

Organisation spatiale des systèmes bocagers et parcours des écoulements de surface

Erwan BOCHER, Marie-Josée PENVEN, Olivier BEDEL

Depuis cinquante ans, le paysage rural breton s'est modifié sous l'effet du développement de l'agriculture intensive qui a entraîné une profonde réorganisation des structures bocagères. Canévet et Lebahy (1994) remarquent qu'en l'espace de quarante ans en Bretagne, environ 65 % de la surface agricole a fait l'objet d'un aménagement foncier, réduisant par exemple de 40 % le linéaire bocager dans les départements du Morbihan et des Côtes-d'Armor. Dans ce dernier, en 1961, la densité de linéaire boisé était d'environ 320 m/ha, en 1982 elle n'était plus que de 70 m/ha (Danais, 1987). Une ouverture du paysage s'en est suivie avec une augmentation de la superficie des parcelles qui permet de nouvelles pratiques agricoles, notamment la mécanisation avec des engins de plus en plus puissants, le développement de nouvelles cultures (comme le maïs par exemple). À ce nouveau découpage de l'espace, s'associe un nouveau réseau de voirie augmentant les surfaces imperméabilisées.

Après une phase de programmes de re-bocagement (début des années 1970-milieu des années 1990) à caractère essentiellement paysager, ce n'est que récemment que le talus a été reconnu, par les acteurs territoriaux, comme pouvant participer au dispositif permettant la réduction des transferts rapides des flux de surface de la parcelle agricole vers le cours d'eau, et donc limiter la diffusion des polluants. Cependant les opérations de (re)construction des talus restent inégalement développées même si le linéaire reconstruit est significatif en certains points du territoire comme dans les trois bassins versants des Léguer, du Jaudy-Guindy-Bizien et du Leff, où la totalité du linéaire de talus construit en 2002 équivaut à celle de l'ensemble du département¹. 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.

La destruction des linéaires bocagers a provoqué une modification profonde du fonctionnement du milieu, mise en évidence, dès le milieu des années 1970, par les travaux de l'INRA et de l'université Rennes 2 ainsi que par ceux de Soltner (1973). L'agrandissement du parcellaire et la mise en œuvre de nouveaux systèmes de culture (abandon des prairies, introduction de cultures de printemps...) ont

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

mis à jour de grands impluviums (une parcelle de culture sur un versant par exemple), aires génératrices du ruissellement. Ce dernier est à l'origine d'un décapage plus ou moins grave des sols et d'une exportation de polluants aussi bien organiques que chimiques en direction des cours d'eau. Cependant, dans des espaces aussi cloisonnés que des bassins versants bocagers où les linéaires subsistent en quantité variable, le transfert des flux hydriques depuis la parcelle de culture jusqu'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.

Notre objectif est de mettre en évidence les enchaînements des processus d'écoulement et d'identifier les chemins de l'eau à l'échelle du bassin versant, en tenant compte de l'ensemble des contraintes naturelles ou d'origine anthropique. Une telle analyse a pour dessein de mieux cerner les conditions efficaces pour un ralentissement ou une réduction des exportations des flux en provenance des parcelles et des apports hydriques directs au cours d'eau. Il s'agira, en utilisant un modèle distribué intégré à un Système d'Information Géographique (SIG), appliqué à trois petits bassins versants test de densité bocagère différente situés dans les Côtes-d'Armor, de cerner le cheminement potentiel des eaux, les conditions d'efficacité du linéaire (connexion, déconnexion) et les aires d'alimentation potentielle des cours d'eau et donc également les aires sensibles à l'érosion.

De l'observation à l'échelle parcellaire à la modélisation spatiale

Les phénomènes de ruissellement généralisé dans les bassins versants bretons ne sont sans doute pas chose courante mais ils peuvent se produire soit lors des épisodes orageux de l'été soit, en saison humide et fraîche, lors d'abats d'eau à forte intensité ou lors de précipitations se produisant alors que les sols sont déjà saturés. L'observation de ce type d'événement sur le bassin versant du Sterenn (sous-bassin du Jaudy-Guindy situé au nord-ouest des Côtes-d'Armor, fig. 1) a contribué à l'élaboration du modèle dont l'application à trois petits bassins versants, a permis sa validation après le retour au terrain.

Le bassin du Sterenn : un bocage hétérogène

Le sous bassin versant du Sterenn s'étend sur une superficie de 1 400 ha, dominée à 80 % par l'agriculture. Son cours d'eau principal, 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 (fig. 1). Le réseau de drainage naturel (25,2 km) est secondé par un réseau de drainage anthropique (127,2 km) constituant une armature dense et complexe de fossés (69,2 km), de chemins (17 km) et de routes (41 km). Cette armature représente une densité de 90 m/ha.

Le maillage bocager, hétérogène, est essentiellement caractérisé par des talus d'une hauteur moyenne de 1,3 m, pouvant parfois atteindre 2 m (fig. 2). La densité bocagère moyenne sur le bassin du Sterenn (haies et talus confondus) est

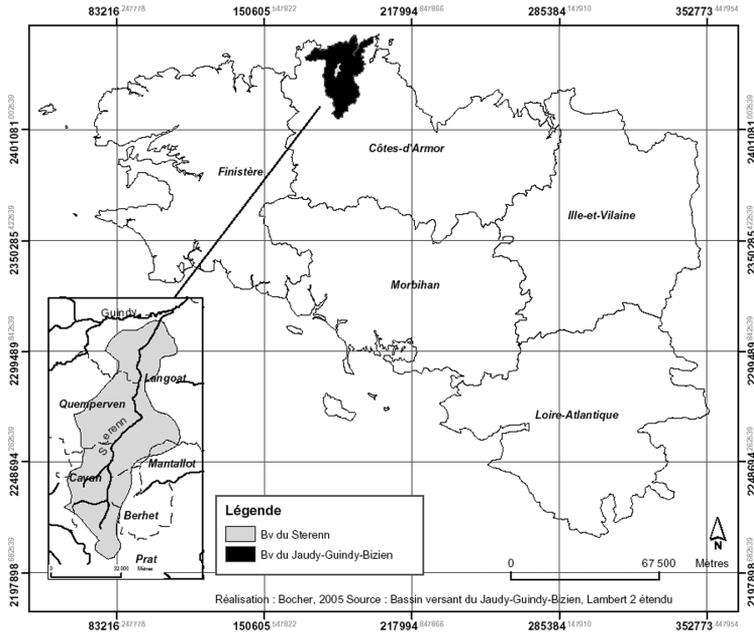


Figure 1 : Localisation du sous-bassin versant du Sterenn



Source: BV du Jaudy-Guindy-Bizien (22), 2003

Figure 2: Talus-nus
À gauche un talus-nu
Ci-dessous un réseau de talus-nus



Source: Gestin, 2004, Pays du Trégor (22)

relativement faible : 80 m/ha mais la répartition est irrégulière. Le linéaire de talus est discontinu, fragmenté en une multitude de réseaux élémentaires constitués de un ou plusieurs segments de talus, 632 au total. 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. Quatre unités paysagères se dégagent (Bocher, 2003) :

- au sud-est, un bocage ancien avec des parcelles de petite taille entourée par des talus,
- au nord-est et au Sud-est du bourg de Quempervern : un bocage de transition,
- dans la partie centrale et au nord, un bocage dégradé à large mailles
- au Sud, un bocage dominé par les bois.

Cette disparité paysagère fait du Sterenn un terrain privilégié pour l'étude de l'influence des éléments linéaires sur les écoulements de surface et ce d'autant plus que le caractère limoneux des sols les rendent sensibles à la battance et donc au ruissellement 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 diffuse des sols cultivés.

Observation des écoulements de surface et de leurs conséquences

À l'échelle de la parcelle, comme l'ont démontré Martin (1996), Souchère *et al.* (1998), Takken *et al.* (2001 b), Von Rompaey *et al.* (2003), 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. À 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 influence la circulation. Trois critères interviennent : l'orientation du talus par rapport à la pente générale, le rapport entre son tracé et la topographie qu'il recoupe 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 (fig. 3a), ce d'autant plus que le tracé en plan du talus est constitué d'au moins deux segments formant un angle ouvert vers l'amont et empêchant un écoulement latéral — le puits topographique selon Mérot (1999). À ces eaux, sont associés des dépôts sédimentaires issus de la parcelle ou des parcelles amont (fig. 3b). Lorsque les obstacles sont de faible hauteur tels les résidus ou chevets de talus, ils ne parviennent plus à bloquer les volumes ruisselés sur parcelle(s) et des ruptures apparaissent. Ces dernières constituent des connexions avec d'autres compartiments, de même que des points de passage privilégiés pour les écoulements ultérieurs si la brèche n'est pas colmatée. La photo 3d 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.

3a. Accumulation d'eau au pied d'un talus



Source: Bocher, 2003

3b. Accumulation de terre au pied d'un talus



Source: Gestin, 2004

3c. Rupture puis débordement de terre d'une parcelle cultivée sur la voirie



Source: Bocher, 2004

3d. Canalisation et circulation des écoulements de surface de surface sur la voirie



Source: Bocher, 2004

3e. Détournement des écoulements de surface par un chemin



Source: Bocher, 2003

3f. Détournement des écoulements de surface par un talus



Source: Bocher, 2004

Figure 3: Impact des éléments linéaires sur l'organisation des écoulements de surface

Les ouvertures dans les talus sont des lieux privilégiés pour opérer des connexions entre les divers 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), cette dernière canalisant les flux vers un exutoire (route, cours d'eau, voire une autre parcelle). Sur la photo 3d, 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 photo 3e, 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 photo 3f.

Comme Carlier (1998), Sun et Mac Nulty (1998), Sebbab (2000), Moussa *et al.* (2002), Duke *et al.* (2003) qui ont démontré l'influence des aménagements anthropiques et des réseaux de voirie sur le cheminement de l'eau à l'échelle du bassin versant, nous constatons le rôle essentiel du réseau de voirie dans les transferts de flux à l'échelle du versant et du bassin versant : le réseau de voirie, outre le fait de former à lui seul un impluvium imperméable, constitue un collecteur-relais entre surfaces de production des flux liquides et solides et le réseau hydrographique, susceptible de connecter au cours d'eau des aires de ruissellement très éloignées mais aussi de dévier et de soustraire au cours d'eau des quantités non négligeables de flux, déconnectant ainsi des aires de production du réseau hydrographique.

Ces observations soulignent que les combinaisons potentielles de l'ensemble de ces facteurs à l'origine d'un schéma général du cheminement de l'eau dans le bassin versant sont multiples ; elles mettent en évidence la variabilité de leur efficacité dans l'évacuation des eaux de la parcelle au système hydrographique, via le système versant. Elles démontrent la nécessité d'appréhender non seulement l'impact du talus mais aussi celui du linéaire de la voirie en tenant compte de l'ensemble des connexions afin d'améliorer la compréhension des trajectoires des écoulements de surface. En Bretagne, si la contribution du ruissellement de surface au débit total des cours d'eau à l'échelle de l'année est faible, et si les phénomènes d'érosion des sols sont peu spectaculaires à la même échelle de temps, certaines situations météorologiques — donc l'échelle de l'événement ou d'une série d'événements — peuvent induire des processus exceptionnels mettant en jeu l'ensemble des compartiments fonctionnels du système. Par conséquent, elle donne ici tout son sens à l'utilisation de la modélisation spatiale : intégrer les dimensions spatio-temporelles en permettant, sur la base d'informations locales (unité bocagère), de simuler un comportement global (réponse du bassin versant et de son système bocager).

La modélisation spatiale et le modèle Odissés

Depuis une quinzaine d'années des efforts ont été réalisés par la communauté scientifique pour le développement de modèles spatialisés en hydrologie (Puech, 2000). 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, 2000, 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. Pour exprimer spatialement les effets des obstacles sur le parcours de l'eau de surface, les modèles distribués utilisent un arbre de drainage contraint par des données géographiques exogènes telles que les routes, le linéaire de haie ou le type de sol. L'arbre de drainage est calculé à partir d'un MNT matriciel carré en partant du principe que la direction de l'eau est gouvernée par la direction de la plus forte pente (Beaujouan *et al.*, 2000). Il est représenté sous la forme d'un ensemble de valeurs de direction associées à chaque cellule du MNT. Il définit les conditions du routage de l'eau dans le bassin versant et sert de support à la production d'indicateurs secondaires tels que la distance au cours d'eau ou l'aire d'alimentation topographique d'un exutoire. Il existe aujourd'hui une multitude de modèles permettant de calculer un arbre de drainage contraint. Parmi les plus aboutis on peut citer : le modèle STREAM (Souchère, 1995), le modèle TCRP (Takken *et al.*, 2001 a), le modèle RIDEM ou encore le modèle «TORTRAT» (Tortrat *et al.*, 2004). Les schémas de modélisation sont très diversifiés. Les plus simples se contentent de procéder à une modification des valeurs altimétriques du MNT pour intégrer les obstacles tandis que les plus complexes utilisent des chaînages algorithmiques spécifiques. Cependant, aucun de ces modèles ne se prête aisément à une modélisation en système bocager et ce pour plusieurs raisons :

- les données d'entrée ne sont jamais globales or chaque modélisation n'intègre souvent qu'un seul élément du paysage agraire : sens de travail du sol pour TCRP, route et fossé pour RIDEM...

- les modèles de données utilisés ne sont pas génériques et les processus de traitement des interactions sont spécifiques aux composantes prises en compte (talus, route, fossé) : en système bocager dense ces modèles se heurtent ainsi à la complexité des formes géométriques, au problème de proximité entre les éléments (effet de structure) ;

- les territoires d'application sont généralement de petite taille (50 à 200 ha) ou bien les données utilisées sont de faible résolution (MNT au pas de 10 m pour modéliser l'influence du sens de travail du sol). Lors d'une transposition sur un bassin versant d'une superficie de 1 000 à 1 500 ha où l'objectif est de se positionner à l'échelle de l'unité de gestion (le propriétaire du talus), les temps de traitements explosent. Les modèles deviennent inutilisables.

Sur la base de toutes ces expériences, nous avons développé un modèle, Odissés (Outil distribué pour la spatialisation des écoulements superficiels). Odissés est un modèle spatialisé intégré à l'environnement SIG du logiciel ArcGIS (Esri ©). Il permet de mettre en évidence le cheminement probable des écoulements

superficiels dans un bassin versant bocager en tenant compte de la structuration spatiale du linéaire introduit par les activités humaines (talus, voirie, parcellaire). Pour fonctionner, l'outil nécessite quatre couches d'information géographique (tableau 1).

Tableau 1. Type et nature des données utilisées par le modèle Odissés

Couche géographique	Type de données	Géométrie	Contenu
MNT	raster	pixel	Échantillon de valeurs d'altitude en format double.
Contrainte	vecteur	polyligne	Couche représentant des obstacles linéaires, talus ou digues.
Parcellaire	vecteur	polygone	Couche représentant les parcelles culturales et les routes. Un paramètre indique par une valeur binaire si les parcelles peuvent ruisseler (0 ruissellement, 1 pas de ruissellement).
Cours d'eau	vecteur	polyligne	Couche représentant le réseau hydrographique vérifié sur le terrain. Les polygones sont numérisés dans le sens d'écoulement de la rivière.

La modélisation se décompose en trois grandes étapes (figure 4) :

- 1 – Sélection des données d'entrée
- 2 – Application d'une chaîne de traitements spatiaux (modèle Odissés).
- 3 – Production des indicateurs spatiaux et statistiques.

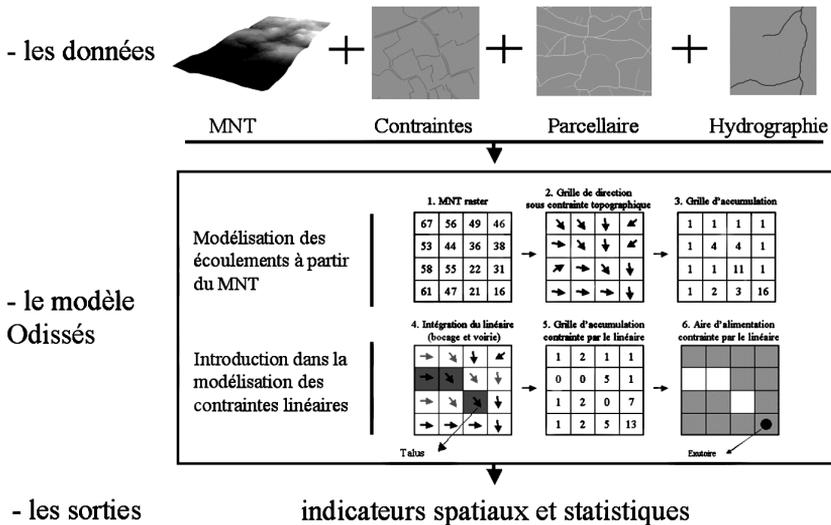


Figure 4: Schématisation de la démarche de modélisation avec Odissés

La chaîne de traitements spatiaux conduit à la production de deux grilles de direction des écoulements (fig. 4) : l'une calculée essentiellement à partir de la topographie, l'autre à partir des obstacles et paramètres d'écoulements spécifiés dans le modèle. La simulation des écoulements est réalisée en combinant les calculs de pentes, des règles logiques et des opérateurs morphologiques. Les deux grilles de direction servent de support pour obtenir deux types d'indicateurs (spatiaux et statistiques).

Les indicateurs spatiaux sont produits en s'appuyant sur les méthodes classiques utilisées pour dériver des critères hydrologiques à partir d'un MNT. Il s'agit par exemple d'une carte représentant l'aire d'alimentation d'un cours d'eau ou d'une carte des distances par rapport à celui-ci. Ces indicateurs sont ensuite combinés avec des couches géographiques (parcellaire, réseau bocager) pour mettre en évidence leur participation dans le cheminement des écoulements de surface.

Les indicateurs statistiques sont des données agrégées par bassin versant. Il s'agit par exemple du pourcentage d'aire connectée au cours d'eau avec *ou* sans la prise en compte des obstacles aux écoulements, du pourcentage de bocage efficace... L'intérêt de ces indicateurs est de pouvoir hiérarchiser différents bassins versants et donc de fixer des priorités d'intervention.

Application de la modélisation sur le sous-bassin versant du Sterenn (Côtes-d'Armor)

Sites d'étude

À l'intérieur du Sterenn, trois sous-bassins versants secondaires ont été retenus pour leur appartenance aux différentes classes de la typologie évoquées précédemment : le Poulglaou, le Goasguden et le Goazelarc'h. Les deux premiers sont caractérisés par un réseau bocager moyennement conservé (densités variant entre 80 et 90 m/ha), l'autre par un réseau bocager résiduel (densité de 52 m/ha). Les caractéristiques de ces sous-bassins versants sont rappelées dans le tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques des linéaires des sous-bassins versants

Bassin versant	Superficie (ha)	Densité de talus (m/ha)	Densité de routes (m/ha)	Proportion de routes (%)
Goazelarch	73.4	52	26.6	2.5
Goasguden	77.5	90.7	44.2	3.6
Poulglaou	106.2	81.8	46	5.6

Deux types de données ont été utilisés pour réaliser la modélisation spatiale :

- un MNT matriciel avec une résolution planimétrique de 5 m produit par stéréoscopie (Falourd, 2002) ;
- un ensemble de couches géographiques collectées sur le terrain : linéaire de talus, cours d'eau pérenne, voirie, parcellaire.

Deux schémas de modélisation ont été appliqués : l'un uniquement avec le linéaire de talus, l'autre avec les linéaires de talus et de la voirie. L'objectif est de tenter de cerner la participation de chacun de ces éléments dans l'organisation des écoulements de surface au sein du bassin versant.

Analyse des résultats : la réponse globale du bassin versant

Les indicateurs statistiques, à l'échelle du bassin versant, montrent que les éléments linéaires modifient notablement la surface d'alimentation du cours d'eau. La proportion de pixels connectés au cours d'eau varie entre 32 et 64 % avec les talus et entre 37.5 et 59.1 % avec les talus et la voirie (tableau 3).

Tableau 3. Proportion de pixels connectés au cours d'eau sur l'ensemble des pixels du bassin versant (%)

Bassin versant	Avec les talus	Avec les talus et la voirie	Densité de talus (m/ha)
Goazelarc'h	64.6	59.1	52
Goasguden	46	44.7	90.7
Poulglaou	32	37.5	81.8

Les parcelles du Goazelarc'h, sous-bassin versant caractérisé par un réseau de talus de faible densité, contribuent largement à l'alimentation du cours d'eau alors que celles des deux autres y contribuent plus modestement mais pas en proportion de la densité de talus. La relation ne semble pas évidente entre la densité de talus et de voirie et la surface connectée au cours d'eau puisque si les densités de talus sont proches sur les sites de Poulglaou et de Goasguden, en revanche les pourcentages de surface connectée sont significativement différents (32 % pour le premier et 46 % pour le second).

L'intégration de la voirie dans le schéma d'écoulement perturbe les conditions de circulation au sein du bassin versant en contrariant l'apport de surface connectée calculée avec les talus. Sur le Poulglaou, elle augmente la proportion de pixels connectés au cours d'eau de 5,5 points donc elle favorise l'évacuation des eaux. Tandis que sur les deux autres sous-bassins versants, elle la réduit : 1,7 points pour le Goasguden et 5,5 points pour le Goazelarc'h. Elle jouerait par conséquent aussi un rôle de détournement ou de rétention.

Les cartes de la figure 5 illustrent l'impact de ces éléments linéaires sur la modification de l'aire d'alimentation du cours d'eau. La comparaison cartographique des deux scénarii (b et c) permet d'observer des zones d'apports supplémentaires où les écoulements provenant des parcelles semblent capturés par la voirie (ellipse en pointillés). Sur le Goasguden et le Goazelarc'h, la voirie joue un rôle secondaire de protection relayant ainsi le rôle des talus. Certaines zones de versant sont désolidarisées du cours d'eau (sud-sud-ouest du Goasguden et nord-nord-ouest du Goazelarc'h, cadre en pointillés).

Les distances moyenne et maximale des pixels par rapport au cours d'eau confirment les impacts des talus et de la voirie sur les écoulements par rapport à la seule contrainte topographique mais aussi les effet de relais et d'interactions spatiales entre les talus et la voirie au sein des bassins versants (tableau 4). La modélisation

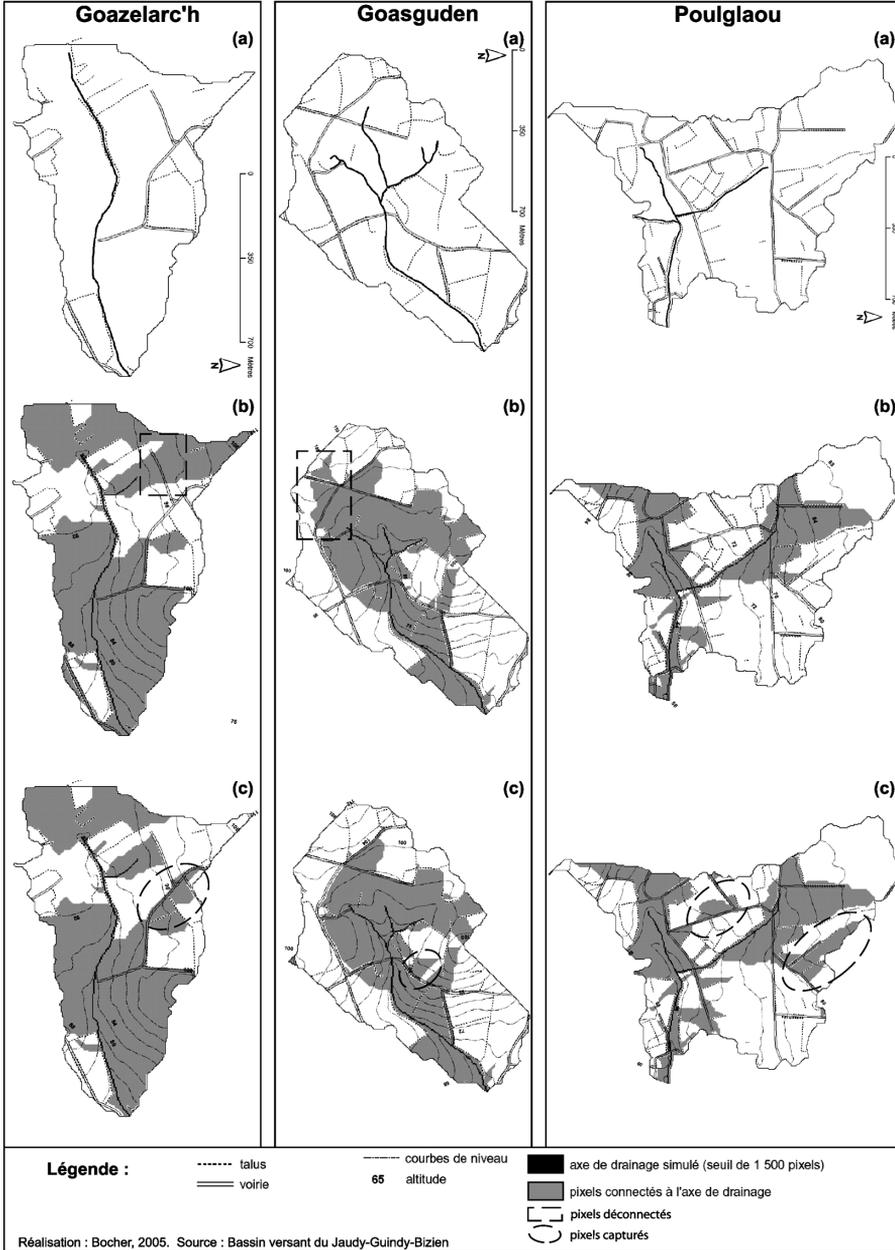


Figure 5 : Aires d'alimentation calculées: (b) avec les talus, (c) avec les talus et la voirie

avec les talus sur le Poulgaou révèle un abaissement des distances moyenne et maximale par rapport à une modélisation exclusivement sous contrainte topographique. *A contrario*, sur ce même territoire, la prise en compte de la voirie montre un allongement des distances de parcours (de 802 à 1 000 pour la distance maximale) par rapport à la modélisation avec les talus.

Tableau 4. Distance des pixels par rapport au cours d'eau (en mètres)

Bassin versant	Topographie		Avec les talus (b)		Avec les talus et la voirie (c)	
	moyenne	maximale	moyenne	maximale	moyenne	maximale
Goazelarc'h	167.4	567	166	567.4	235.4	1 369
Goasguden	174.3	680	151.8	604	137.6	551
Poulglauou	206.5	871	169.8	802	215.5	1 000

Les indicateurs statistiques ainsi que la cartographie des aires d'alimentation confortent le rôle antinomique des talus et de la voirie qui, lorsqu'ils sont conjugués dans la modélisation, peuvent atténuer ou renforcer l'efficacité des réseaux linéaires dans les bassins versants (Poulgaou en opposition à Goasguden).

Relais et interactions spatiales dans les systèmes bassin versant

Au sein du sous-bassin versant, la grille d'accumulation permet d'appréhender spatialement les types d'interaction entre les directions d'écoulement topographique et celles imposées par les éléments linéaires. Elle correspond à la somme des pixels amont qui alimente un pixel du MNT. À titre d'exemple, nous avons retenu les grilles d'accumulation calculées sous la contrainte des talus et de la voirie (scénario c) sur le Goasguden et le Goazelarc'h (fig. 6⁺). Ces derniers sont jugés comme suffisamment représentatifs.

La position topographique des éléments linéaires constitue un facteur important de contrôle des écoulements de surface. Sur les deux sous-bassins versants, la grille d'accumulation permet d'observer le rôle d'obstacle joué par les talus de ceinture perpendiculaire à la pente générale qui isolent les versants cultivés du cours d'eau. Les quantités maximales accumulées atteignent des superficies de 2,5 ha pour le Goasguden (rond noir (a)) et de 4 ha pour le Goazelarc'h (fig. 6, rond noir (a)). Les talus orientés dans le sens de la pente topographique dévient les directions d'écoulements naturels. Lorsque ces talus sont connectés avec un autre talus en travers de la pente topographique, ils forment des pièges à l'accumulation du ruissellement (Goasguden rond noir (b)). *A contrario*, l'absence de connexion contribue à favoriser une concentration linéaire de l'eau qui, sous l'effet des volumes et des vitesses d'apport, peut augmenter le pouvoir érosif à l'extrémité du talus (Goasguden rond noir en pointillés (a), figure 6). L'effet du talus peut être considérablement réduit par la présence d'une ouverture. Le zoom réalisé sur le Goazelarc'h montre ainsi que la déconnexion dans le talus de ceinture

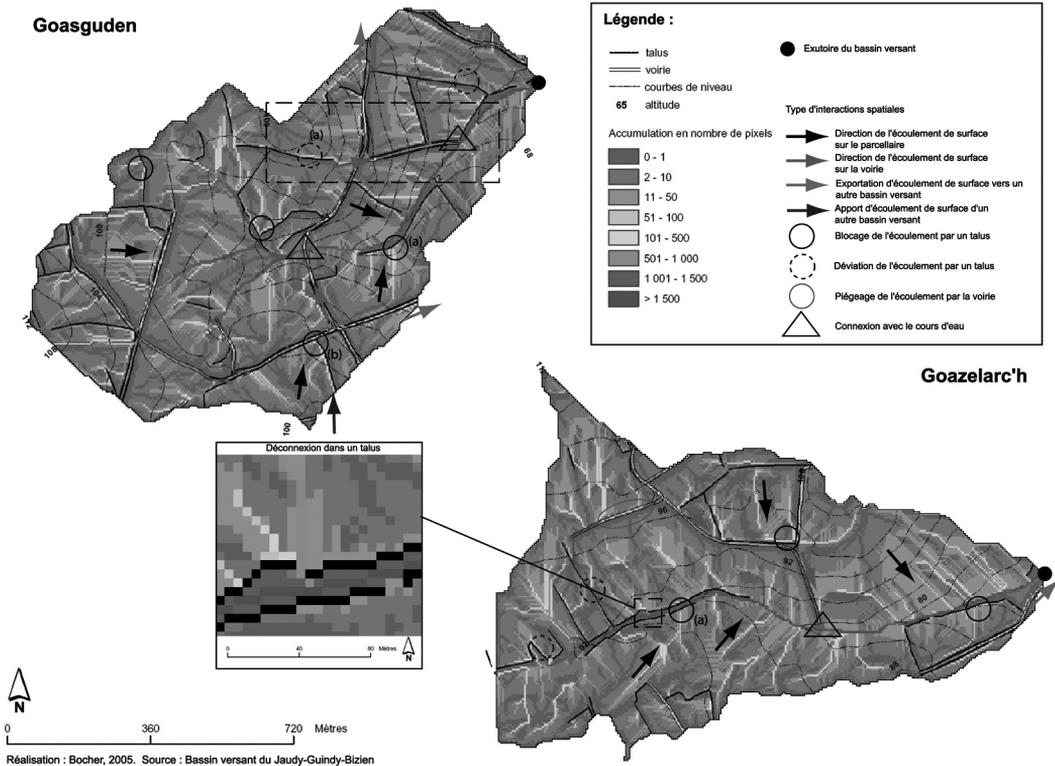


Figure 6: Grilles d'accumulation sous la contrainte « talus et voirie » en nombre de pixels

annule en quasi-totalité l'effet bloquant de celui-ci, et ce notamment car la brèche est localisée dans un site topographique stratégique, un micro talweg.

La voirie apparaît comme un facteur de fragmentation du cheminement de l'eau du versant vers l'axe de drainage. Les routes encaissées par rapport à la topographie naturelle collectent le ruissellement provenant des parcelles cultivées qui est ensuite redirigé vers un exutoire local (Goasguden et Goazelarc'h, flèche violette, fig. 6). Les cumuls des surfaces drainées par la voirie peuvent atteindre des quantités importantes, notamment la valeur seuil de 1 500 pixels observée sur le Goazelarc'h qui transforme la voirie en réseau secondaire de drainage et connecte des parcelles très éloignées du cours d'eau naturel (Goazelarc'h, triangle noir).

Sur le versant l'organisation des talus et de la voirie peut donner naissance à un système en relais dans lequel les effets des linéaires se conjuguent pour structurer d'amont en aval le cheminement du ruissellement de surface. Ce système est observable sur le Goasguden (encadré en pointillés). En amont du versant, le ruissellement engendré sur la zone cultivée est dévié par un talus où il se concentre jusqu'à son extrémité. À l'issue de ce détournement, l'écoulement est contrôlé par la topographie naturelle. Cependant, après avoir parcouru quelques dizaines de mètres sur le versant, les directions du ruissellement sont de nouveau perturbées

par une route positionnée transversalement. Cette route décaissée par rapport à la topographie capture les écoulements et les canalise vers le cours d'eau principal grâce à un axe secondaire orienté dans le sens de la pente du versant. Au final, le système talus et voirie a permis d'établir la jonction entre des zones situées sur le haut du versant d'une part et le cours d'eau d'autre part. Le ruissellement a ainsi potentiellement parcouru près de 600 mètres.

Ainsi l'analyse des grilles d'accumulation nous permet de dresser une typologie des interactions spatiales au sein du bassin versant avec :

- des zones de blocage des écoulements (puits) 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.

Conclusion

L'ensemble des résultats obtenus confirme l'importance des éléments linéaires dans le contrôle du ruissellement de surface à l'échelle du versant et du bassin versant. Ces résultats corroborent les travaux de Mérot *et al* (1999) qui ont montré l'influence de la position et de l'articulation des réseaux des haies sur le cheminement de l'eau (bloquage, déviation). Le schéma de modélisation intégré à Odissés apporte cependant des informations supplémentaires pour appréhender les effets conjugués de la voirie et des talus. La voirie apparaît comme une composante déterminante relayant l'impact de la topographie naturelle et des talus. Elle complexifie les processus de transferts de surface en multipliant les interactions spatiales entre les différents compartiments du bassin versant. La voirie, en canalisant les écoulements permet le raccordement entre des territoires qui auparavant étaient hydrologiquement déconnectés. Dans la hiérarchisation des écoulements selon l'ordination de Stralher, elle représente ainsi un cours d'eau élémentaire de niveau zéro, au même titre que les micro-vallons à écoulements temporaires.

Ces travaux confirment donc la nécessité de prendre en compte dans la notion de système bocager à la fois le réseau de talus et le réseau de voirie, notamment dans une perspective de lutte contre les transferts de polluants par ruissellement de surface.

Bibliographie

- ALBERTS G., GHIDEY F., KRAMER L., 2003, *Impact of Grass Hedges on Sediment Yield from a HEL Watershed*, from < <http://www.tucson.ars.ag.gov/>>, consulté en novembre 2004.
- 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*, 10: 39-60.
- BOCHER E., 2003, *Diagnostic des structures bocagères et hydrauliques sur le sous-bassin versant du Sterenn*, Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien, Trélévern (Côtes-d'Armor).
- CANÉVET C., LEBAHY Y., 1994, « Aménagement rural : le remembrement et les aménagements fonciers », in *Géographie et aménagement de la Bretagne*, Morlaix, Skol Vreizh : 156-157.
- CARLUER N., 1998, *Vers une modélisation hydrologique adaptée à l'évaluation des pollutions diffuses : prise en compte du réseau anthropique*, thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- DANAIS M., 1987, *Évolution des bocages de l'Ouest : contribution à un premier bilan et approche prospective (à compléter : je n'ai trouvé qu'une intervention au Colloque européen sur le devenir des pays de bocage, Sains du Nord, 12 au 14 novembre 1987)*.
- DELAHAYE D., 2002, *Apport de l'analyse spatiale en géomorphologie : modélisation et approche multiscalaire des risques*, mémoire d'habilitation à diriger des recherches, vol. 1, Université de Rouen.
- 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, from < <http://www.spatialhydrology.com/journal/> > consulté en décembre 2004.
- MARTIN C., 1996, « L'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle et d'un petit bassin versant après incendie de forêt dans le Massif des Maures », *Étude et Gestion des Sols*, 3:179-192.
- MÉROT P., GASCUEL-ODOUX C., WALET C., ZHANG X., MOLENAT J., 1999, « Influence du réseau de haies des paysages bocagers sur le cheminement de l'eau de surface », *Revue des sciences de l'eau*, 12: 23-44.
- MOUSSA R., VOLTZ M., ANDRIEUX P., 2002, « Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events », *Hydrological Processes*, 16: 393-412.
- PUECH C., 2000, *Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes*, habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- SEBBAB H., 2000, *Application des SIG 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 Rennes 2.
- SOLTNER D., 1973, *L'Arbre et la haie pour la production agricole, pour l'équilibre écologique, et le cadre de vie rurale*, Sainte-Gemmes-sur-Loire, D. Soltner, « Sciences et Techniques agricoles ».
- SOUCHÈRE 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 Institut National d'Agronomie de Paris-Grignon.

- 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*, 206 : 256-267.
- SUN G., MCNULTY S., 1998, « Modeling soil erosion and transport on forest landscape », in *Winning solutions for risky problems*, Reno, NV, Steamboat Springs : 189-198, from < <http://www.srs.fs.usda.gov/pubs/viewpub.jsp?index=902>>, consulté en décembre 2004.
- TAKKEN I., JETTEN V., GOVERS G., NACHTERGAELE J., STEEGEN A., 2001a, « The effect of tillage-induced roughness on runoff and erosion patterns », *Geomorphology*, 37 : 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 : 1-13.
- 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*, from < <http://www.irisa.fr/dream/SACADEAU/publications.htm>> consulté en février 2005.
- VAN ROMPAEY A., BAZZOFFI P., DOSTAL T. *et al.*, 2003, *Modeling off-farm consequences of soil erosion in various landscapes in Europe with a spatially distributed approach*, from < http://webdomino1.oecd.org/comnet/agr/soil_ero_bio.nsf/>, décembre 2004.