

Influence du réseau de haies des paysages bocagers sur le cheminement de l'eau de surface

The influence of hedgerow networks in bocage landscapes on surface water pathways

Ph. Merot, C. Gascuel-Oudou, C. Walter, X. Zhang et J. Molenat

Volume 12, numéro 1, 1999

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705342ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705342ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Merot, P., Gascuel-Oudou, C., Walter, 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 / Journal of Water Science*, 12(1), 23–44. <https://doi.org/10.7202/705342ar>

Résumé de l'article

En Bretagne, le bocage est un paysage typique constitué d'un réseau de haies planté sur un talus de terre entourant les parcelles. La première partie résume les connaissances actuelles sur le rôle hydrologique du bocage.

L'article porte sur le rôle du bocage sur les écoulements de surface (écoulement hortonien). Il s'agit d'une première étape pour intégrer le rôle des haies dans la modélisation hydrologique distribuée. On s'attache à la description de la modification du réseau de drainage par les haies.

Ce travail a nécessité la mise au point d'un logiciel en C qui permet de créer le réseau de drainage sous contrainte topographique à partir d'un modèle numérique de terrain, puis de le modifier en intégrant la présence des haies. Cinq situations représentant une grande diversité bocagère (de 39 m/ha jusqu'à 200 m/ha) ont été étudiées.

On constate une profonde modification du réseau de drainage, puisque jusqu'à 90% des mailles voient leur place changer dans le réseau de drainage.

Cependant, l'effet le plus important est la déconnexion de certaines branches du réseau de drainage, qui était précédemment continu jusqu'à l'exutoire. En effet, certaines haies jouent le rôle de puits, où l'eau ne peut que s'infiltrer (haies parallèles aux courbes de niveau). Ces puits contrôlent ainsi des zones du bassin versant, qui peuvent atteindre jusqu'à 40 % de la surface totale. Des modifications sont également observées sur la longueur de ruissellement réduite en moyenne, mais dans des proportions faibles (10 à 20 %). Enfin, les pentes des mailles dont la direction a été modifiée par la présence d'une haie à leur endroit sont également diminuées d'environ 50 %.

La densité de haies, qui est pourtant souvent le seul facteur disponible pour qualifier le bocage dans les opérations d'aménagement, apparaît insuffisante pour caractériser le rôle " tampon " du bocage sur le plan hydrologique. En conclusion, on attire l'attention sur la nécessité de prendre en compte la structure du bocage pour intégrer son rôle hydrologique dans les opérations d'aménagement.

Influence du réseau de haies des paysages bocagers sur le cheminement de l'eau de surface

Bocage landscape and surface water pathways

Ph. MEROT*, C. GASCUEL-ODOUX, C. WALTER, X. ZHANG et J. MOLENAT

Reçu le 13 juin 1997, accepté le 11 mai 1998**.

Cet article est publié intégralement en français et en anglais. Les illustrations et les tableaux sont intégrés au texte anglais, voir p. 32

This paper is published integrally in both French and English, see p. 32.

RÉSUMÉ

En Bretagne, le bocage est un paysage typique constitué d'un réseau de haies plantées sur un talus de terre entourant les parcelles. La première partie résume les connaissances actuelles sur le rôle hydrologique du bocage.

L'article porte sur le rôle du bocage sur les écoulements de surface (écoulement hortonien). Il s'agit d'une première étape pour intégrer le rôle des haies dans la modélisation hydrologique distribuée. On s'attache à la description de la modification du réseau de drainage par les haies.

Ce travail a nécessité la mise au point d'un logiciel en C qui permet de créer le réseau de drainage sous contrainte topographique à partir d'un modèle numérique de terrain, puis de le modifier en intégrant la présence des haies. Cinq situations représentant une grande diversité bocagère (de 39 m/ha jusqu'à 200 m/ha) ont été étudiées.

On constate une profonde modification du réseau de drainage, puisque jusqu'à 90 % des mailles voient leur place changer dans le réseau de drainage. Cependant, l'effet le plus important est la déconnexion de certaines branches du réseau de drainage, qui était précédemment continu jusqu'à l'exutoire. En effet, certaines haies jouent le rôle de puits, où l'eau ne peut que s'infiltrer (haies parallèles aux courbes de niveau). Ces puits contrôlent ainsi des zones du bassin versant, qui peuvent atteindre jusqu'à 40 % de la surface totale. Des modifications sont également observées sur la longueur de ruissellement réduite en moyenne, mais dans des proportions faibles (10 à 20 %). Enfin, les pentes des mailles dont la direction a été modifiée par la présence d'une haie à leur endroit sont également diminuées d'environ 50 %.

INRA, unité sol et agronomie de Rennes-Quimper, 65, route de Saint-Brieuc, 35042 Rennes cedex, France.

* Correspondance. e-mail : pmerot@roazhon.inra.fr

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 septembre 1999.

La densité de haies, qui est pourtant souvent le seul facteur disponible pour qualifier le bocage dans les opérations d'aménagement, apparaît insuffisante pour caractériser le rôle « tampon » du bocage sur le plan hydrologique. En conclusion, on attire l'attention sur la nécessité de prendre en compte la structure du bocage pour intégrer son rôle hydrologique dans les opérations d'aménagement.

Mots clés : haies, ruissellement hortonien, MNT, modélisation hydrologique.

1 – INTRODUCTION

Le paysage du bocage breton, comme le paysage typique du Schleswig-Holstein en Allemagne (METTE & SATTELMACHER, 1994), est composé d'un ensemble de parcelles entourées par un réseau de haies plantées sur un talus et longées par un fossé. Les talus correspondent à des levées de terres de 1 à 2 m de hauteur. Une grande diversité du bocage est observée en Bretagne du fait de conditions climatiques, agricoles (BUREL, 1996) ou culturelles (FLATRES, 1976) variées.

De nombreux chercheurs ont insisté sur l'intérêt du bocage selon différents points de vue : intérêt écologique comme corridor pour la faune et la flore (BUREL & BAUDRY, 1994), vis-à-vis du sol comme barrière contre l'érosion (CARNET, 1978), sur le plan agricole comme refuge pour le bétail ou comme brise-vent, enfin culturel comme témoin du passé et paysage ressenti comme agréable. Malgré cela, on a observé la suppression de 200 000 km de haies-talus lors des dernières décennies. La politique d'aménagement menée aujourd'hui tente de prendre en compte l'intérêt du bocage lors des nouvelles restructurations foncières. Cela demande la connaissance des caractéristiques et du fonctionnement du bocage. Sur le plan hydrologique, le bocage a été peu étudié en dépit du considérable intérêt des haies sur la gestion et la conservation des ressources en eau, comme le montrent de nombreuses études sur les systèmes de cultures associées à des haies (AGUS *et al.*, 1997 ; ALEGRE & RAO 1995).

1 – BRÈVE REVUE SUR LE RÔLE HYDROLOGIQUE D'UN PAYSAGE BOCAGER

Le bocage et les sols : l'impact des talus sur les sols est différent selon leur place dans le paysage (CARNET, 1978 ; METTE & SATTELMACHER 1994 ; BAFFET 1984). Les talus parallèles aux courbes de niveau entraînent une différenciation entre les sols situés à l'amont ou à l'aval du talus (*figure 1*). À l'amont, des particules érodées, riches en matière organique sont piégées ; inversement à l'aval, on observe des dépôts de matériaux érodés. Cela crée fréquemment une différence de niveau entre les 2 cotés du talus et conduit parfois à la création de terrasses et rideaux (ennoisement total du talus par les dépôts amont). Les talus parallèles à la pente n'ont pas d'effet sur l'érosion. Au sein du talus lui-même, une forte macroporosité est présente du fait de l'activité biologique, du système racinaire des arbres et de l'absence de travaux culturaux. Le matériau constitutif des talus est appauvri sur le plan chimique du fait du lessivage et le talus montre une forte perméabilité.

Le bocage et la phase atmosphérique du cycle de l'eau : l'impact du bocage sur les précipitations dépend de l'échelle d'observation ; alors qu'aucune modification de la hauteur des précipitations n'a pu être démontré à l'échelle de bassins versants, une grande hétérogénéité de la pluie a été mesurée à l'échelle locale, due à un effet brise-vent (MEROT, 1978). L'effet des haies sur l'évapotranspiration a été théoriquement et expérimentalement démontré en zone méditerranéenne et sous climat semi-aride. Inversement, sous climat tempéré humide, il apparaît (GUYOT & SEGUIN, 1976), que le bocage a un effet limité, d'environ 5 %, sur l'évapotranspiration réelle et potentielle (ETR et ETP), tant à l'échelle de la parcelle que celle du bassin versant. Cette faible incidence est due à l'humidité de l'air. Néanmoins, à l'échelle du talus, la teneur en eau des sols au droit et autour du talus est faible en été, du fait d'une plus forte ETR que dans les cultures environnantes. Il y a ainsi une hétérogénéité de l'ETR au sein du bassin versant, due aux haies.

Le bocage et les événements averse – crue : le suivi comparatif (MEROT, 1978) de 2 petits bassins versants similaires et comparables, hormis la présence de bocage sur un des sites, a montré que, pour des crues d'occurrence fréquente, le coefficient de ruissellement et le pic de crue étaient de 1,5 à 2 fois plus forts sur le bassin sans bocage que sur l'autre. En fait, les différentes valeurs du coefficient de ruissellement apparaissent stables sur le bassin bocager, autour de 5 %, alors qu'elles varient de 5 à 15 % sur l'autre. Pendant la saison humide, les facteurs des crues n'apparaissent pas les mêmes pour les deux bassins ; alors que le volume ruisselé ne dépend que de la hauteur des précipitations sur le bassin bocager, il dépend de l'humidité des sols, de la hauteur et de l'intensité des pluies sur le bassin non bocager.

La nature différente de ces réponses selon le type de paysage, bocager ou non, s'explique de la façon suivante : les deux principaux processus de l'écoulement de surface sont d'une part l'écoulement par saturation et l'exfiltration sur les zones contributives (KIRKBY, 1978 ; BEVEN & WOOD, 1983 ; MEROT, 1988), d'autre part le ruissellement hortonien par refus à l'infiltration. Le premier ne dépend pas de l'intensité des pluies, mais uniquement de leur hauteur et de l'importance des zones préalablement saturées ; le second survient quand l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration des sols. Ainsi, lorsque les fonds de vallées sont complètement ceinturés par un talus, l'écoulement de surface n'aurait pour origine que la zone saturée contributive connexe au ruisseau ; l'extension de cette zone est limitée par le talus, et son extension ne varie que peu. De son côté le ruissellement hortonien sur les versants en amont des talus ne peut atteindre le ruisseau. Ces hypothèses ont été vérifiées par MEROT et BRUNEAU (1993) en modélisant l'écoulement sur un bassin versant bocager théorique.

Aucune étude n'a été réalisée sur l'impact du bocage lors événements extrêmes, mais on peut supposer que la part du ruissellement hortonien, peu présent lors événements fréquents, s'accroît alors et que les haies parallèles aux courbes de niveau jouent un rôle d'autant plus important.

En résumé, les deux principales conséquences du réseau bocager dans un bassin versant sont, d'une part d'accroître l'hétérogénéité de l'organisation et de l'état interne du bassin (sols, pluie, ETR, teneur en eau des sols) et d'autre part de modifier les chemins de l'eau pour les eaux de surface. Le besoin actuel est de quantifier l'impact de réseaux réels de haies sur les écoulements de surface : les haies ne sont pas toujours continues ; leur distribution spatiale et leurs direc-

tions sont très variables. Elles ne sont pas non plus toujours parallèles ou perpendiculaires aux courbes de niveau. Ainsi nous avons besoin de pouvoir intégrer l'impact d'un réseau réel de haies dans la modélisation hydrologique distribuée. Dans un premier article (MEROT & BRUNEAU, 1993), l'impact des talus de ceinture de fond de vallée sur le ruissellement par saturation a été modélisé. Le ruissellement hortonien a tendance à s'accroître, du fait de l'augmentation des surfaces en maïs, qui laissent le sol nu et compacté en hiver. On traitera ici du rôle de l'ensemble du réseau bocager sur le cheminement du ruissellement hortonien, en modélisant le rôle des haies sur le réseau de drainage.

2 – MATÉRIEL ET MÉTHODES

Définition du réseau de drainage : le réseau de drainage représente l'ensemble des chemins de l'eau à la surface d'un bassin. Dans un modèle numérique de terrain (MNT), la direction des écoulements de surface de chaque maille est déduite de la différence d'altitude entre les mailles voisines (Depraetere, 1991, Wharton, 1994). Pour définir cette direction, deux modalités peuvent être choisies, les modes multi- ou mono-directionnels. Le premier suppose que l'écoulement se fait depuis la maille considérée vers toutes les mailles d'altitude inférieure selon une pondération fixée (QUINN *et al.*, 1991 ; HOLMGREN, 1994 ; SQUIVIDANT, 1994) ; le second suppose que l'écoulement se fait selon la plus grande pente. En dépit de l'intérêt du modèle multi-directionnel (AUROUSSEAU & SQUIVIDANT, 1995 ; WOLOCK & McCABE Jr, 1995), le modèle mono-directionnel a été choisi pour sa simplicité et son adéquation aux objectifs. Le réseau de drainage est ensuite divisé en deux parties, en fonction de la surface drainée. La première partie correspond aux versants ; la deuxième au réseau hydrographique – la rivière –. La limite de la surface drainée a été fixée à 25 ha, surface qui donne le meilleur accord entre les réseaux hydrographiques calculés et réels.

Dans un paysage bocager, le chemin de l'eau à la surface du versant est modifié lorsqu'il rencontre un talus : il doit suivre la direction du talus jusqu'à un puits, c.a.d. un point bas où le chemin se termine, ou jusqu'à une solution de continuité dans le talus où il se reconnecte au réseau de drainage initial. Si le talus est parallèle aux courbes de niveau, il se termine immédiatement. On peut ainsi construire un nouveau réseau de drainage, appelé réseau anthropique de drainage, qui peut être comparé au réseau initial, réseau topographique de drainage.

Les conséquences du réseau anthropique de drainage sur les paramètres hydrométriques sont de 3 sortes : 1) le réseau topographique de drainage, qui était continu jusqu'à l'exutoire du bassin est remplacé par un réseau non continu ; des parties du bassin qui arrivent à des puits sont déconnectées de la rivière, et l'eau doit s'infiltrer au niveau de ces puits ; 2) la longueur des chemins de ruissellement potentiel, qui correspondait précédemment à la longueur des versants est maintenant définie comme la longueur jusqu'au point le plus bas du chemin de drainage, qui peut être un puits sur la pente ; 3) la pente des chemins d'écoulement qui suivent les haies est plus faible que la pente topographique.

Un logiciel a été développé en langage C pour déterminer le réseau de drainage en fonction de la topographie, et pour le modifier en prenant en compte les haies (ZHANG, 1995). Le MNT de tous les sites a été calculé à un pas de 20 m par digitalisation de cartes topographiques au 1/5 000. Le choix de taille de la maille a été choisi après quelques essais avec un pas plus large, qui n'a pas donné de résultats satisfaisants, du fait de la trop forte différence avec la largeur de la haie. Nous détaillons ici uniquement le programme spécifique aux haies.

1) La première étape est de *définir les mailles du MNT qui croisent une haie*, appelés mailles-haies. Pour cela, une carte des haies établie par photos aériennes et vérification au sol, disponible en format vecteur, est superposée au fichier topographique en mode matriciel, au pas de 20 m. Cependant, la largeur de la ligne de maille-haie ainsi définie, qui couvre souvent deux mailles, est plus large que la largeur de la haie-vecteur. Pour limiter la largeur de la ligne de maille-haie à au plus une maille, un traitement analogue à une squelettisation est réalisé (figure 2).

2) *La direction des mailles-haies est modifiée*. La direction de drainage des mailles-haies est modifiée et orientée vers la maille contiguë plus basse le long de la haie (figure 3). Quand deux directions d'écoulement convergent vers une même maille, celle-ci est définie comme une maille-puits. Cependant, si l'altitude de la haie oscille autour d'une valeur, comme on peut le voir sur la figure 3, un seuil est introduit pour prendre en compte la précision du MNT et éviter un comportement erratique. Le seuil choisi a été fixé à 0,5 m, d'après la connaissance de terrain et après quelques tests.

3) *L'influence des coins est prise en compte*. Les coins doivent être identifiés pour éviter de procéder à des modifications erronées de la direction d'écoulement. Comme on le voit figure 4, l'écoulement orienté par la haie en amont doit, lorsqu'il arrive à l'extrémité anguleuse, suivre la direction topographique à partir de ce coin. Ceci est réalisé informatiquement en déconnectant les deux haies à ce coin (figure 4c).

Les sites test (tableau 1) : deux sites test ont été choisis. L'un est le bassin versant du Coët-Dan, de 12 km², au sud de la Bretagne, où des études intensives sont menées (CURMI *et al.*, 1994 ; CANN, 1992). Le climat est océanique, avec une température annuelle moyenne de 11 °C et 800 mm de précipitation. Le réseau de haies a été caractérisé en 1948 et 1992. L'année 1948 correspond au maximum connu de l'extension du bocage sur ce site. Entre 1948 et 1992, le bocage a été profondément remanié, avec de rares constructions de haies-talus, et surtout une disparition importante de haies-talus du fait du remembrement et de l'intensification agricole. La densité du réseau bocager du bassin du Coët-Dan a été divisée par plus de deux entre 1948 et 1992, de 86 m/ha à 39 m/ha. Ce site permet de suivre l'évolution temporelle d'un réseau de drainage.

Le deuxième site est un ensemble de 3 bassins versants (appelés A, B, C), près du hameau de Pleine-Fougères, au nord de la Bretagne (photo 1). Le climat est océanique, avec une température annuelle moyenne de 10 ° et 900 mm de précipitation. Un grand programme d'étude du bocage est développé sur ce site, qui représente 3 stades de densité du bocage (THENAIL, 1996). Le site de Pleine-Fougères affiche des densités allant de 196 m/ha à 69 m/ha, correspondant à des situations témoins du bocage d'autrefois jusqu'à un bocage résiduel. Il permet ainsi d'étudier l'impact de différentes structures du bocage sur le réseau de drainage.

3 – RÉSULTATS ET DISCUSSION (tableau 2)

Modifications de l'arbre de drainage (tableau 2 ; figure 5) : les modifications du réseau de drainage impliquent des modifications de la surface drainée par chaque maille : les mailles longeant l'amont des haies peuvent drainer plus de mailles ; les mailles à l'aval des haies en drainent moins. Les modifications peuvent être considérables. Ainsi, le bassin B, sur le site de Pleine-Fougères a 30,6 % de mailles qui drainent plus de mailles et 62,5 % qui en drainent moins : 90 % du réseau de drainage apparaît ainsi modifié. Le bassin du Coët-Dan, en 1992, qui présente la plus faible densité de haies observées a 10,2 % de mailles qui drainent plus de mailles et 16,6 % qui en drainent moins (un total de 26,8 % de maille est modifié). Il y a approximativement deux fois plus de diminution de la surface drainée que d'accroissement. Une corrélation est observée entre le pourcentage de mailles modifiées et la densité de haies ($r = 0,86 ; 0,99$ et $0,92$ respectivement pour une augmentation, une diminution et le total).

Surface de bassin versant déconnectée de la rivière : La surface de bassin versant déconnectée du réseau hydrographique correspond au pourcentage de mailles connectées à un puits rapportées à l'ensemble des mailles (tableau 2 et figure 6b). Il varie de 14,2 % à 40,1 %, selon les bassins. Sur le bassin du Coët-Dan, la division par deux de la densité du bocage entre 1948 et 1992 conduit à une diminution de la surface déconnectée de 32,1 à 14,2 %. Cependant, pour l'ensemble des 5 situations étudiées, il n'y a pas de relation entre la densité des haies et la surface relative déconnectée de la rivière (figures 6a et 6b). Il n'y a pas plus de relation entre le pourcentage de maille-puits et la superficie relative du bassin connectée à un puits (figures 6b et 6c). De fait, la structure du réseau de haies (c.a.d. la connexité des haies et la localisation de certaines haies sur les lignes majeures de drainage), plus que la densité est le paramètre pertinent qui explique la déconnexion d'une partie du bassin par les haies. Le site A, en dépit de sa forte densité de haies, a un pourcentage de haies jouant un rôle de puits relativement faible et donc un pourcentage de surface relative déconnectée de la rivière étonnamment bas, dû à de nombreuses ruptures dans la continuité des haies.

Réduction de la longueur potentielle de ruissellement : la longueur potentielle de ruissellement sur un versant est définie comme la longueur du versant lorsque les haies ne sont pas prises en compte, et est définie comme la longueur de chaque segment de versant – depuis la crête jusqu'à une haie, entre deux haies ou depuis une haie jusqu'à la rivière –, pour un bassin avec des haies. La présence des haies implique une réduction moyenne de la longueur de ruissellement de 0 à 50 m, pour des longueurs moyennes de pente comprises entre 350 et 410 m (figure 7a). La réduction relative de cette longueur n'est pas corrélée à la densité de haies. Elle semble faiblement corrélée à la surface relative de bassin déconnectée de la rivière (figure 7b). Ainsi, la réduction de la longueur moyenne de ruissellement sur le bassin du Coët-Dan est seulement de 27 m entre 1948 et 1992, alors que la densité chute de 86 à 39 m/ha.

Cet effet moyen est le résultat d'un changement dans la distribution de la longueur de ruissellement, comme on peut le voir pour le bassin du Coët-Dan (figure 8). Les grands versants, de 500 à 1 000 m, sont fragmentés en segments plus courts par les haies, et un accroissement de la population de segments de longueur inférieure à 250 m est observée. L'occurrence de longueur de ruisselle-

ment comprise entre 250 et 500 m reste la même pour les 3 situations. Enfin, les longueurs les plus grandes (au-delà de 1 000 m) gardent la même représentation. Ceci est vraisemblablement dû à ce que certaines fractions du réseau de drainage sont considérées comme des versants par la méthode utilisée (voir § définition du réseau de drainage), alors qu'elles font de fait partie intégrante du réseau hydrographique, et ne sont donc pas traversées par une haie.

Pente des mailles-haies dans la direction de drainage. Les modifications de la direction de drainage des mailles-haies impliquent une diminution de la valeur de la pente dans la direction de drainage. La corrélation (*figure 9a*) entre la pente topographique et celle dans la direction de la haie est bonne (pente sans haie = $0,57 * \text{pente avec haie} + 4,54$; $r = 0,96$). De plus, la distribution des pentes élémentaires pour ces mailles-haies est assez différente si l'on considère la pente topographique ou la pente dans la direction de drainage suivant la haie. Ceci est montré pour le bassin du Coët-Dan (*figure 9b*). La distribution des pentes devient très fortement dissymétrique lorsque l'on suit les haies, avec un maximum centré autour de 0 degré, alors que la pente topographique est centrée sur 0,075. Quelques pentes sont négatives, du fait du seuil minimum imposé pour changer la direction d'écoulement le long d'une haie (cf. *figure 3*).

Le réseau bocager change les caractéristiques hydrologiques des bassins versants : profondes modifications de la topologie du réseau de drainage, déconnexion d'une partie de la superficie du bassin versant par rapport au réseau hydrographique qui peut atteindre 40 %, favorisant l'infiltration sur les versants, diminution de la pente des lignes d'écoulement le long des mailles-haies. Toutes ces modifications conduisent à accroître le temps de résidence au sein des bassins versants. Le bocage peut ainsi être considéré comme une structure tampon vis-à-vis des écoulements. Néanmoins, la structure des bocages d'autrefois, créés pour de multiples raisons, mais où ce rôle tampon n'avait pas sa part, ne développe pas au maximum ces capacités tampons. Inversement, certains bocages avec une faible densité de haies peuvent avoir une bonne capacité à contrôler les chemins de l'eau, comme le bassin C de Pleine-Fougères. Pour ce site, l'impact hydrologique du réseau de haies a été pris en compte lors des aménagements effectués lors d'un remembrement récent. Enfin, cette étude montre clairement que la densité de haies est un indicateur insuffisant de la capacité tampon des paysages bocagers, mais qu'il faut tenir compte également de leur orientation et de leur position topographique.

4 – CONCLUSION

Le bocage, un paysage structuré par un réseau de haies a un effet très marqué sur la déconnexion de fractions du bassin par rapport à la rivière, comprise entre 40 et 15 %, même pour un bocage résiduel (39 m/ha de haies). Ainsi, il apparaît comme une barrière efficace contre le ruissellement de surface et agit comme une structure tampon vis-à-vis d'événements hydrologiques. Cependant la structure du bocage d'autrefois peut être améliorée en prenant en compte son effet hydrologique. Alors que la densité du bocage est souvent le seul paramètre disponible pour évaluer la place du bocage dans les aménagements actuels, il

apparaît la nécessité de prendre en compte également sa structure (connexité et localisation sur des lignes majeures de drainage) pour pouvoir évaluer son effet hydrologique. De façon plus générale, la construction de nouveaux bocages doit intégrer cette dimension hydrologique.

Il avait été démontré dans un article précédent que les haies de ceinture de fond de vallée jouent un rôle important pour réguler les événements hydrologiques fréquents en agissant sur la dynamique des zones contributives. On montre ici que l'ensemble du paysage bocager semble susceptible de jouer un rôle lors d'événements hydrologiques extrêmes, où le ruissellement hortonien, qui emprunte les chemins d'écoulements de surface, est important.

L'approche utilisée ici pourrait être appliquée à l'étude des interactions entre la topographie et toute structure linéaire de paysage, dans le cadre de la modélisation hydrologique distribuée.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé avec le soutien du ministère de l'environnement dans le cadre de l'opération : « organisation paysagère, agricole, écologique et sociale des structures linéaires boisées ». X. ZHANG a bénéficié d'une bourse de la direction des relations internationales de l'INRA.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGUS F., CASSEL D.K., GARRITY D.P., 1997. Soil-water and soil physical properties under contour hedgerow systems on sloping oxisols. *Soil & tillage res.*, 40, 185-199.
- ALEGRE J.C., RAO M.R., 1995. Soil and water conservation by contour hedging in the humid tropics of Peru. *Agric. Ecosystems and Environment*, 57, 17-25.
- AUROUSSEAU P., SQUIVIDANT H., 1995. Role environnemental et identification cartographique des sols hydromorphes de bas fonds – cas du bassin versant de la rade de Brest, Le programme rade – 3^e rencontres scientifiques internationales, 110-123.
- BAFFET M., 1984. Influence de la haie sur l'évolution des caractères physico-chimiques et hydrodynamiques des sols. Thèse univ Limoges 173 p.
- BEVEN K., WOOD E.F., 1983. Catchment geomorphology and the dynamic of runoff contributing areas. *J. Hydrol.*, 65, 139-150.
- BUREL F., 1996. Hedgerows and their role in agricultural landscapes. *Critical review in Plant sciences*, 15, 169-190.
- BUREL F., BAUDRY J., 1994. Control of biodiversity in hedgerow network landscapes in western France. *Hedgerow management and nature conservation*, Wye College Press, 47-58.
- CANN C., 1992. Tools for budgeting nutrient transfers in agricultural catchments in *Methods of hydrological basin comparison*, M. Robinson ed., Institute of hydrology Wallingford, report 120, 64-71.
- CARNET C., 1978. Étude des sols et de leur régime hydrique en région granitique de Bretagne : une approche du rôle du bocage. Thèse Univ Rennes, UER Sciences Biologiques, mention Agronomie, 235 p.
- CURMI P., DURAND P., GASCUEL-ODOUX C., HALLAIRE V., MEROT PH., ROBIN P., TROLARD F., WALTER C., BOURRIÉ G.,

1995. Le programme Cormoran-INRA : De l'importance des facteurs du milieu physique et de son aménagement dans le contrôle géochimique de la teneur en nitrate des eaux superficielles *Journal Européen d'Hydrologie*, tome 26, fasc 1, pp. 37-56.
- DEPRAETERE C., 1991. LAMONT – Logiciel d'Application des Modèles Numériques de Terrain, *Technical Report of Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération – Notice OVNih du laboratoire d'hydrologie #4*.
- ESMENJAUD M., ESTEOULE J., GUYADER J., 1976. Étude pédologique des différents types de talus : considérations sur la différenciation des profils ; essai de systématique. in *Les bocages : histoire, écologie, économie*, Missonier [ed.], INRA Rennes 167-176.
- FLATRES P., 1976. Géographie : rapport de synthèse in *Les bocages : histoire, écologie, économie*, Missonier [ed.], INRA Rennes, 43-48.
- GUYOT G., SEGUIN B., 1976. Influence du bocage sur le climat d'une petite région in *Les bocages : histoire, écologie, économie*, Missonier [ed.], INRA Rennes, 121-130.
- HOLMGREN P., 1994. Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models : an empirical evaluation, *Hydrol. Process.*, vol. 8, 327-334.
- KIRKBY M.J., 1978. Hillslope hydrology. John Wiley and sons, Chichester. 389 p.
- MEROT Ph., 1978. Le bocage en Bretagne granitique : une approche de la circulation des eaux. Thèse INRA-ENSA-Univ. Rennes 1, 196 p.
- MEROT Ph., BRUNEAU P., 1993. Sensitivity of bocage landscapes to surfaces run-off : application of the Kirkby index. *Hydrol. Process.*, 7, 167-173.
- METTE R., SATTELMACHER B., 1994. Root and nitrogen dynamics in the hedgerow – field interface. Consequences for land use management. In *proceedings of the 7th Inter Symp of CIEC ; Agroforestry and land use change in industrialized nations*, Berlin, Humboldt university, 275-284.
- QUINN P., BEVEN K., LAMB R., 1995. The $\ln(a/\tan b)$ index : how to calculate it and how to use it within the topmodel framework. *Hydrol. Processes*, 9, 161-182.
- SQUIVIDANT H., 1994. Mntsurf : logiciel de traitement des modèles numériques de terrain. Technical report, *Doc ENSA Rennes*, 36 p.
- THENAIL C., 1996. Exploitations agricoles et territoire(s) : contribution à la restructuration de la mosaïque paysagère. Thèse Université de Rennes 1, 382 p.
- WHARTON G. 1994. Progress in the use of drainage network indices for rainfall-runoff modelling and runoff prediction, *Progress in Physical Geography*, 18, 539-557.
- WOLOCK D.M., McCABE Jr, G.J., 1995. Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL, *Water Resour. Res.*, vol. 31, 945-955.
- ZHANG X., 1995. *Development of drainage network and study of hedgerow network*. INRA Rennes, 23 p.

SUMMARY

In Brittany, the bocage is the typical landscape, a network of hedgerows planted on an earthen bank. It could play a hydrological role by modifying the water pathways. This was studied by analysing the modification of the drainage network at the catchment scale, for 5 densities of the hedgerow network. The drainage network, basically controlled by the topography, was modified taking into account the hedges, which cannot be crossed by the water pathway. The digital elevation model and a vector map of hedges were the data used.

The impact of hedgerows on different parameters influencing surface runoff was tested. The main modification is that a part of the catchment, up to 40% of the total area, is disconnected from the river course due to the presence of hedges acting as sinks. A reduction of the surface runoff length and a decrease of the slope of the pixel-hedges in the drainage direction are also measured. But none of these factors is dependent of the hedgerow density, which appears as a poor descriptor of the hydrological buffer capacity of the bocage landscape. We draw attention to the need to take into account the hedgerow structure for hydrological purposes, in order to improve the new policy of re-building a bocage landscape that is currently being implemented.

Key-words: *hedgerow, hortonian surface runoff, DEM, hydrological modeling.*

The "bocage" landscape in Brittany, like the typical landscape of Schleswig-Holstein, Germany (METTE & SATTELMACHER, 1994), is a patchwork of fields enclosed by a network of hedgerow bank and ditches. The banks consist of earthen walls 1-2 m high and are generally planted with hedgerow trees. Large local variations in the pattern of the bocage landscape are observed within Brittany as a result of different climatic, agricultural (BUREL, 1996) or cultural conditions (FLATRES, 1976).

Many scientists have emphasized the interest of various aspects of a bocage network. From an ecological point of view, it is a corridor for biota (BUREL & BAUDRY 1994), in soil science, it acts as a barrier against erosion (CARNET, 1978), agricultural as a shelter for farm animal or windbreak for culture, and cultural as an evidence of the past and a handsome landscape. In spite on this, the development of intensive farming involved an important destruction of hedges and banks (200 000 km on 28 000 km²) during the last decades. But a new policy of rebuilding this network begins, attempting to take into account the environmental interest of hedgerows in landscape management, requiring knowledge on bocage characterization and functioning. From a hydrological point of view, it has been little studied in spite on the considerable interest of hedgerows on water resource management and conservation, as many studies on contour hedgerow systems have emphasized (AGUS *et al.*, 1997; ALEGRE & RAO 1995).

1 – BRIEF REVIEW ON THE HYDROLOGICAL INFLUENCE OF THE BOCAGE LANDSCAPE

Bocage and soils: The impact of banks on soils is different according to their location in the landscape (CARNET, 1978; METTE & SATTELMACHER 1994; BAFFET 1984). A bank parallel to the contour lines provides a differentiation between soils up and downslope side (*figure 1*). Upslope, eroded organic material is trapped; conversely, downslope, erosion takes place; therefore, a difference in height frequently occurs between each side of the bank. That may lead to the creation of treads and risers (total submergence of the bank by deposits). A bank parallel to the slope has no effect on soil erosion. Within the bank itself, high macroporosity develops as a result of the biological activity, the tree root systems, and absence of tillage practices. The material forming the bank is chemically impoverished, due to leaching, and the whole bank shows a high level of permeability (ESMENJAUD *et al.*, 1976; CARNET, 1978).

Bocage and the atmospheric phase of the water cycle: the impact of the bocage network on precipitation depends on the scale: while no modification of the rainfall amount at the catchment scale has been proved, a large heterogeneity of the rainfall due to a windbreak effect has been observed (MEROT, 1978) at the field scale. The effect of hedgerow on evapotranspiration has been theoretically and experimentally shown in Mediterranean and semi-arid climates. Conversely, under humid and temperate conditions, it has been shown (GUYOT & SEGUIN, 1976) both at the field and at the catchment scales, that the bocage has a limited effect, estimated at around 5%, for potential and actual evapotranspiration (PET and AET). This small effect is due mainly to the high air humidity. Nevertheless, at the bank scale, the water content around and under the bank is very low in summer, due to the more important AET of the trees than of the surrounding crops. Hedges introduce a heterogeneity of the AET inside the catchment.

Bocage and rainfall-runoff events: a monitoring study carried out on two similar catchments (MEROT, 1978), but differing by the presence or absence of hedgerows, shows that the runoff yield and the peak runoff of frequent floods may be 1.5 to 2 times larger in the catchment without bocage than in the other. For the bocage catchment, the runoff coefficient is stable during the year around 0.05, but it varies between 0.05 to 0.15 for the other. During the wet season, the flood factors are not the same: the surface runoff volume depends only on the amount of precipitation in the bocage catchment; it depends on the wetness of the soils, the amount and the intensity of precipitation in the other one (MEROT, 1978).

Some assumptions have been put forward to explain the different responses of the two landscapes. The two main processes for surface runoff are saturated and return flow on contributive zones (KIRKBY, 1978; BEVEN & WOOD, 1983; Merot, 1988) and hortonian overland flow (infiltration excess runoff). The first one does not depend on the rain intensity, but only on the amount while the latter occurs when rain intensity exceeds soil infiltration capacity. When the valley bottom is completely enclosed by a bank, the surface runoff would mainly be generated by the contributive zone connected to the river and the extension of the zone is limited inside this bottom land and varies little. This assumption has been checked by MEROT and BRUNEAU (1993) by modeling a theoretical bocage catchment. In bocage landscape, when hedges constitute a continuous network, the hortonian overland flow (infiltration excess runoff) may occur on hillslope but cannot reach

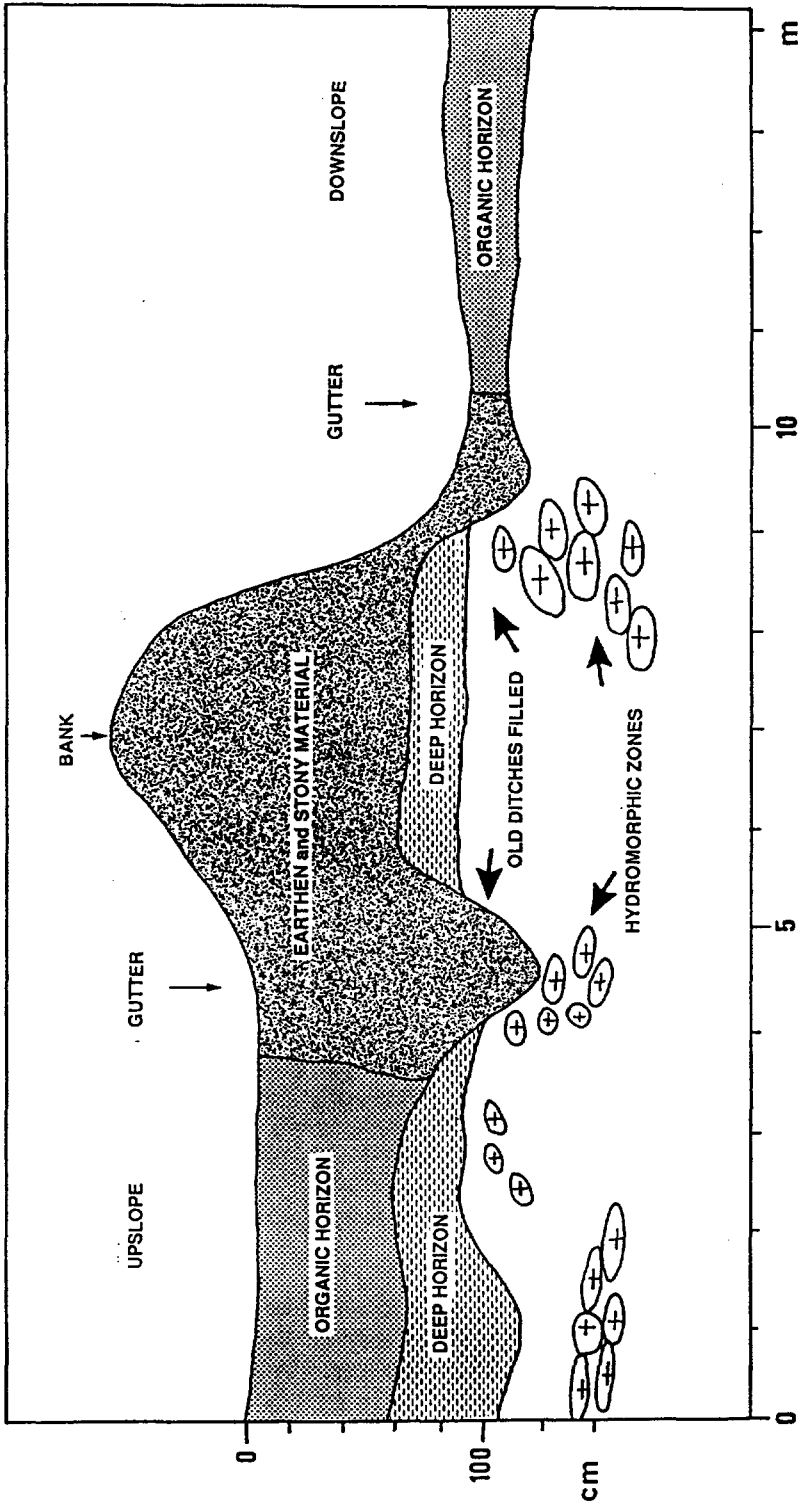


Figure 1 Typical pedological section of a bank (from Carnet, 1978, simplified).
Coupe de sol à travers un talus (d'après Carnet, 1978, simplifié).

the river directly. Conversely, in a catchment without bocage, hortonian overland flow may reach the river. As it was observed on the catchment without bocage, this flow varies with soil wetness and rain intensity. No study has been performed on the impact of bocage landscape during extreme events, but it can be assumed that the proportion of hortonian runoff will increase and that the hedges parallel to contour lines will enhance this effect.

In summary, the two main consequences of the bocage network are to increase the spatial heterogeneity of the organization and state (soil, rain, AET, soil water content) of the catchment and to modify the flowpaths of surface water. The current need is to quantify the impact of the whole bocage network on surface water movement. Hedgerows are not always continuous and their spatial distribution and structure are quite variable because they are also not always parallel to contour lines or topographic slopes. Therefore, in regions where it occupies important areas, we need to integrate the actual hedgerow network in spatially distributed hydrological models. In a first paper (MEROT & BRUNEAU, 1993), the role of the hedges surrounding bottom land on the saturation and return flow has been modeled. Hortonian overland flow is increasing, due to increasing amount of surface covered by maize, that implies soil surface naked and packed in winter. Therefore, in this paper, we will consider the impact of the whole bocage network on the hortonian surface runoff, by studying the role of hedgerow on the drainage network and modeling it.

2 – MATERIAL AND METHODS

Definition of the drainage network: the drainage network is considered as the total set of surface flow pathways on the catchment area. Using a Digital Elevation Model, (DEM) the surface flow direction of each pixel is drawn according to the difference of elevation with contiguous pixels (DEPRAETERE, 1991, WHARTON, 1994). To define the pixel direction, two kinds of model may be used: the multiple direction model and the one direction model. The former assumes that runoff flows from a processing pixel in all downslope directions following a weighting algorithm (QUINN *et al.*, 1991; HOLMGREN, 1994; SQUIVIDANT, 1994); the latter assumes that runoff flows only along the steepest downslope gradient. In spite of the merit of the multiple direction model (AUROUSSEAU & SQUIVIDANT, 1995; WOLOCK & McCABE Jr, 1995), the one direction model was adopted in this work, because of its simplicity and convenience with respect to the purposes of the study. The watershed is then divided in two components: hillslopes and the hydrologic network. The limit is an empirical threshold for the drainage area contribution to a pixel. The value of 25 ha gives locally the best fit between the theoretical hydrologic network and the actual river course.

In a bocage landscape, the surface flow pathway on hillslopes is modified when it crosses a bank. It has to follow the direction of the bank until a sink, where it ends, or until a break in the bank where it can go downslope. If the bank is parallel to the contour line, it immediately ends. This allows to build a new drainage network, called anthropic drainage network that can be compared to the previous topographic drainage network.

The consequences of the anthropic drainage network are mainly threefold: 1) The topographic drainage network, that was continuous down to the outlet of the catchment is replaced by a discontinuous network; 2) parts of the catchment drain to sinks and become disconnected from the river, and 3) water does infiltrate at sinks. The length of potential surface runoff, defined as the length of the drainage pathway until its lowest point, was previously the length of hillslope while it can now correspond to the length until a sink on the slope. Lastly, the slope of the water pathway following the hedges is less than the topographic slope.

A computer program has been developed in C language to determine the drainage network according to the topography and then to modify the network according to the hedges (ZHANG, 1995). The DEM of all the catchments have been calculated at a 20 m pixel size after rasterization of a 1/5 000 topographic map. The choice of the size was made after some attempts with DEM with a larger pixel size that gave bad results due to the discrepancy between the width of hedges and the size of the pixel. We detail here only the part of the program specific to the hedges.

1) The first step is to *define the pixels of the DEM crossing a hedge*, called hedgerow pixels. A map of hedges identified by aerial and field surveys, available in vector format, is surimposed to the topographic matrix. However, the width of the hedgerow pixel line, often covering 2 pixels, is larger than the width of the vector hedgerow. To limit the width of the hedgerow line to only one pixel, a treatment analogous to skeletisation is performed (*figure 2*).

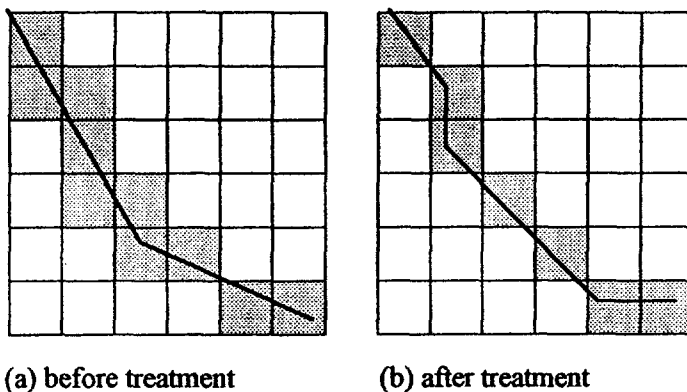


Figure 2 An example of a hedgerow image. The grids express pixels. The solid lines express hedgerows. The pixels, through which a hedgerow passes, are shadowed.

Exemple d'une haie. La grille représente les mailles. La ligne en grisé représente les haies. Les mailles traversées par une haie sont grisées.

2) *The direction of hedgerow pixels is modified (figure 3)*. The drainage direction of a hedgerow pixel is modified and oriented towards the contiguous lower pixel along the hedgerow. When two flow directions converge to the same point, this point is defined as a sink pixel. Nevertheless, a topographic undulation along the hedgerow may occurred due to the lack of precision of the DTM: the main flow

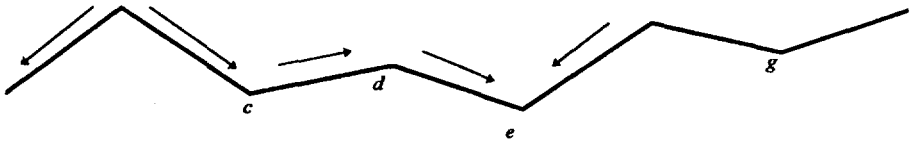


Figure 3 The sketch of pixel elevations and directions along a hedgerow. Arrows mean the direction determined by the method using a threshold (in this case, the elevation difference between c and d is lower than the threshold). The point e and g are sinks.

Schéma de la dénivelée des mailles et des directions imposées le long d'une haie. Les flèches indiquent la direction déterminée en utilisant un seuil (dans le cas présenté, la différence de niveau entre c et d est inférieure au seuil). Le point e et g sont des puits.

direction along the hedgerow is kept when the elevation difference is under a threshold, to avoid an erratic behavior. The chosen threshold was 0.5 m, based on tests and field expertise.

3) *The influence of the corners is taken into account.* The corners have to be identified to avoid wrong modification of the flow direction. As shown in figure 4, the flow direction oriented by the upper hedgerow has to follow the topographic direction after the corner and not the direction of the lower hedgerow. This problem was solved by artificially disconnecting the 2 hedges at the corner (figure 4c).

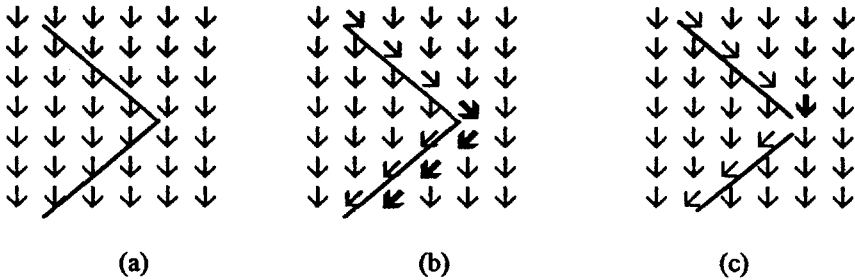


Figure 4 Disconnecting hedges at corners to avoid wrong modification of flow pathways. Drainage a) without hedge; b) with hedge without correction c) with hedge with correction.

Déconnexion des haies au niveau d'un angle pour éviter une modification erronée de la direction d'écoulement. Drainage a) sans haie; b) avec haie sans correction c) avec haie avec correction.

The test sites (table 1): Two sites were chosen: one is the 12 km² catchment of Coët Dan, in South Brittany where intensive studies take place (CURMI *et al.*, 1994; CANN, 1992). The climate is oceanic with a 11° mean annual temperature and 800 mm precipitation. The hedgerow network has been characterized in 1948 and 1992. 1948 corresponds to the maximum known bocage extension on this site. Between 1948 and 1992 the hedgerow network has been modified, with the



Photo 1 View of a bocage of medium density; North Brittany (origin: J. Baudry).
Vue d'un bocage de densité moyenne ; Nord de la Bretagne (source : J. Baudry).

Table 1 The features of the catchments.

Tableau 1 *Les caractéristiques des bassins versant.*

Catchment Bassin versant	Catchment area Superficie des bassins	Highest elevation Altitude maximum	Lowest elevation Altitude minimum	Mean elevation Altitude moyenne	Density of hedges Densité du bocage
	km ²	m	m	m	m/ha
Coët Dan 48	12.4	138.00	71.57	111.52	86
Coët Dan 92	"	"	"	"	39
A	2.2	113.56	75.15	96.99	196
B	3.7	102.42	7.48	34.79	160
C	3.8	76.40	12.70	34.78	69

construction of few hedgerows and banks, but mainly through the disappearance of many hedges and banks, following land consolidation and intensification of farming. The density of the bocage network has declined by a factor of more than 2, going from 86 m/ha in 1948 to 39 m/ha in 1992. This site allows to study the temporal evolution of the drainage network.

The second site is a set of three catchments (called A, B, C) near the village of Pleine-Fougères, in Northern Brittany (*photo 1*). The climate is oceanic with a 10° mean annual temperature and 900 mm precipitation. A comprehensive study of bocage is carried out on these catchments, representing three typical different densities of hedgerows (THENAIL, 1996). The site allows to study the impact of different bocage structures on the drainage network. It exhibits a large difference in density, ranging from 196 m/ha to 69 m/ha. Therefore, the site spans a wide diver-

sity of situation, from a dense bocage that could be considered as a testimony of the ancient landscape of bocage to a residual bocage.

3 – RESULTS AND DISCUSSION (table 2)

Modification of the drainage patterns (table 2; figure 5): The modification of the drainage network involves changes of the drainage area contribution to the pixels: for pixels upslope the hedgerow, the new network results in an increase of their drainage area, and conversely for downslope hedgerow pixels. The modification could be considerable. For instance, in catchment B of the site of Pleine Fougères, more than 90% of the drainage network is modified: 30.6% of pixels drain more pixels while 62.5% drain less. The catchment of Coët Dan, in 1992, that has the lower density of hedges has yet 10.2% of pixels that drain more pixels and 16.6 that drain less (a total of 26.8% of pixels modified). There is approximately twice as many pixels with a decrease in drainage area than pixels with an increase in drainage area. A correlation exists between the percentage of modified pixels and the density of hedges ($r = 0.86, 0.99$ and 0.92 respectively for increased, decreased or modified pixels).

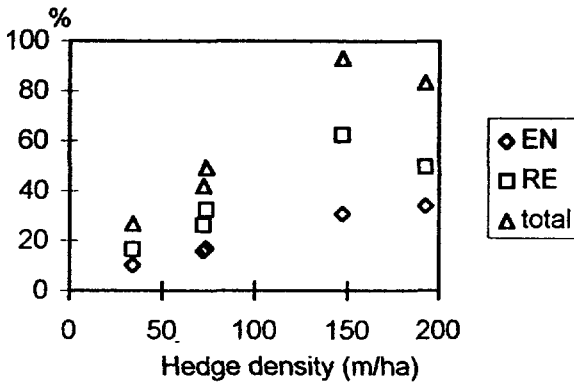


Figure 5 Percentage of pixels for which drainage has been modified by hedges versus the density of hedges; EN: Upslope area increasing; RE: upslope area decreasing; total: total of modification.

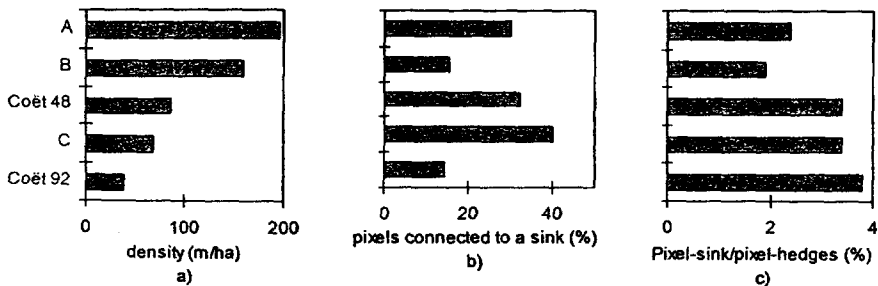
Pourcentage de mailles pour lesquelles le drainage a été modifié rapporté à la densité de haies. EN : accroissement de la surface drainée ; RE : diminution de la surface drainée ; Total : total des modifications.

Catchment area disconnected from the river course. The proportion of catchment area disconnected from the river course is expressed by the relative amount of pixels draining to a sink (table 2 and figure 6b). It varies from 14.2% to 40.1%, depending on the catchment. In the Coët Dan Catchment, the twofold reduction in bocage density from 1948 to 1992 results in a decrease from 32.1 to 14.2% of the disconnected area from the river course. However, for the whole set of the situa-

Table 2 The effect of hedgerow on different morphometric factors of drainage network**Tableau 2** Effet du bocage sur les caractéristiques morphométriques du réseau de drainage.

Site	Coët Dan	Coët Dan	A	B	C
Hedgerow networks in 1948, 1992 and 1994.	H 48	H 92	H 94	H 94	H 94
Hedgerow pixels : topographic slope Mailles haies : Pente topographique	% 4.2	3.9	2.8	3.9	2.7
Slope along the hedgerow Pente le long des mailles haies	% 2.9	2.7	2.2	2.7	1.9
Number of the pixels with a drainage area to these pixels enlarged Nombre de mailles où la surface drainée a été augmentée	pixel 4 909	3 157	1 899	2 836	1 629
Number of the pixels with a drainage area to these pixels reduced Nombre de mailles où la surface drainée a été réduite	pixel 8 118	5 129	2 778	5 796	3 098
The total amounts of the hedgerow sinks Nombre total de mailles-puits	pixel 107	57	37	40	32
The drainage areas of the hedgerow sinks Surface drainée par les mailles puits	pixel 9 914	4 397	1 678	1 441	3 833
The mean length of surface runoff without hedges Longueur moyenne de ruissellement sans haie	m 405	405	324	387	385
with hedges avec haies	m 348	375	293	388	346
Number of disconnected pixels (i.e. connected to a sink) on total amount of pixels Proportion de mailles déconnectées du ruisseau sur l'ensemble des mailles	% 32,1	14,2	29,9	15,5	40,1

tions, there is no relationship between the density of hedges and the relative area disconnected from the river course (*figure 6a* and *6b*). Neither is there a relation between the relative number of pixels-sinks and the relative area of catchment connected to a sink (*figure 6b* and *6c*). Basically, the structure of the hedgerow network (i.e. the connexity of hedges and the location of some hedges acting as sink on major flow lines) should be the most relevant parameter to explain the area disconnected from the river course by hedgerow. The site A, despite its high density of hedges, has a relatively low percentage of hedges acting as sinks, and

**Figure 6** Effect of hedgerow network on the drainage network in regard to the density of the hedgerow network.

Effet du bocage sur le réseau de drainage confronté à la densité du réseau de haies.

therefore the relative area disconnected from the river is surprisingly low due to many breaks through hedges.

Reduction of the potential surface runoff length: the potential surface runoff length is defined as the length of the hillslope when hedges are not taken into account, and as the length of each segment of slope – from the crest to an hedge, between two hedges or from an hedge to the river course –, always in the drainage direction, for catchments with hedges. The presence of hedges involves an average reduction of the surface runoff length from 0 to 50 m, for a mean hillslope length comprised between 350 and 410 m (figure 7a). The relative reduction is not related to the density of hedgerows. It seems slightly related to the relative area of catchment disconnected from the river course (figure 7b). The reduction of mean surface runoff length in the Coët Dan Catchment is only 27 m, between 1948 and 1996 while the density has dropped from 86 to 39 m/ha.

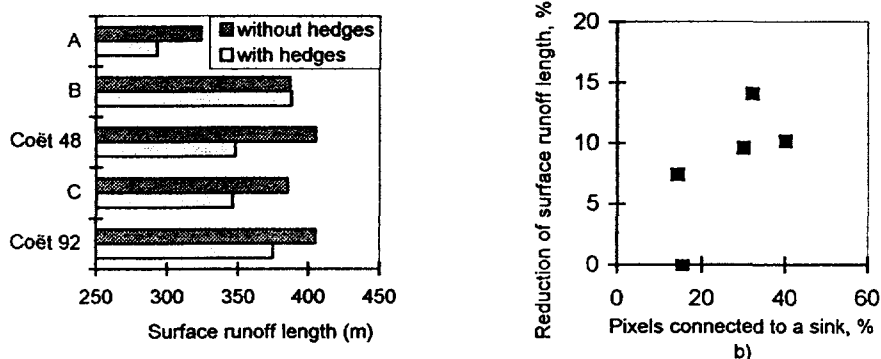


Figure 7 Effect of Hedgerow network on the mean surface runoff length: a) comparison between slopes with and without hedge; b) relation between the relative number of pixels connected to a sink and the relative reduction of surface runoff length.

Effet du réseau de haies sur la longueur moyenne de ruissellement. a) comparaison entre les pentes avec et sans haie ; b) relation entre l'abondance relative de mailles connectées à un puits et la diminution relative de la longueur de ruissellement.

This mean effect is the result of a change in the distribution of the surface runoff length, as it is shown for the Coët Dan Catchment (figure 8). Long hillslopes (over 500 m long) are fragmented to shorter hillslope segments by hedges. This fragmentation is shown by an increase of the proportion of segments with a length under 250 m. The presence of surface runoff length between 250 and 500 m remains the same for all three situations. The longest lengths (> 1 000 m) keep nearly the same occurrence. These longest lengths correspond in fact to parts of the actual river course that have been considered as hillslopes by the method upper described (see § Definition of the drainage network), and river courses are never crossed by hedgerows.

Slope of hedge-pixels in the drainage direction. The modification of the drainage direction for the hedge-pixels involves a decrease of the value of the slope angle (figure 9). The correlation between the mean value of the slope for these pixels and

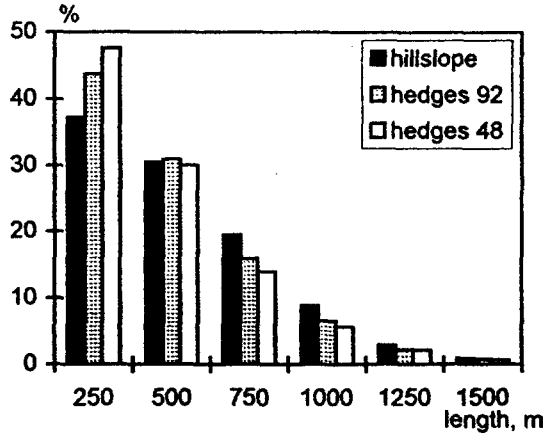


Figure 8 The distributions by class of drainage distances from pixels to the river or hedgerow sinks in Coët Dan Catchment. The length is the upper limit of each class.

Distribution par classe de la distance de ruissellement sur le bassin du Coët Dan. La longueur indiquée est la limite supérieure de la classe.

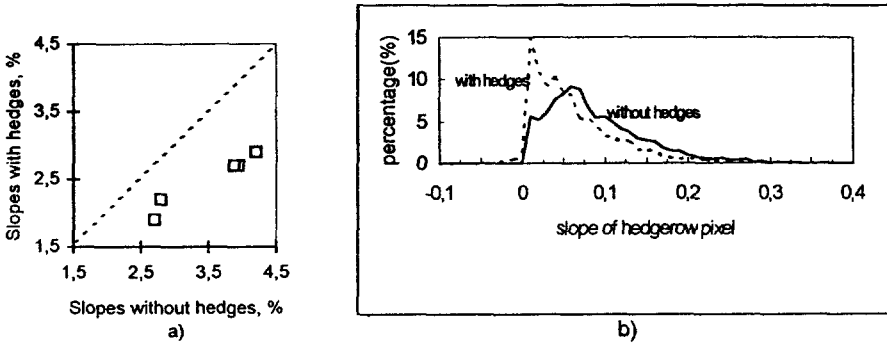


Figure 9 Relation between the slope in the drainage direction for pixel- hedges with and without hedges. a) mean values; b) distribution of the values for the Coët Dan catchment.

Relation entre la pente dans la direction de drainage pour les mailles-haies avec et sans haies a) valeurs moyennes ; b) distribution des valeurs pour le bassin du Coët Dan.

the value of the topographic slope (figure 9a) is fairly good (slope without hedges = 0.57 * slope with hedges + 4.54; r = 0.96). The distribution of the drainage slope for these hedge-pixels is quite different from the distribution of the topographic slope (figure 9b). This is shown for the Coët Dan catchment. The distribution is highly skewed with a maximum of values centered around 0.01 degree, while the topographic slope was centered around 0.075. Some slopes are negative, due to the threshold value imposed to choose the drainage direction.

The bocage network changes the hydrological features of the catchment: large modification of drainage patterns, disconnection of catchment area from the river course up to 40% favoring upslope infiltration at sinks, a decrease of the potential surface runoff length, a decrease of the drainage slope for the hedge-pixels. All these modifications lead to increase the residence time at the catchment scale; bocage is often considered as a water buffering landscape. Nevertheless, the ancient structure and density of the bocage landscape, created for multiples purposes but hydrological, does not guarantee this water buffering capacity. Conversely, some bocage landscape with quite a low density of hedges may have a good capacity to control water pathways, as in the catchment C of Pleine Fougère. For this site, the hydrological impact of the hedgerow network was taken into account in landscape transformation that occurred during the recent land consolidation. Finally this study clearly shows that the density of hedgerow network is a poor predictor of the hydrological buffering capacity of the bocage.

4 – CONCLUSION

The bocage, a landscape structured by an hedgerow network has a major effect to disconnect parts of the hillslopes from the river course, between 40 to 15%, even for a residual bocage (39 m/ha). Therefore it is an efficient barrier against surface runoff and it acts as a buffering structure against hydrological events. However, the ancient structure of bocage may be improved by taking into account the hydrological effect. While the density of hedges is often the only parameter available to assess the status of the bocage landscape in management approach, we have to draw attention on the necessity to take into account the structure of the bocage landscape for hydrological purposes: i.e. insure the connectivity of hedges parallel to contour lines and the location of some hedges on major flow lines. More over, the construction of new bocage has to consider its hydrological interest.

While the hedges surrounding valley bottoms seem to play an important role for regulating frequent hydrological events, the whole bocage landscape could act as a control of extreme events when surface runoff is important.

The approach used here could be useful to study the interaction of any landscape linear structure with topography in distributed hydrological modeling.

REFERENCES

- AGUS F., CASSEL D.K., GARRITY D.P., 1997. Soil-water and soil physical properties under contour hedgerow systems on sloping oxisols. *Soil & tillage res.*, 40, 185-199.
- ALEGRE J.C., RAO M.R., 1995. Soil and water conservation by contour hedging in the humid tropics of Peru. *Agric. Ecosystems and Environment*, 57, 17-25.

- AUROUSSEAU P., SQUIVIDANT H., 1995. Role environnemental et identification cartographique des sols hydromorphes de bas fonds – cas du bassin versant de la rade de Brest, Le programme rade – 3^e rencontres scientifiques internationales, 110-123.
- BAFFET M., 1984. Influence de la haie sur l'évolution des caractères physico-chimiques et hydrodynamiques des sols. Thèse univ Limoges 173 p.
- BEVEN K., WOOD E.F., 1983. Catchment geomorphology and the dynamic of runoff contributing areas. *J. Hydrol.*, 65, 139-150.
- BUREL F., 1996. Hedgerows and their role in agricultural landscapes. *Critical review in Plant sciences*, 15, 169-190.
- BUREL F., BAUDRY J., 1994. Control of biodiversity in hedgerow network landscapes in western france. *Hedgerow management and nature conservation*, Wye College Press, 47-58.
- CANN C., 1992. Tools for budgeting nutrient transfers in agricultural catchments in *Methods of hydrological basin comparison*, M. Robinson ed., Institute of hydrology Wallingford, report 120, 64-71.
- CARNET C., 1978. Étude des sols et de leur régime hydrique en région granitique de Bretagne: une approche du rôle du bocage. Thèse Univ Rennes, UER Sciences Biologiques, mention Agronomie, 235 p.
- CURMI P., DURAND P., GASCUEL-ODOUX C., HALLAIRE V., MEROT PH., ROBIN P., TROLARD F., WALTER C., BOURRIÉ G., 1995. Le programme Cormoran-INRA: De l'importance des facteurs du milieu physique et de son aménagement dans le contrôle géochimique de la teneur en nitrate des eaux superficielles *Journal Européen d'Hydrologie*, tome 26, fasc 1, pp. 37-56.
- DEPRAETERE C., 1991. LAMONT – Logiciel d'Application des Modèles Numériques de Terrain, *Technical Report of Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération – Notice OVNlh du laboratoire d'hydrologie #4*.
- ESMENJAUD M., ESTEOULE J., GUYADER J., 1976. Étude pédologique des différents types de talus: considérations sur la différenciation des profils; essai de systématique. in *Les bocages: histoire, écologie, économie*, Missonier [ed.], INRA Rennes 167-176.
- FLATRES P., 1976. Géographie: rapport de synthèse in *Les bocages: histoire, écologie, économie*, Missonier [ed.], INRA Rennes, 43-48.
- GUYOT G., SEGUIN B., 1976. Influence du bocage sur le climat d'une petite région in *Les bocages: histoire, écologie, économie*, Missonier [ed.], INRA Rennes, 121-130.
- HOLMGREN P., 1994. Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: an empirical evaluation, *Hydrol. Process.*, vol. 8, 327-334.
- KIRKBY M.J., 1978. Hillslope hydrology. John Wiley and sons, Chichester. 389 p.
- MEROT PH., 1978. Le bocage en Bretagne granitique: une approche de la circulation des eaux. Thèse INRA-ENSA- Univ Rennes 1, 196 p.
- MEROT PH., BRUNEAU P., 1993. Sensitivity of bocage landscapes to surfaces run-off: application of the Kirkby index. *Hydrol. Process.*, 7, 167-173.
- METTE R., SATTELMACHER B., 1994. Root and nitrogen dynamics in the hedgerow – field interface. Consequences for land use management. In *proceedings of the 7th Inter Symp of CIEC; Agroforestry and land use change in industrialized nations*, Berlin, Humboldt university, 275-284.
- QUINN P., BEVEN K., LAMB R., 1995. The $\ln(a/tanb)$ index: how to calculate it and how to use it within the topmodel framework. *Hydrol. Processes*, 9, 161-182.
- SQUIVIDANT H., 1994. Mntsurf: logiciel de traitement des modèles numériques de terrain. Technical report, *Doc ENSA Rennes*, 36 p.
- THENAIL C., 1996. Exploitations agricoles et territoire(s): contribution à la restructuration de la mosaïque paysagère. Thèse Université de Rennes 1, 382 p.
- WHARTON G. 1994. Progress in the use of drainage network indices for rainfall-runoff modelling and runoff prediction, *Progress in Physical Geography*, 18, 539-557.
- WOLOCK D.M., McCABE Jr., G.J., 1995. Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL, *Water Resour. Res.*, vol. 31, 945-955.
- ZHANG X., 1995. *Development of drainage network and study of hedgerow network*. INRA Rennes, 23 p.