLIVEIRA J., 2005, http://www.jump-project.org/project.php?PID=SK&SID=OVER. Consulté en 2005

DEMERS M., 2002, *GIS Modeling in Raster*, 203 p.

DEPRAETER C., MONIOD F., 1991. « Contribution des modèles numériques de terrain à la simulation des écoulements dans un réseau hydrographique », *Hydrologie Continentale*, 6(1), pp. 29-53.

DE ROO A. P. J., 1998 « Modelling runoff and sediment transport in catchments using GIS », pp. 85 – 102, *Hydrological Applications of GIS*, Angleterre, 173 p.

DEVOGELE T., 1997, *Processus d'intégration et d'appariement de Bases de Données Géographiques Application à une base de données routières multi-échelles*, Thèse de Doctorat, laboratoire COGIT, IGN, 207 p..

DIREN, 2003, *L'eau en Bretagne : Bilan 2003*, 16 p.
http://www.bretagne.ecologie.gouv.fr/Eau/Tableaux_Bord/Tab-Bord_2003/Eaux_douces/nitrates.htm. Consulté en novembre 2004

DUKE G D., KIENZLE S W., JOHNSON D L., BYRNE J M., 2003, « Improving overland flow routing by incorporating ancillary road data into Digital Elevation Models », *Journal of Spatial Hydrology*, 3. http://www.spatialhydrology.com/journal/. Consulté en décembre 2004.

E

EGENHOFER M. J., HERRING J. R., 1991, « High-level spatial data structures for GIS », in Longley P., Goodschild M., Maguire D., Rhind D., *Geographic Information Systems and Science,* vol. 1, 447 p., pp. 227-237.
http://www.wiley.com/legacy/wileychi/gis/volumes.html. Consulté en 2005

EGENHOFER M. J., FRANZOSA R. D., 1991, « Point-set topological spatial relations », *International Journal of Geographical Information Systems*, 5, pp.161-176.

FAIRFIELD J., LEYMARIE P., 1991, « Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models », *Water Resources Research*, 27(5), pp. 709-717.

FALOURD E., 2003, *Intégration de la donnée 3D dans les SIG*, Mémoire de DESS cartographie, SIG et développement territorial, Université de Rennes 2, 129 p.

FEODOROFF A., 1965, « Mécanismes de l'érosion par la pluie », *Revue de géographie physique et de géologie dynamique* (2), vol. VII, fasc. 2, pp. 149-163.

FLATRES P., 1986, *La Bretagne*, Presses Universitaires de France, collection La question régionale, Paris, 183 p.

FLEURY J., GUYOMARC'H J.-P., 2003, *Le défi de la qualité des eaux en Bretagne*, Conseil Economique et Social, Région Bretagne, 583 p.

FREEMAN T., 1991, « Calculating catchement area with divergent flow based on a regular grid », *Computers and Geosciences*, vol. 17, n°3, pp. 413-422.

FULLEN M.A., 1998, « Effects of grass ley set-acide on runoff, erosion and organic matter levels in sandy soil in east Shropshire », UK, *Soil and Tillage Research*, 46, pp. 41-49.

G

GALLIEN E., LE BISSONNAIS Y., EIMBERCK M., BENKHADRA H., LIGNEAU H., 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*, n°4, pp. 171-183.

GARBRECHT J., MARTZ L., 1997, « The assignment of drainage directions over flat surface in raster digital elevation models », *Journal of Hydrology*, n°193, pp. 204-213.

GASCUEL C., 2001, *Pollution de l'eau par les nitrates : le temps de réponse des nappes*. http://www.inra.fr/presse/mars01/nb1.html. Consulté en 2005.

GATRELL A. C., 1991, « Concepts of space and geographical data », in Longley P., Goodschild M., Maguire D., Rhind D., *Geographic Information Systems and Science,* 447 p., pp. 119-134. http://www.wiley.com/legacy/wileychi/gis/volumes.html. Consulté en 2004.

GILLET H., FERRON O., BAZILE E., CLISSON O., CARREL V., 2002, « Transfert de produits phytosanitaires et qualité de l'eau », in Alard V., Bréranger C., Journet M., 2002, *A la recherche d'une agriculture durable, Etude de systèmes herbagers économes en Bretagne*, Inra Editions, Collection Espaces Ruraux, Paris, 340 p., pp. 259-272.

GINESTE P., 1997, « Télédétection spatiale et modélisation du fonctionnement hydrologique des petits bassins versants », *Rapport sur l'eau de la FAO*. http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/W7320B/w7320b33.htm. Consulté en 2004.

GOLD C., DAKOWICZ M., 2002, « Terrain modelling based on contours and slopes », *Advances in Spatial Data Handling : Proc. 10th Int. Symp. Spatial Data Handling* (SDH 2002), Richardson D. ed., Springer-Verlag, 13 p.

GOODCHILD M., JEANSOULIN R., 1997, *Data quality in geographic information : From error to uncertainty*, Editions Hermès, Paris, 192 p.

GOVERS G., TAKKEN I., HELMING K., 2000, « Soil roughness and overland flow », *Agronomie*, n° 20, pp. 131-146, INRA, EDP Sciences.

GREENE R. G., CRUISE J. F., 1995, « Urban watershed modeling using GIS », *Journal of water ressources planning and management,* vol. 121, n°4, pp. 318-325.

GROSCLAUDE G., 1999, *L'eau, « Usages et polluants »,* T. 2, Inra Editions, Paris, 210 p.

GROUAZEL V., 2002, *Bocage et procédure d'aménagement rural dans le département du Morbihan, de la production des données vers une évaluation des actions*, DESS Méthodes quantitatives en gestion et aménagement de l'espace, Metz, 85 p.

GUELLEC A., 1979, « Les types de remembrements dans le centre Bretagne : exemples dans les Côtes-d'Armor », *Norois*, n°103, Juillet-septembre, pp. 401-407.

H

HEUVELINK G., 1998, *Error propagation in environmental modelling with GIS*, Londres, Taylor et Francis Ltd, 144 p.

HELLWERG F., 1997, *AGREE – DEM surface reconditioning system. Program instructions* http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html. Consulté en 2004.

HUET P., ROUSSEL P., MARTIN X., BOURGET B., VARRET J., GUELLEC J., MONADIER P., SAUZEY P., EYSSIER A., 2001, *Mission d'expertise sur les crues de décembre 2000 et janvier 2001 en Bretagne*, Ministères de l'Intérieur, de l'Equipement des transports et du logement, de l'Agriculture et de la Pêche, de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, Paris, 134 p.

I

IFEN, *La régression des milieux naturels*, n° 25, Avril/Mai 1996.

IFEN, 2002, *Chiffres clés 2002 de l'environnement*, 24 p. http://www.ifen.fr/chifcle/index.htm. Consulté en 2004.

IFEN, 2003, « L'artificialisation s'étend sur tout le territoire », n° 80, Janvier/Février, 4 p. http://www.ifen.fr/pages/depdf.htm. Consulté en 2004.

IVANOV I., VIVONI E., BRAS R., ENTEKHABI D., 2002, « Development of a Triangulated Irregular Network Model for Real-time, Continuous Hydrologic Forecasting », article proposé à la revue *Water Resources Research*.

J

JOANNON A., 2004, *Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise de processus écologiques, Cas du ruissellement érosif dans les bassins versants agricoles du Pays de Caux*, Haute-Normandie, Thèse de Doctorat de l'Institut National Agronomique de Paris Grignon, 231 p.

JEGAT R., 1996, *Les bocages en Centre Bretagne : conservation et aménagement*, DIREN.

JENSON S. K., 1991, « Applications of Hydrologic Information Automatically Extracted From Digital Elevation Models », *Hydrological Processes*, 5(1), pp. 31-44.

JENSON S. K., DOMINGUE J. O., 1998, Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis », *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (11), pp.1593-1600.

JONES J.A., GRANT G. E., 1996, « Peak flow responses to clearcutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon », *Water, Resources Research*, 32, pp. 959-974.

JOUIN A., 2003, « Histoire et évolution récente des haies et des bocages », pp. 33-42 in Baudry J. et Jouin A coord., *De la Haie aux bocages. Organisation, dynamiques et gestion*, INRA Editions, Paris, 435 p.

K

KADDOUR C., AISSA BRAHIM S., 1999, *Compression des images fixes par fractales basées sur la triangulation de Delaunay et quantification vectorielle*.

http://www.kaddour.com/index.htm. Consulté en 2005.

KELLER G., SHERAR J., 2003, *Low-volume roads engineering : Best Management Practices -Field Guide*, USDA Forest service.
http://ntl.bts.gov/lib/24000/24600/24650/Index_BMP_Field_Guide.htm. Consulté en décembre 2004.

KING C., DUBREUIL N., SOUCHERE V., LECOMTE V., BAGHDADI N., LE BISSONAIS Y., 2003, *Assimilation de données satellitaires pour la modélisation de risques de ruissellement : validation par l'exemple d'une crue éclair en Normandie*, JPRN-SIRNAT 2003, Orléans, 8 p.

KISS R., 2004, « Determination of drainage networkin digital elevationmodels, utilities and limitations », *Journal of hungarian geomathematics*, vol. 2, 14 p.
http://www.sci.u-szeged.hu/foldtan/geomatematikai_szakosztaly/JHG/default.htm. Consulté en 2005.

KREVELD M.V., 1997, « Digital elevation models : overview and selected TIN algoritms », in Van Kreveld, Nievergelt J., Roos T., Widmayer P. Eds, *Algorithmic Foundations of GIS*. Springer-Verlag, LNCS.

L

LAIME M., 2003, *Le dossier de l'eau : Pénurie, pollution, corruption*, Editions du Seuil, Paris, 402 p.

LANGLOIS P., 1994, « Formalisation des concepts topologiques en géomatique », *Revue internationale de géomatique*, vol. 4, n° 2,1994, pp. 181-205.

LANGLOIS P., DELAHAYE D., 2002, « RuiCells, Automate cellulaire pour la simulation de surface», *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 12, n°4, pp. 461-487.

LAURINI R., THOMPSON D., 1992, *Fundamentals of spatial information systems*, Academic Press, Toronto, 680 p.

LEA N. L.,1992, « An aspect driven kinematic routing algorithm », in *Overland Flow : Hydraulics and Erosion Mechanics*, Edited by A. J. Parsons and A. D. Abrahams, Chapman & Hall, New York, pp. 393-407.

LE BISSONNAIS Y., BENKHADRA H., CHAPLOT V, GALLIEN E., EIMBERCK M, FOX D ., MARTIN P., LIGNEAU L, OUVRY J.-F., 1996, « Genèse du ruissellement et de l'érosion diffuse des sols limoneux : analyse du transfert d'échelle du m² au versant », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n°3, pp. 51-64.

LE BISSONNAIS Y., THORETTE J., BARDET C., DAROUSSIN J., 2002, *L'érosion hydrique des sols en France*, Rapport, INRA, IFEN, 106 p. http://erosion.orleans.inra.fr/rapport2002/. Consulté en 2004.

LECOMTE V., 1999, *Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant : processus, déterminisme et modélisation spatiale*, Thèse de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts ENGREF, spécialité : sciences de l'eau, Paris, 242 p.

LE GALLIC M., GILLET M., 2002, *L'action Bretagne Eau Pure*.
http://assoc.wanadoo.fr/erb/colqP11.htm Consulté en 2004.

LEMERCIER B., 2003, *La pollution par les matières phosphorées en Bretagne : sources, transfert et moyens de lutte,* DIREN, Rapport de stage INRA de Rennes, 76 p.
http://www.bretagne.environnement.gouv.fr/. Consulté en novembre 2003.

LOUDEC J.-Y., 2000, *Bilan de l'activité agricole sur les bassins versants du Jaudy, du Guindy et du Bizien*, DDAF des Côtes-d'Armor, Syndicat intercommunal d'adduction d'eau du Trégor, Trélévern, 18p.

LUDWIG B., 1992, *L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin Parisien : analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire*, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, 155 p.

LUDWIG B., BOIFFIN J., CHADEEUF J., AUZET A.-V., 1995, « Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments », *Catena,* 25 (1995), pp. 227-252.

LUDWIG B., AUZET A.V., BOIFFIN J., PAPY F., KING D., CHADOEUF J., 1996, « Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigole de bassins versants cultivés du Nord de la France », *Etude et Gestion de Sols*, 3, 1, pp. 53-70.

M

MARK D. M., 1988, « Network models in geomorphology », in *Modelling in Geomorphological Systems*, édité par M. G. Anderson et J. Wiley., pp.73-97.

MARTIN Cl., 1996, « L'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle et d'un petit bassin versant après incendie de foret dans le Massif des Maures », *Etude et Gestion des Sols*, 3, 1996, pp. 179-192.

MARTIN C., 2003, *Mécanismes hydrologiques et hydrochimiques impliqués dans les variations saisonnières des teneurs en nitrate dans les bassins versants agricoles : Approche expérimentale et modélisation*, Thèse de Doctorat en Sciences de la terre, Université de Rennes 1, 252 p.

MARTIN P., LE BISSONNAIS., BENKHADRA H., LIGNEAU L., OUVRY J-F., 1997, « Mesures du ruissellement et de l'érosion diffuse engendrés par les pratiques culturales en Pays de Caux (Normandie) », *Géomorphologie Relief – Processus - Environnement*, n° 2, avril-juin, pp. 133-142.

MARTZ L. W., GARBRECHT J., 1992, « Numerical Definition of Drainage Network and Subcatchment Areas From Digital Elevation Models », *Computers and Geosciences*, 18(6), pp. 747-761.

MCALLISTER M., SNOEYINK J., 1999, *Extracting Consistent Watersheds From Digital River And Elevation Data*, ASPRS Annual Conference.
http://citeseer.ist.psu.edu/mcallister99extracting.html. Consulté en 2004.

MERCERON M. (coord.), 1999, *Actes du colloque Pollutions diffuses : du bassin versant au littoral*, Editions Ifremer , Ploufragan, 350 p.

MERRITT W. S., LETCHER R. A., JAKEMAN J., 2003, « A review of erosion and sediment transport models », *Environmental Modelling & Software*, Volume 18, Issues 8-9, October-November 2003, pp. 761-799

MEROT Ph., 1978, *Le bocage en Bretagne granitique : une approche de la circulation des eaux*, Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 196 p.

MEROT Ph., GASCUEL-ODOUX C., WALTER C., ZHANG X., MOLENAT J., « Influence du réseau de haies des paysages bocagers sur le cheminement de l'eau de surface », *Revue des sciences de l'eau*, 1999, 12/1, pp. 23-31.

MEYNIER A., 1967, *Les paysages agraires*, Armand Colin, Paris, 207 p.

MILLER B., BROWN L., TOLLNER E., FRANTI T., TIM U., 1997, « critical review of data from research on vegetative control systems », rencontre annuelle internationale de l'ASAE, ASAE, pp. 1-13.

MOLENAT J., 1999, *Rôle de la nappe sur les transferts d'eau et de nitrate dans un bassin versant agricole. Etude expérimentale et modélisation*, Thèse de Doctorat, Géosciences, Université de Rennes 1, 272 p.

MONNIER G., BOIFFIN J., PAPY F., 1986, « Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest », *Cahier de ORSTOM série Pédologie*, n° 22, pp. 123-131.

MONTGOMERY D. R., 1994, « Road surface drainage, channel initiation, and slope instability », *Water Resources Research*, n°30, pp. 1925-1932.

MOORE I. D., GRAYSON R.B., LADSON A.R., 1991, « Digital terrain modelling : a review of hydrological, geomorphological and biological », *Hydrological Processes*, vol. 5, pp. 3-30.

MORRIS D. G., HEERDEGEN R. G., 1988, « Automatically Drained Catchment Boundries and Channel Netowrks and their Hydrological Applications », *Geomophology*, 1, pp. 131-141.

MOUSSA R., VOLTZ M., ANDRIEUX P., 2002, « Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during foold events », *Hydrological Processes*, vol. 16, pp. 393-412.

N

NEBOIT R., 1983, *L'Homme et l'érosion*, Publication de la Faculté des Lettres de Clermont 2, 183 p.

O

O'CALLAGHAN J., MARK D., 1984, « The extraction of drainage networks from digital elevation data », *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, n°28, pp. 328-344.

P

PAPY F., BOIFFIN J., 1988, « Influence des systèmes de cultures sur le risque d'érosion par ruissellement concentré. Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles », *Agronomie,* 8 (9), pp. 745-756.

PAPY F., DOUYER C., 1991, « Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques », in *Agronomie*, 11, pp. 201-215.

PARENT C., SPACCAPIETRA S., ZIMANYI E., DONINI P., PLAZANET C., VANGENOT. C., ROGNON N., POULIOT J., CRAUSAZ. P. A., 1997, « MADS : un modèle conceptuel pour des applications spatio-temporelles », *Revue Internationale de Géomatique*, 7(3-4), pp. 317-352.

PAUWELS H., 1998, "Comportement de l'azote dans l'aquifère du bassin versant du Coët-Dan, pp. 209-221, in Cheverry C., *Agriculture intensive et qualité des eaux*, Inra Editions, Collection Science Update, Paris, 295 p.

PENVEN M-J., TATAIANA M., BARTOLI F., BONTE Ph., BRUNSTEIN D., COSANDEY C., GOUY V., IRACE S., LEVIANDIER Th., SOGNON S., 1998, « Petits bassins ruraux et pollutions diffuses », in *La Seine en son bassin, fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*, Meybeck M. *et al.* (dir.), Editions Elsevier, 747 p., pp. 159-210.

PERICHON S., 2003, *L'évolution des paysages d'arbres et de haies en Ille-et-Vilaine, histoire récente vue par trois générations d'agriculteurs*, Thèse de Doctorat ENGREF, 300 p.

PETZOLD I., GRÖGER G., PLÜMER., 2001, *Network planning using geomorphology*, Proceedings of the 9th ACM (Association for Computing Machinery) international symposium on Advances in geographic information systems, Atlanta, Georgie, USA, pp.167-172.

PIHAN J., 1976, « Bocage et érosion hydrique des sols en Bretagne », pp. 185-192, in *Les bocages*, table ronde CNRS, 586 p.

PUECH C., 1995, *Télédétection et modélisation hydrologique : quelle vision, quelle échelle, quels processus ?, Télédétection et Gestion des ressources en Eau*, Colloque FAO, Montpellier, http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/W7320B/w7320b32.htm. Consulté en 2004.

PUECH C., 2000, *Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes*, HDR, INPG, Grenoble, 83 p.

PUECH C., BAILLY J-S., 2003, Risques d'inondation et modélisation hydrologique : pièges de l'assimilation de paramètres issus de données spatiales. Colloque SIRNA, Journées pour la prévention des risques naturels, Orléans, 8 p. http://www.brgm.fr/divers/sirnatActesColl.htm. Consulté en 2004.

PURICELLI A., 2000, *Réingénierie et contrôle qualité des données en vue d'une migration technologique,* Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 263 p.

Q

QUINN P., BEVEN K., CHEVALLIER P., PLANCHON O., 1991, « The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling Using Digital Terrain Models », *Hydrological Processes*, 5, pp. 59-80.

R

RAMSEY P., 2004, *The state of open source GIS*, Refractions Research, 29 p.

RIEDO M., MOTTIER V., 2002, « Les langages orientés développement », in Mainguenaud M. dir., *Langages pour les SIG : Conception, développement et IHM*, Traité IGAT, série Géomatique, 266 p., pp. 71-89.

RIGAUX *et al.*, 2001, *Spatial Databases : With Application to Gis*, Morgan Kaufmann, 432 p.

ROBIN R., 1973, *Le remembrement rural dans le département du Morbihan et ses conséquences*, Thèse de Doctorat en géographie, Université de Rennes 2.

RODRIGUEZ F., 1999*, Intérêt des banques de données urbaines pour l'hydrologie : détermination des fonctions de transfert de bassins versants urbains*, Thèse de Doctorat de l'Institut polytechnique de Grenoble, 200 p.

ROGNAN L., GOZE S., PLANES J. G., 1998, *Triangulated Digital Elevation Model : definition of a new representation*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/commIV/commIV.htm. Consulté en janvier 2003.

ROUET P., 1991, *Les données dans les systèmes d'information géographique, Traité des nouvelles technologies, Edition Hermès,* Série Géographie assistée par ordinateur, Paris, 278 p.

ROUSSEAU P., 2001, *Evaluation de la politique de reconstitution du bocage dans les Côtes-d'Armor*, Mémoire de géographie, Université de Rennes 2, 107 p.

RUIZ L., VERTES F., BLONDEL X., JOURNET M., ALARD V., 2002, « Flux d'azote et qualité de l'eau », in Alard V., Bréranger C., Journet M, *A la recherche d'une agriculture durable, Etude de systèmes herbagers économes en Bretagne*, Inra Editions, Collection Espaces Ruraux, Paris, 340 p., pp. 273-282.

S

SALOUM S., 2003, *Inventaire des zones humides du Bassin versant du Jaudy Guindy Bizien, utilisation d'images satellites*, Rapport pour le Bassin versant du JGB, 134 p.

SANTILLI S., HODGSON C., RAMSEY P., LOUNSBURY J., BLASBY D. *et al.*, 2000*, Manuel POSTGIS*, 67 p. http://postgis.refractions.net/docs/postgis.pdf. Consulté en 2004.

SAUQUET E., 2000, *Une cartographie des écoulements annuels*, Thèse du Cemagref, Lyon, 356 p.

SEBBAB H., 2000, *Application des S.I.G. à l'étude de l'impact de la voirie et des structures linéaires sur l'écoulement et l'érosion hydrique des sols viticoles de Champagne*, Thèse de Doctorat, Université de Rennes 2, 302 p.

SHORTRIDGE A. M., CLARKE K. C., 1999, « On some limitations of square raster cell structures for digital elevation modeling », in Lowell K., Jaton A., *Spatial Accuracy Assessment : Land Information Uncertainty in Natural Resources*, Ann Arbor, Sleeping Bear Press, Michigan, pp. 341-347.

SOLTNER D., 1973, *L'arbre et la haie pour la production agricole, pour l'équilibre écologique, et le cadre de vie rurale*, Sciences et Techniques agricoles, Ste Gemmes-sur-Loire, 208 p.

SOUCHERE V., 1995, *Modélisation spatiale du ruissellement à des fins d'aménagement contre l'érosion de talweg –Application à des petits bassins versants en Pays de Caux (Haute-Normandie)*, Thèse INAPG, Paris, 197 p.

SOUCHERE V., KING D., DAROUSSIN J., PAPY F., CAPILLON A., 1998, « Effects of tillage on runoff directions : consequences on runoff contributing area within agricultural catchments », *Journal of Hydrology*, n°206, pp. 256-267.

SOUCHERE V., KING D., DUBREUIL N., LECOMTE-MOREL V., LE BISSONNAIS Y., CHALAT M., 2003, « Grassland and crop trends : role of the European Union Common Agricultural Policy and consequences for runoff and soil erosion », *Environmental Science and Policy*, n°6, pp. 7-16.

STORCK P., BOWLING L, WETHERBEE P., LETTENMAIER D., 1998, « Application of a GIS-based distributed hydrology model for prediction of forest harvest effects on peak streamflow in the Pacific Northwest », *Hydrological Processes*, vol. 12 (6), pp. 889-904.

SUN G., MCNULTY S., 1998, « Modeling soil erosion and transport on forest landscape », in *Winning solutions for risky problems*. Proceedings of conference 29, 1998 February 16-20; Reno, NV. Steamboat Springs, CO: International Erosion Control Association, pp. 189-198.
http://www.srs.fs.usda.gov/pubs/viewpub.jsp?index=902. Consulté en 2004.

T

TABORTON D., 1997, « A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models », *Water Resources Research*, n°33, pp. 309-319.

TAKKEN I., BEUSELINCK L., NACHTERGAELE J., GOVERS G., POESEN J., DEGRAER G., 1999a, « Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM) », *Catena*, n°37, pp. 431-447.

TAKKEN I., 1999b, *Modelling the effect of tillage-induced roughness on runoff patterns, PC-Raster scripts and User Manual*, Laboratory for Experimental Geomorphology, K.U.Leuven, 13 p.

TAKKEN I., JETTEN V., GOVERS G., NACHTERGAELE J., STEEGEN A., 2001a, « The effect of tillage-induced roughness on runoff and erosion patterns », *Geomorphology*, 37, pp. 1-14.

TAKKEN I., GOVERS G., STEEGEN A., NACHTERGAELE J., GUÉRIF J., 2001b., « The prediction of runoff flow directions on tilled fields », *Journal of Hydrology*, 248, pp. 1-13.

THIBAULT D., GOLD C., 2000, « Terrain Reconstruction from Contours by Skeleton Construction », *Geoinformatica*, vol. 4, pp. 349-373, Kluwer Academic Publishers, Hingham, USA.
http://portal.acm.org/citation.cfm?id=594808.

TORTRAT F., AUROUSSEAU P., SQUIVIDANT H., GASCUEL-ODOUX C., CORDIER M-O., 2004, *Modèle Numérique d'Altitude (MNA) et spatialisation des transferts de surface : utilisation de structures d'arbres reliant les exutoires de parcelles et leurs surfaces contributives.*
http://www.irisa.fr/dream/SACADEAU/publications.htm. Consulté en 2005.

TRISTAN A., LEBOT M., 1995, *Au-delà des haies, visite aux paysans de l'Ouest*, éditions Descartes & Cie, Collection « Les Passeurs de frontières », 161 p.

TUCKER G., LANCASTER S., GASPARINI N., BRAS R., RYBARCZYK S., 2001, « An object-oriented framework for distributed hydrologic and geomorphic modeling using triangulated irregular networks », *Computers & Geosciences*, 27, pp. 959–973.

U

UBEDA T., 1997, *Contrôle de la qualité spatiale des bases de données géographiques. Cohérence topologique et corrections d'erreurs*, Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 204 p. http://docinsa.insa-lyon.fr/these/pont.php?id=ubeda. Consulté en 2004.

V

VAN OOST K., GOVERS G., VAN MUYSEN W., NACHTERGAELE J., 2003, « Modelling Water and Tillage Erosion using Spatially Distributed Models », pp. 101-122, in *Long Term Hillslope and Fluvial System Modelling. Concepts and Case Studies from the Rhine River Catchment*, Lecture notes in Earth Sciences, vol.101, 246 p.

VAN ROMPAEY A., BAZZOFFI P., DOSTAL T., VERSTRAETEN G., JORDAN G., LENHART T., GOVERS G., MONTANARELLA L., 2003, « Modeling off-farm consequences of soil erosion in various landscapes in Europe with a spatially distributed approach », OECD expert meeting on soil erosion and soil biodiversity indicators, 25-28 mars 2003, Rome, 18 p.
http://webdomino1.oecd.org/comnet/agr/soil_ero_bio.nsf/. Consulté en décembre 2004.

VIAUD V., *Organisation spatiale des paysages bocagers et flux d'eau et de nutriments,* Thèse de Doctorat, ENSAR, 281 p.

VIVONI E.-R.,. IVANOV V.-Y., BRAS R. L., ENTEKHABI D, 2004, « Generation of Triangulated Irregular Networks Based on Hydrological Similarity », *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 9, n° 4, pp. 288-302.

W

WATSON D.F., PHILIP G.M., 1984, « Systematic triangulations », *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, n° 26, pp. 217-223.

WEIBEL R., HELLER M., 1991, « Digital terrain modelling », in Longley P., Goodschild M., Maguire D., Rhind D., *Geographic Information Systems and Science,* 447 p., pp. 269-297.
http://www.wiley.com/legacy/wileychi/gis/volumes.html. Consulté en 2005.

WEMPLE B. C., JONES J., A., GRANT G. E., 1996, « Channel network extension by logging roads in two basins, western cascades, Oregon », *Water Resources Research*, n°32, pp. 1195-1207.

WEMPLE B.C, SWANSON F.J, JONES J.A., 2001, « Forest roads and geomorphic process interactions, cascade range, Oregon », *Earth Surface Processes and Landforms*, n°26, pp. 191-204.

WINTER S., 1998, « Bridging Vector and Raster Representation in GIS », inLaurini R., Makki R., Pissinou N. (Eds.), *Proceedings of the 6th Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, Washington, D.C., ACM Press, pp. 57-62.

WOOD J., 1996, *The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models*, Thèse de Doctorat, http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd/. Consulté en 2004.

Y

YU S., VAN KREVELD M., SNOEYINK J., 1996, *Drainage Queries in TINs : From local to global and back again,* in Proc. 7th Int. Symp. on Spatial Data Handling, pp.13A.1-13A.14. http://citeseer.ist.psu.edu/yu96drainage.html. Consulté en 2004.

Z

ZEILER M., 1999*, Modeling our world, The ESRI Guide to Geodatabase Design*, Esri Press, 199 p.

ZEILER M., 2001*, Exploring ArcObjects*, deux volumes, Esri Press, 1414 p.

ZHANG X., 1995, *Development of drainage network and study of hedgerow network*, INRA de Rennes, 23 p.

ZHU H., SCHNEIDER K., 1999, « Flat Feature Processes from Triangulated Irregular Networks for Hydrological Modeling, » *Geocomputation*. http://www.geovista.psu.edu/sites/geocomp99/Gc99/091/gc_091.htm. Consulté en 2004.

TABLE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1. Surfaces aménagées cumulées par département entre 1950 et 1975 ..... *18*
Figure 2. Rectification d'un cours d'eau dans le département du Morbihan suite à une opération foncière *19*
Figure 3. Conséquences d'une opération de remembrement sur la commune de Guenin dans le Morbihan. *20*
Figure 4. Tas de souches dans la région de Kernascleden *21*
Figure 5. Carte des communes reconnues inondées entre le 17 et le 31 janvier 1995 ..... *24*
Figure 6. Linéaire de haies plantées depuis 1995 dans le cadre des programmes bocagers départementaux *25*
Figure 7. Linéaire de talus construits depuis 1995 dans le cadre des programmes bocagers départementaux *25*
Figure 8. Evolution des concentrations moyennes en nitrates dans les eaux superficielles depuis 1971 en Bretagne *30*
Figure 9. Evolution des concentrations en nitrate dans les cours d'eau bretons *31*
Figure 10. Statistiques communales des teneurs en phosphore Dyer des sols cultivés de 1990 à 1995 .... *33*
Figure 11. Qualité des cours d'eau bretons pour la période 1997-1999 pour les matières phosphorées . *34*
Figure 12. Schéma général de fonctionnement de l'opération de Bassin versant *40*
Figure 13. Localisation du Bassin versant du Léguer *43*

Chapitre 2

Figure 14. Evolution du parcellaire dans le village rural de Cista *57*
Figure 15. Evolution de l'occupation du sol et des exports de sédiments sur le bassin versant de Kvetonov en Kamenice *58*
Figure 16. A gauche réseau d'érosion influencé par le sens de travail du sol, à droite réseau d'érosion uniquement dirigé par la pente. *60*
Figure 17. Organisation des écoulements de surface sur une parcelle cultivée en fonction de la topographie et de la rugosité du sol *60*
Figure 18. Représentation schématique des directions d'écoulements observées *63*
Figure 19. Exemples de profils transversaux *65*
Figure 20. Exemples profils longitudinaux *65*
Figure 21. Déformation du profil topographique du versant induite par le terrassement de la voirie *66*
Figure 22. Impact des routes sur les écoulements de surface *67*
Figure 23. Fonctionnement hydrologique d'un fossé *68*
Figure 24. A gauche un talus-nu à droite un réseau de talus-nus *69*

Figure 25. Accumulation d'eau et de sédiments dans une parcelle d'artichauts en amont d'un talus..... 69
Figure 26. Barrière végétale aux USA..... 72
Figure 27. Topographie du versant de l'Iowa et répartition des haies de panic érigé..... 73

Chapitre 3

Figure 28. Le modèle de données raster..... 81
Figure 29. Direction de drainage..... 82
Figure 30. Méthode de calcul des variables pour l'extraction du réseau de drainage 82
Figure 31. Phénomène de « dérive » des lignes de drainage avec la méthode de la descente maximale.. 83
Figure 32. Calcul des directions d'écoulement à partir de la méthode Rho8, ... 84
Figure 33. Schématisation de la répartition du flux sur les cellules en aval selon la méthode multidirectionnelle..... 84
Figure 34. Répartition du flux selon la méthode DEMON 85
Figure 35. Modèle Numérique de Terrain de référence 86
Figure 36. Grille d'accumulation ou surface drainée par les pixels du MNT..... 86
Figure 37. Calcul des directions d'écoulement selon la méthode Dinf 87
Figure 38. Représentation d'une structure triangulaire..... 88
Figure 39. Schéma de construction de la triangulation..... 88
Figure 40. Exemple d'une structure de données TIN 89
Figure 41. Géométries du TIN et formes du relief..... 90
Figure 42. Définition des arcs du TIN d'après Yu et al. (1996) 90
Figure 43. Simulation théorique de la trajectoire de l'eau sur un TIN 91
Figure 44. Données d'entrée : à gauche le MNT raster, à droite les routes. 94
Figure 45. Extrait de rasterisation de la voirie : à gauche algorithme utilisé par ArcView à droite algorithme utilisé par Idrisi..... 95
Figure 46. Grille d'accumulation « décaissée »: à gauche avec ArcGIS, à droite avec Idrisi..... 96
Figure 47. Direction des pentes selon la méthode D8 calculé sur les MNT creusés à gauche avec ArcGIS, à droite avec Idrisi..... 96
Figure 48. Grille d'accumulation « rehaussée » : à gauche avec ArcGIS, à droite avec Idrisi..... 96
Figure 49. Direction des pentes selon la méthode D8 calculé sur les MNT rehaussés 97
Figure 50. Le problème de l'intégration de plusieurs sources de données dans le MNT..... 97
Figure 51. Exemples d'adaptation morphologique des pixels haies..... 98
Figure 52. (a) Données intégrées à la triangulation : courbes de niveau, lignes caractéristiques du relief, aire urbaine et localisation potentielle d'un talus de protection, (b) triangulation contrainte, localisation de la zone urbaine et couloirs d'avalanche, (c) simulation des couloirs d'avalanche après intégration du talus de protection 99
Figure 53. à gauche une triangulation de Delaunay sans talus, à droite une triangulation contrainte par les talus..... 99
Figure 54. Calcul de l'arbre de drainage..... 100

Figure 55. Décomposition des talus en segments : à droite l'entité talus avant la triangulation, à gauche les segments après la triangulation *100*
Figure 56. Exemple de franchissement de direction *103*
Figure 57. Situations de franchissements et corrections des directions apportées par TCRP (a) et (b) . *104*
Figure 58. Grilles des directions de travail du sol *104*
Figure 59. Sélection des pixels pour l'adaptation de la grille de direction du travail du sol *105*
Figure 60. Schématisation de l'effet du couple route-fossé sur les écoulements de surface *107*
Figure 61. Règle logique appliquée pour la suppression des pixels de dépression « unique » *108*
Figure 62. Schématisation des conditions de rupture *108*
Figure 63. Schématisation de la procédure de comblement des dépressions *108*
Figure 64. Impact des routes sur les écoulements de surface (a) : grille d'accumulation topographique, (b) et (c) grilles d'accumulation calculées avec RIDEM. *109*
Figure 65. Modification du réseau de drainage par les haies *112*
Figure 66. Etapes de production d'un arbre de drainage « parcelle » *113*

Chapitre 4

Figure 67. Localisation du sous-bassin versant du Sterenn *117*
Figure 68. Concentration en nitrate des cours d'eau du Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien. *120*
Figure 69. Concentration en triazines des cours d'eau du Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien. *121*
Figure 70. Les grandes zones agricoles sur le Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien *125*
Figure 71. Répartition des pentes sur le Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien *126*
Figure 72. Le linéaire bocager sur le Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien *127*
Figure 73. Occupation du sol sur le sous-bassin versant du Sterenn : printemps-été 2000 ..... *128*
Figure 74. A gauche, un chemin creux bordé de talus surmonté de haies, à droite une route communale bordée de talus surmontée d'une haie et de fossé enherbé *129*
Figure 75. Le réseau de drainage naturel et le réseau de drainage anthropique sur le sous-bassin versant du Sterenn *130*
Figure 76. Un talus-nu ceinturant une prairie *131*
Figure 77. Distribution spatiale des réseaux élémentaires de talus sur le sous-bassin versant du Sterenn *132*
Figure 78. Localisation des entrées de champs et des brèches sur le sous-bassin versant du Sterenn ... *133*
Figure 79. Ancienne entrée de champ sur le sous-bassin versant du Sterenn *134*
Figure 80. Entrée de champ utilisée donnant sur un fossé de voirie : *134*
Figure 81. Brèche dans un talus pour l'évacuation des eaux : sous-bassin versant du Sterenn *134*
Figure 82. Le bocage et les zones tampons sur le sous-bassin versant du Sterenn *136*
Figure 83. Exemple de ruissellement sur une parcelle de blé pendant l'hiver 2004 ..... *137*
Figure 84. Parcelle de moutarde, hiver 2004 ..... *138*
Figure 85. Les effets des pratiques culturales sur le ruissellement de surface et l'érosion du sol : sous-bassin versant du Sterenn, janvier 2004 ..... *141*

Figure 86. Accumulation d'eau au pied d'un talus sur le sous-bassin versant du Sterenn *142*
Figure 87. Accumulation sédimentaire au pied d'un talus dans leTrégor..... *142*
Figure 88. Schématisation de la dynamique de connexion des dépressions le long d'un talus « barrage » *142*
Figure 89. Exemple d'un effet de seuil observé en amont d'un talus sur le Sterenn *142*
Figure 90. Exportation des écoulements de surface d'une parcelle cultivée..... *143*
Figure 91. Rupture puis débordement de terre d'une parcelle cultivée sur la voirie *144*
Figure 92. Canalisation et circulation des écoulements de surface sur la voirie *144*
Figure 93. Détournement des écoulements de surface par un chemin *144*
Figure 94. Détournement des écoulements de surface par un talus *144*
Figure 95. Capture du ruissellement par une dérayure..... *145*
Figure 96. Accumulation en amont d'un nouveau talus *146*
Figure 97. Schématisation de la dynamique des écoulements à partir des dépressions..... *148*

Chapitre 5

Figure 98. Exemple d'un résultat d'une triangulation contrainte :..... *154*
Figure 99. Qualification morphologique d'un arc talus *155*
Figure 100. Cellules d'un TIN topographique et vecteur de plus grande pente..... *156*
Figure 101. Qualification morphologique des arcs du TIN..... *157*
Figure 102. Représentation d'un graphe de cellules construit à partir d'un TIN contraint..... *157*
Figure 103. Exemples de répartition du flux *159*
Figure 104. Répartition du flux sur plusieurs faces..... *159*
Figure 105. Connexion entre deux arcs talwegs..... *160*
Figure 106. Identification des arcs communs parcelle-voirie après intégration de la couche parcellaire dans le TIN..... *163*
Figure 107. Echanges entre la route et le parcellaire *163*
Figure 108. Le TIN contraint..... *165*
Figure 109. Recherche des exutoires de bassin dans un TIN contraint..... *166*
Figure 110. Définition des bassins d'alimentation..... *166*
Figure 111. Deuxième itération de l'automate *166*
Figure 112. Énième itération de l'automate..... *167*
Figure 113. Schéma de modélisation théorique adopté pour intégrer les éléments anthropiques dans la modélisation des écoulements de surface à partir d'un MNT TIN..... *168*
Figure 114. Conséquences de la géométrie des objets sur une triangulation..... *171*
Figure 116. Exemple d'incohérence géométrique entre deux polygones et corrections possibles *173*
Figure 117. Le modèle topologique unique *174*
Figure 118. Exemple de stockage de l'information topologique dans le MTH..... *176*
Figure 119. Modèle conceptuel de données du MTH *178*
Figure 120. Schéma conceptuel global des modèles de donnés utilisés pour la modélisation *180*

Chapitre 6

Figure 121. Schématisation de l'opération d'appariement vertical géométrique et sémantique 186
Figure 122. Exemples de triangulation réalisée avec la librairie GTS : à gauche une triangulation régulière, à droite des triangulations contraintes à différentes résolutions (raffinement) 187
Figure 123. Schéma des principales étapes de la triangulation 188
Figure 124. A gauche une triangulation à partir des points des courbes, ... 189
Figure 125. Calcul des skeletons à partir des courbes de niveau 190
Figure 126. La méthode « Valley lenght » d'après Gold et Dakowicz, 2002 191
Figure 127. Exemple de branche complexe et détails des étapes de parcours pour le calcul des distances 192
Figure 128. Sélection d'un parcours de référence pour l'interpolation des valeurs des points sommets communs à au moins deux parcours 193
Figure 129. Résultat de l'interpolation des altitudes des points de la branche skeleton selon la méthode 193
Figure 130. Représentation d'une courbe de niveau fermée et de son skeleton 194
Figure 131. Branche de skeleton en position de talweg 195
Figure 132. Schématisation de la méthode de fermeture de la courbe talweg 195
Figure 133. Branche de skeleton en continuité avec la pente 197
Figure 134. Branche de skeleton en position de sommet 197
Figure 135. A gauche un fichier de courbes cohérent, à droite un fichier avec des courbes problématiques 198
Figure 136. Extraction et intégration des branches de skeleton dans la triangulation 199
Figure 137. Représentation en 2D $_{1/2}$ du TIN standard 200
Figure 138. Représentation en 2D $_{1/2}$ du TIN amélioré 200
Figure 139. Exemple de branche de skeleton déficiente 200
Figure 140. Donnée de départ 204
Figure 141. Méthode d'interpolation des axes de drainage naturel 204
Figure 142. Exemple d'un axe de drainage décalé et de ses conséquences sur le TIN 205
Figure 143. Répartition du flux sortant de la cellule A selon la ligne de plus grande pente 210
Figure 144. Principe de connexion entre cellules surfaciques. La valeur de p indique la part de flux transmise de la cellule en amont de la connexion vers la cellule en aval. 210
Figure 145. Le graphe de cellules. Cadre A : données de départ ; cadre B : la structure objet 211
Figure 146. Représentation graphique du graphe de cellules 212
Figure 147. Résultat d'application de la méthode RuiCells pour la re-connexion d'une zone horizontale 213
Figure 148. Représentation d'une cuvette topographique (rond bleu) et des cellules contributives 215
Figure 149. La couronne de la zone cuvette 215
Figure 150. La re-connexion d'une cuvette topographique 216
Figure 151. A gauche, le graphe de cellules sans re-connexion de la cuvette topographique, à droite avec re-connexion 216

Figure 152. Schématisation d'une configuration bocagère efficace *218*
Figure 153. Façades définies par la convergence de 3 arcs obstacles et cellules associées..... *219*
Figure 154. Représentation des cuvettes artificielles *221*
Figure 155. Effet de la prise en compte des arcs obstacles sur le graphe de cellules. A gauche sans prise en compte des obstacles, à droite avec prise en compte des obstacles *221*
Figure 156. Données de départ *223*
Figure 157. Résultat de la connexion des cuvettes artificielles selon la méthode de Duke et al (2003).. *223*
Figure 158. Effet de l'intégration des axes de drainage sur la connexion des cellules : A avant prise en compte des arcs collecteurs, B après prise en compte..... *225*
Figure 159. Déconnexion d'un arc collecteur..... *226*
Figure 160. Le problème de débordement en amont des obstacles. *229*
Figure 161. Résultat avec le graphe de bassins paramétré..... *230*
Figure 162. Schéma récapitulatif des grandes étapes de la modélisation..... *232*

Chapitre 7

Figure 163. Méthode de production par traitements spatiaux des polygones représentant la voirie..... *236*
Figure 164. Le modèle physique de la base de données du Sterenn..... *237*
Figure 165. La distribution spatiale des orientations de versants selon le type de TIN..... *239*
Figure 166. Distribution statistique des orientations des faces des TIN en pourcentage par rapport à leur superficie totale *239*
Figure 167. Cumul journalier des précipitations pour le mois d'avril...... *243*
Figure 168. Localisation des sites pour le calage du modèle *248*
Figure 169. Observation et modélisation des points de stockage sur le site A..... *249*
Figure 170. Observation et modélisation des points de stockage sur le site B..... *250*
Figure 171. Observation et modélisation des points de stockage sur le site C..... *251*
Figure 172. Observation et modélisation des points de stockage sur le site D..... *252*
Figure 173. Influence du paramètre H_{mr} dans la connexion des cuvettes artificielles pour la totalité du Sterenn..... *253*
Figure 174. Bassin d'alimentation contraint connecté et non-connecté calculé en intégrant uniquement les talus et les axes de drainage naturel..... *257*
Figure 175. Bassin d'alimentation contraint connecté et non-connecté calculé en intégrant l'ensemble des aménagements linéaires (simulation C) *258*
Figure 176. Différence des aires d'alimentation connectée au cours d'eau en fonction de l'exutoire de définition..... *259*
Figure 177. Cartographie des bassins d'alimentation contraint et des superficies cumulées sur le sous-bassin versant du Goasguden *263*
Figure 178. Concentration linéaire des écoulements de surface sur une parcelle..... *264*
Figure 179. Le blocage des écoulements de surface dans une parcelle par un talus *265*
Figure 180. La déviation des écoulements de surface par un talus..... *266*
Figure 181. Proposition d'aménagement et conséquences théoriques sur les écoulements de surface .. *266*

Figure 182. Connexion des écoulements de surface avec la voirie et le cours d'eau *267*
Figure 183. Exportation des écoulements par les aménagements linéaires *268*
Figure 184. Importation et exportation des écoulements de surface entre unités hydrologiques *269*
Figure 185. Système en relais des écoulements de surface *271*
Figure 186. Exemple de qualification « bloquant » « passant » *273*
Figure 187. Le bassin d'alimentation connecté et non connecté au cours d'eau pour le sous-bassin versant du Goasguden *276*
Figure 188. Surfaçogrammes calculés à l'exutoire des sous-bassins versants du Planconiat (a), du Goasguden (b) et du Goazelarc'h (c) *277*
Figure 189. Le problème des surfaces cumulées dans l'automate cellulaire *279*
Figure 190. TIN théoriques utilisés pour représenter l'impact de la structure géométrique dans le calcul du surfacogramme *280*
Figure 191. Surfacogrammes calculés pour l'exutoire du TIN (a) et du TIN (b) *281*
Figure 192. Extrait du maillage sur le TIN contraint *281*

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1. Tables des valeurs de l'indicateur de rang SIRIS *41*
Tableau 2. Exemple de travaux réalisés sur le sous-bassin versant du Kervulu *45*
Tableau 3. Données (linéaire, surface et effectif) des travaux tous types confondus *46*
Tableau 4. Gradient de la rugosité de surface du sol *60*
Tableau 5. Caractéristiques des bassins versants *70*
Tableau 6. Pourcentage de surface déconnectée par bassin versant *71*
Tableau 7. Distances minimales entre les rangées de haies placées selon les courbes de niveau *72*
Tableau 8. Exemple d'encodage des directions et azimut correspondant *82*
Tableau 9. Principales méthodes de calcul des directions d'écoulement sur un MNT raster *83*
Tableau 10. La qualification morphologique des arcs d'un TIN selon Langlois et Delahaye (2002) *92*
Tableau 11. Liste des grilles rasters utilisées par TCRP (a) et (b) *102*
Tableau 12. Typologie des exutoires et des aires contributives *110*
Tableau 13. Données géographiques utilisées pour produire la grille de direction des écoulements modifiée selon la méthode Tortrat *111*
Tableau 14. Longueur des axes de circulation de l'eau *129*
Tableau 15. Caractéristiques du bocage sur le sous-bassin versant du Sterenn *131*
Tableau 16. Calendrier de culture pour les choux-fleurs *139*
Tableau 17. Type et nature des données thématiques prises en compte dans la modélisation *153*
Tableau 18. Les attributs sémantiques pour la modélisation *170*
Tableau 19. Règles de correspondance topologique pour l'intégration des données dans le MTPU *175*
Tableau 20. Opérations spatiales sur une seule couche. *184*
Tableau 21. Opérations spatiales entre couches *185*
Tableau 22. Les effets de l'algorithme de lissage de Douglas-Peucker sur des branches de skeleton *201*
Tableau 23. Extraction des branches de skeleton après densification *202*
Tableau 24. Les étapes d'élimination des recoupements de pente *206*
Tableau 25. Le problème des recoupements de pente connexes (tronçons plats) *207*
Tableau 26. Représentation des étapes de recherche des cuvettes anthropiques *220*
Tableau 27. Moyenne et écart type des variables pente et orientation des TIN *238*
Tableau 28. Recomposition de la saison culturale 2002-2003 ..... *240*
Tableau 29. Occupation du sol et coefficient de ruissellement pour chaque scénario *241*
Tableau 30. Paramètres utilisés pour les simulations A et B avec HydroTIN *254*
Tableau 31. Caractéristiques des réseaux linéaires sur le sous-bassin versant du Sterenn *255*
Tableau 32. Pourcentage de surface connectée et non-connectée pour l'ensemble du sous-bassin versant du Sterenn *255*
Tableau 33. Pourcentage de surface connectée pour les principaux sous-bassins versants du Sterenn selon la simulation B *260*
Tableau 34. Statistiques sur les linéaires et densités des aménagements anthropiques pour les principaux sous-bassins versants du Sterenn *261*
Tableau 35. Superficie cumulée selon les différents points de connexion de la figure 185 ..... *271*
Tableau 36. Statistiques sur les surfaces cumulées à l'exutoire des sous-bassins versants *275*
Tableau 37. Surface théorique cumulée à l'exutoire du sous-bassin versant du Goasguden en fonction des cultures présentes dans le bassin d'alimentation connecté au cours d'eau *276*

ANNEXES