

ANNEXES

Annexe A-1	Quelques rappels d'hydrologie	78
Annexe A-2	Fonction d'atténuation hydrique des zones tampons	94
Annexe A-3	Fonction de rétention des matières en suspension	108
Annexe A-4	Fonction de limitation du transfert du phosphore	125
Annexe A-5	Fonction de limitation du transfert hydrique des produits phytosanitaires	135
Annexe A-6	Fonction de limitation du transfert de l'azote	152
Annexe A-7	Fonction de protection contre la dérive de pulvérisation des produits de traitement	164
Annexe A-8	Fonction de préservation de la qualité biologique des cours d'eau	171



QUELQUES RAPPELS D'HYDROLOGIE

1. Le devenir de l'eau de pluie interceptée par la surface du sol

1.1. Les voies de transfert

Le sol intercepte l'eau de pluie et la stocke temporairement. Cette eau accumulée peut repartir vers l'atmosphère sous forme gazeuse, par évaporation à la surface du sol ou par la transpiration des végétaux : l'ensemble de ces deux phénomènes constitue l'évapotranspiration (figure 1.1).

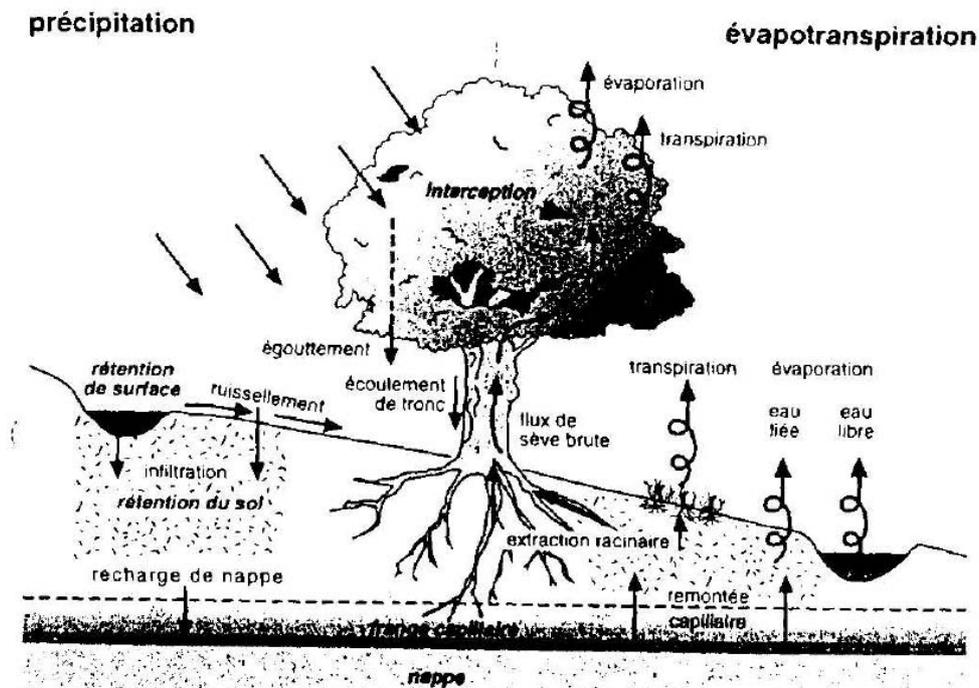


Figure 1.1 L'eau dans le système sol-plante-atmosphère : principaux processus et réservoirs (R. Ambroise, 1999)

Mais la perméabilité du sol et sa capacité de stockage ont des limites. Aussi, de l'eau liquide excédentaire peut être évacuée hors du « système sol » par différentes voies.

- Si l'intensité de la pluie excède la capacité d'infiltration de la surface du sol, l'eau excédentaire ruisselle vers l'aval : ce ruissellement par refus d'infiltration de surface est appelé « hortonien » (voir encadré 1.1).
- Si le volume d'eau infiltrée excède les capacités de stockage du sol et que le sous-sol est suffisamment perméable, cette eau excédentaire s'infiltré verticalement en profondeur.
- Si le sous-sol est imperméable ou insuffisamment perméable à plus ou moins faible profondeur, l'eau s'écoule latéralement : on parle d'écoulement « subsuperficiel » ou « hypodermique » (figure 1.2).
- Dans le même cas de figure, et si ce dernier type d'écoulement n'est pas en mesure d'évacuer toute l'eau en excès, alors le « système sol » déborde et il se forme de nouveau du ruissellement, cette fois par saturation. Voir l'encadré 1.1 pour plus de détails.

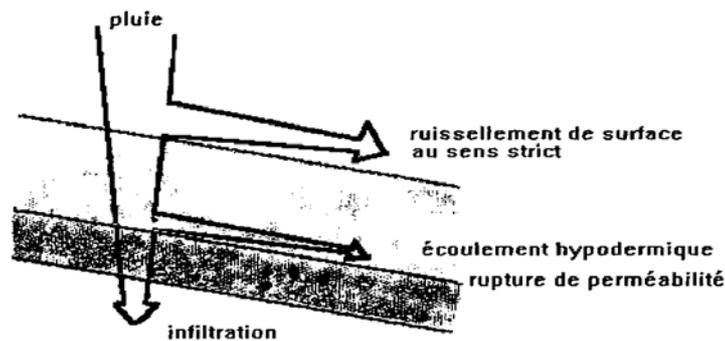


Figure 1.2.: Ruissellement de surface, écoulement hypodermique et infiltration (CORPEN, 1997)

Les composantes du cycle de l'eau

Les précipitations

Les précipitations atmosphériques constituent le principal apport d'eau pour le système étudié. Le régime climatique détermine pour une bonne part les potentialités agricoles d'un territoire.

L'évapotranspiration

Le retour à l'atmosphère de l'eau du système s'opère principalement par évapotranspiration (souvent supérieure à 50% des précipitations, selon les climats). Elle se fait sous forme de vapeur, par couplage des cycles de l'eau et de l'énergie. A tout moment et à tout endroit, le flux évapotranspiré a pour facteur limitant soit la quantité d'eau soit la quantité d'énergie, selon leurs disponibilités locales (Ambroise, 1999). L'évapotranspiration potentielle (ETP) est disponible dans certaines stations

du réseau MétéoFrance mais il est possible de dissocier l'évaporation (du sol) et la transpiration (de la végétation).

Le ruissellement

Le ruissellement constitue en fait le refus à l'infiltration. Il existe plusieurs formes de ruissellement (Ambroise, 1999 ; Auzet, 1987) :

. Ruissellement hortonien ou ruissellement par dépassement de l'infiltrabilité : ce ruissellement est généré par une forte intensité des apports d'eau, supérieure à la capacité d'infiltration du sol. Il est favorisé sur sol nu ou peu couvert, ou présentant une infiltrabilité très limitée.

. Ruissellement par saturation du sol : ce type d'écoulement se produit quand l'eau de pluie atteignant une zone saturée, ne peut s'infiltrer (capacité de stockage du sol réduite), et s'écoule à la surface, même si l'intensité de la pluie est inférieure à la capacité d'infiltration théorique du sol.

. Ruissellement par exfiltration, qui se produit quand le niveau de la nappe, alimentée par l'amont soit par des écoulements hypodermiques, soit par des écoulements souterrains, dépasse la surface du sol.

Infiltration et percolation

L'infiltration désigne le processus de pénétration de l'eau dans les couches superficielles du sol et l'écoulement vertical de cette eau dans le sol et le sous-sol, sous l'action des forces de gravité et de pression. La percolation représente le mouvement vertical profond dans le sol, en direction de la nappe phréatique. L'infiltration est nécessaire pour renouveler le stock d'eau du sol, alimenter les eaux souterraines et reconstituer les réserves des aquifères. Elle permet de plus de réduire les volumes d'eau écoulés en surface (Musy et Higy 2004). L'estimation de l'importance du processus d'infiltration permet de déterminer quelle fraction de la pluie va participer à l'écoulement de surface, et quelle fraction va alimenter les écoulements souterrains et donc aussi participer à la recharge des nappes souterraines.

Échange nappe / rivière

Les écoulements de subsurface peuvent rencontrer des zones saturées et du fait d'une topographie concave (notamment en fond de vallée), ressurgir à la surface du sol (exfiltration). Dans ce cas, l'eau aura d'abord transité dans le compartiment du sol avant de réintégrer les écoulements de surface.

Les échanges nappes rivières sont contrôlés par les gradients hydrauliques : en période de hautes eaux dans le sens rivière → nappe et inversement en période de basses eaux

1.2. Les facteurs de contrôle de la circulation de l'eau

De très nombreux facteurs influent sur ce partage et ses proportions. On insistera ici sur ceux qui sont plus spécialement en rapport avec les spécificités des zones tampons.

◆ Le sol et le sous-sol

Perméabilité de surface

La perméabilité de la surface du sol dépend avant tout de la structure de la couche superficielle et de la stabilité de cette structure sous l'effet agressif des gouttes de pluie. La stabilité structurale dépend de la texture du sol (la « battance » des sols limoneux, particulièrement fragiles) ; l'humus et certains cations (calcium) ont un effet stabilisant. Le couvert végétal protège la surface du sol et la végétation joue également un rôle favorable vis-à-vis de la perméabilité grâce à son système racinaire.

Le tassement, produit par les engins agricoles ou le surpâturage, peut très sensiblement limiter la perméabilité. Enfin, le travail du sol influe sur l'état de surface, en particulier la préparation du lit de semence ; en simplifiant, plus les graines sont petites, plus les agrégats qui constituent ce lit doivent également être petits, et donc plus facilement détruits par les gouttes de pluie.



C. Cedra / Cemagref

Le labour produit de grosses mottes ...



Kuhn

... que la préparation du lit de semences transforme en petites mottes, sensibles à l'action de la pluie

Mouvements subsuperficiels de l'eau

Le sol est constitué d'un empilage plus ou moins structuré de grains de tailles et formes diverses qui laissent des espaces vides entre eux et en font un matériau poreux. On distingue la microporosité, qui a des propriétés de rétention capillaire de l'eau et la macroporosité, où les mouvements de l'eau sont réglés par la gravité (voir encadré 1.2).

ENCADRE 1 - 2

La porosité

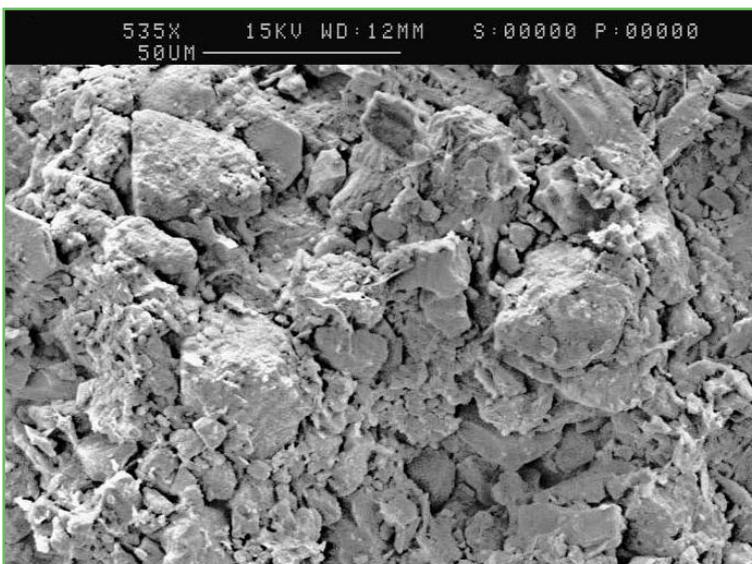
La microporosité est constituée par les pores du sol suffisamment petits pour que le mouvement de l'eau soit complètement contrôlé par la tension capillaire. Leur diamètre varie de quelques centaines à moins de 1 μm .

Les pores plus gros, où l'eau est soumise à la gravité constituent la macroporosité.

On peut distinguer plusieurs origines à la macroporosité :

- une texture grossière (cailloux, graviers, sables) où l'empilement des grains laisse des espaces suffisamment grands ;
- les fissures, formées par des processus chimiques ou physiques (fente de retrait dans les sols argileux) ;
- les pores formés par la microfaune du sol, généralement à proximité de la surface (prof. max. 1 m) ;
- les pores formés par la végétation, lors de la pénétration et colonisation par le chevelu racinaire ;

Dans les cas de pores formés par la microfaune et par la végétation, on pourra parler alors de bio-porosité.



Micro-agrégats et microporosité observés au microscope électronique à balayage

L'eau en excès par rapport à la capacité de stockage de la microporosité est ainsi susceptible de s'écouler gravitairement. Si elle stagne, faute d'évacuation suffisante, le milieu s'engorge et devient défavorable à la vie végétale (à l'exception des plantes adaptées aux milieux humides). Le début de l'apparition de cette eau excédentaire correspond à la « capacité au champ » ; quand la porosité totale est pleine d'eau, le sol a atteint la saturation.

Les plantes puisent dans la réserve microporeuse en vainquant les forces capillaires ; à partir d'un certain niveau de dessèchement, elles ne peuvent plus le faire et flétrissent. La différence de capacité entre le remplissage de la capillarité (« capacité au champ ») et ce point de flétrissement constitue la « réserve utile » (RU).

Outre l'épaisseur du sol réellement accessible aux racines des plantes cultivées, la texture contrôle l'importance de la RU : on retiendra le gradient :

$$RU(\text{sol argileux}) > RU(\text{sol limoneux}) > RU(\text{sol sableux})$$

L'exemple du tableau 1 illustre ce classement.

Par ailleurs, la richesse en humus augmente la RU (faiblement, de quelques mm).

Sable	70
Sable limoneux	100
Limon sableux	155
Limon moyen	180
Limon argileux	200

Tableau 1 RU (en mm ; 1mm = 10 m³/ha) pour un mètre de sol (Chambre d'Agriculture de l'Aisne)

L'eau « gravitaire » (en excès par rapport au remplissage de la RU), s'écoule spontanément vers le bas, tant qu'elle ne rencontre pas une couche suffisamment imperméable pour l'empêcher de progresser. Le cas échéant, il se produit un écoulement latéral dans le sens de la pente à une profondeur commandée par le niveau d'apparition de cette couche imperméable.

En première approximation, on distinguera :

- ◆ les écoulements verticaux en profondeur : c'est l'infiltration dans le sol, puis le sous-sol, jusqu'à une nappe souterraine plus ou moins profonde (qui, elle-même, s'écoule latéralement) ;
- ◆ les écoulements latéraux subsuperficiels qui concernent la tranche de sol.

Au sein du sol à proprement parler, la perméabilité est souvent hétérogène et varie en fonction des propriétés des horizons. Pour ce qui concerne les mouvements de l'eau, la limite entre sol et sous-sol n'est pas toujours évidente (encadré 1.3)



Sol et sous-sol

ENCADRE 1 - 3

On peut dire assez simplement que le sol est la très fine couche de surface de l'écorce terrestre qui participe directement au fonctionnement de la biosphère : il s'agit d'un matériau meuble où s'exerce une activité biologique significative. En dessous d'une profondeur de 1 à 2 m (dans le meilleur des cas) cette activité disparaît. Cette définition est plus large que celle des agronomes pour qui le sol est l'épaisseur habituellement travaillée. Dans le cas des techniques sans labour, le sol se rapproche de la définition ci-dessus.

Ce critère est bien adapté, pour ce qui nous concerne, au cas des substances dont le devenir est fortement conditionné par l'activité biologique : en particulier les composés azotés et les produits phytosanitaires, comme on le verra plus loin. Par contre, la question des mouvements de l'eau demande à être un peu précisée.

La précédente définition du sol s'applique clairement quand ce dernier s'appuie sur un substrat bien différencié et représentant une discontinuité nette : roche dure, argile à silex, altérite argileuse de schiste, par exemple. En revanche, quand le substrat est lui-même poreux et est le siège de processus capillaires, il intervient dans la constitution de la RU : sols formés sur un substrat limoneux, arènes granitiques, roches tendres (craie, par exemple) ; toutefois, celle-ci est avant tout définie par la profondeur d'enracinement.

(1) Pour ce qui concerne la caractérisation et les propriétés des sols cultivées, on se référera utilement à Hénin et al. (1969).

Infiltration rapide et lente

L'infiltration dans la microporosité est lente et permet un contact intime entre l'eau et le matériau du sol : cette situation est favorable à la rétention, aux échanges et à la dégradation éventuelle des substances contenues dans l'eau. En revanche, la circulation dans la macroporosité a les propriétés inverses. Un sol à caractère microporeux dominant aura donc un bon pouvoir épurateur, en revanche, il sera moins apte à évacuer les excès d'eau qu'un sol plus macroporeux.

La vitesse d'infiltration dans le sol à la saturation est la conductivité hydraulique. Le tableau 2 donne, à titre d'illustration des ordres de grandeurs de cette conductivité en fonction des matériaux minéraux constitutifs du sol.

Ks(m/s)	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Soit environ en cm/h :		400	40	4	0,4	0,04				
Perméabilité	Perméable			Semi-perméable		Imperméable					
Types de sols	gravier sans sable ni éléments fins		sable avec gravier sable grossier à sable fin		sable très fin limon grossier à limon argileux			argile limoneuse à argile homogène			
Infiltration	Excellente		Bonne		Moyenne à faible			Faible à nulle			

Tableau 2 Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique dans divers sol (adapté de Musy et Soutter, 1991)

La relation entre débit d'infiltration et K_s est donnée par la loi de Darcy (encadré 1.4)

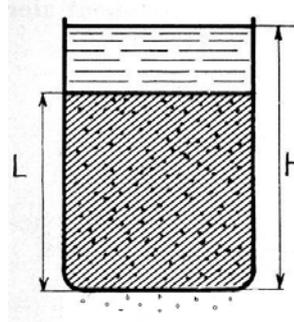
ENCADRE 1 - 4

La loi de Darcy

En condition de saturation, le débit à travers une colonne de sol est donné par la loi de Darcy :

$$Q = K_s.S.H/L$$

Où Q est le débit (m^3/s), K_s (m/s) la conductivité hydraulique, S (m^2) la section de la colonne, H (m) la charge hydraulique et L la hauteur de la colonne de sol saturé.



Cette conductivité hydraulique est une propriété hydrodynamique intrinsèque du matériau qui contribue à la perméabilité effective du sol. Cette dernière intègre également le rôle d'autres facteurs : battance, fissuration, chevelu racinaire et travail du sol. La fissuration est influencée par l'humidité, particulièrement en sol argileux : le dessèchement l'accroît et, inversement en période humide, le gonflement des argiles peut la réduire sensiblement. Le travail du sol intervient périodiquement, d'une manière drastique, sur la perméabilité de l'horizon travaillé (20 –30 cm) en « l'ouvrant » (labour) et en « le refermant » (façons superficielles). Une « semelle » imperméable, due au lissage par la charrue, peut se former à la profondeur de labour. Plus rarement, les façons superficielles peuvent également engendrer une semelle à faible profondeur. Enfin, le tassement dû à la circulation des engins agit non seulement sur la surface du sol, mais aussi jusqu'à plusieurs décimètres.

Rôle de la pente

La pente influe directement sur la vitesse du ruissellement, mais seulement secondairement sur la proportion d'eau de pluie qui ruisselle. Elle intervient, par contre, sur la rapidité d'évacuation de l'eau excédentaire du sol par écoulement subsuperficiel : ainsi et toutes choses égales par ailleurs, plus la pente est forte, moins le ruissellement par saturation risque d'apparaître. Une illustration de cela est le fait que l'assainissement et le drainage agricoles sont rarement nécessaires sur les sols pentus.

◆ Le rôle du climat et son interaction avec les caractéristiques du sol et du sous-sol

L'intensité de la pluie est le principal facteur climatique qui contrôle le ruissellement de type hortonien. Toutefois, la hauteur des précipitations intervient indirectement (en combinaison avec l'intensité) en fournissant l'énergie cinétique qui conduit à la dégradation de la surface du sol et à l'apparition de la battance sur les sols à faible stabilité structurale (en particulier, les sols limoneux pauvres en argile et en humus). Sur ces sols, il n'est pas rare d'observer du ruissellement, du fait de la présence d'une croûte de battance, alors même que l'horizon sous-jacent est quasiment sec.

C'est la hauteur de précipitation qui conditionne la saturation des sols et la percolation verticale ou latérale. Quand un horizon imperméable est présent à faible profondeur (horizon d'accumulation d'argile dans le profil de sol, substrat rocheux ou argileux, semelle de labour,...), il peut se former une nappe « perchée » temporaire pendant la saison humide : le drainage agricole a pour vocation d'abaisser le niveau de cette nappe, nuisible aux cultures.



C. Guyot

Écoulement subsuperficiel
sur un horizon imperméable

La température et l'importance du développement végétal conditionnent ensemble l'évapotranspiration, qui réduit le stock d'eau du sol et donc le risque d'apparition d'eau excédentaire.

Ainsi, l'essentiel de la « recharge » des nappes phréatiques se produit pendant la période hivernale (de la fin de l'automne au début du printemps), période pendant laquelle la température est basse et la végétation absente ou peu active.

◆ La variation saisonnière de l'infiltration dans le sol

Ce qui précède conduit au constat d'une variabilité saisonnière de la capacité d'infiltration du sol, en rapport avec l'évolution de son humidité et de son état de surface.

Le travail du sol renforce cette variation naturelle. En particulier, en interférant avec le rythme des précipitations, le calendrier des façons culturales exerce une action très significative sur la dynamique hydrique du sol : on citera, à titre d'exemple, les différences observées sous cultures d'hiver ou de printemps ou encore la différence de comportement quand un orage se produit juste avant ou juste après la reprise d'un labour par les façons superficielles.

Ainsi, de multiples facteurs naturels et anthropiques interagissent pour conditionner la formation et la répartition de l'eau de pluie interceptée par le sol, dans des proportions diverses, en écoulement vertical (infiltration) et latéral (ruissellement et écoulement hypodermiques). Toutefois, du point de vue pratique qui nous intéresse ici, les nombreux cas de figure qui en découlent peuvent être ramenés à des grands types. C'est ce qui a été fait en particulier à l'occasion de la mise au point de la démarche de diagnostic phytosanitaire réalisée par le CORPEN (1999) sous forme d'une clé typologique. Cette clé, de valeur indicative générale à l'échelle nationale, est destinée à être adaptée et affinée au niveau local, ce qui a effectivement été fait depuis dans différents secteurs (exemples photographiques au chapitre 3).

Si cet outil de diagnostic a été mis au point au départ pour traiter le cas du transfert des produits phytosanitaires (et plus particulièrement des herbicides), il est néanmoins valable dans son principe pour caractériser l'ensemble des transferts hydriques de polluants, dans la mesure où il est fondé sur la description et la compréhension des mouvements de l'eau.

Signalons enfin que cette approche typologique reste qualitative, sans chercher à quantifier plus précisément les phénomènes en jeu. La modélisation permet d'aller plus loin dans ce sens, mais au prix d'une complexité incompatible actuellement avec les besoins du terrain.

2. La concentration progressive des écoulements dans un bassin versant

2.1. L'organisation du ruissellement

L'excès d'eau qui forme le ruissellement s'écoule tout d'abord d'une manière diffuse, pour se concentrer en s'organisant progressivement en un chevelu plus ou moins dense et plus ou moins rapidement (quelques dizaines à quelques centaines de mètres). La surface du territoire où toute l'eau qui s'écoule se rassemble en un point constitue un bassin versant (ou impluvium). A chaque point situé sur une voie d'écoulement correspond un bassin versant spécifique, dont la superficie augmente d'amont en aval (voir encadré 1.5).



QUELQUES RAPPELS D'HYDROLOGIE

ANNEXE A.1

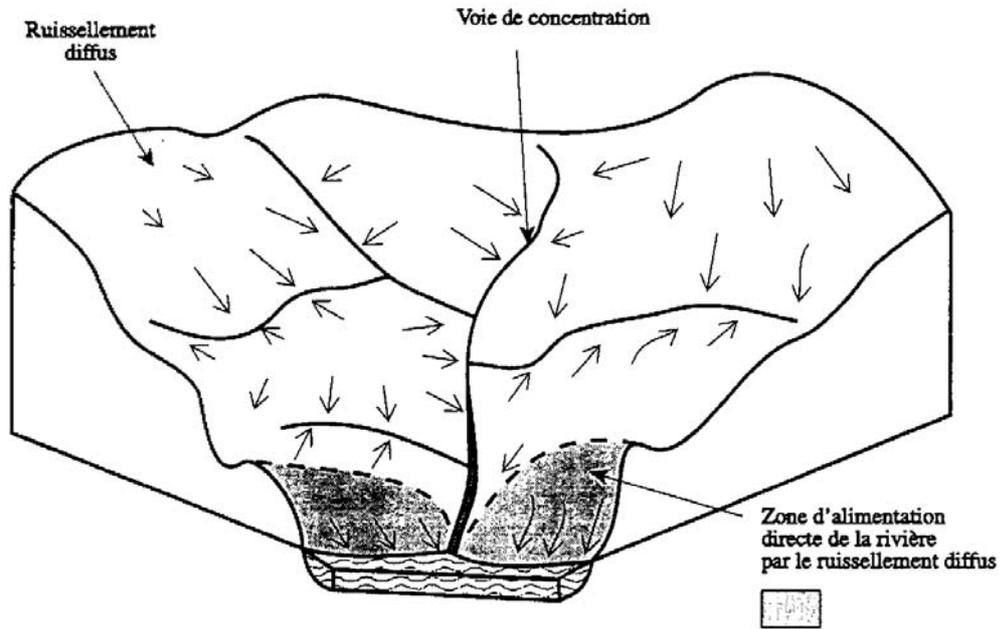


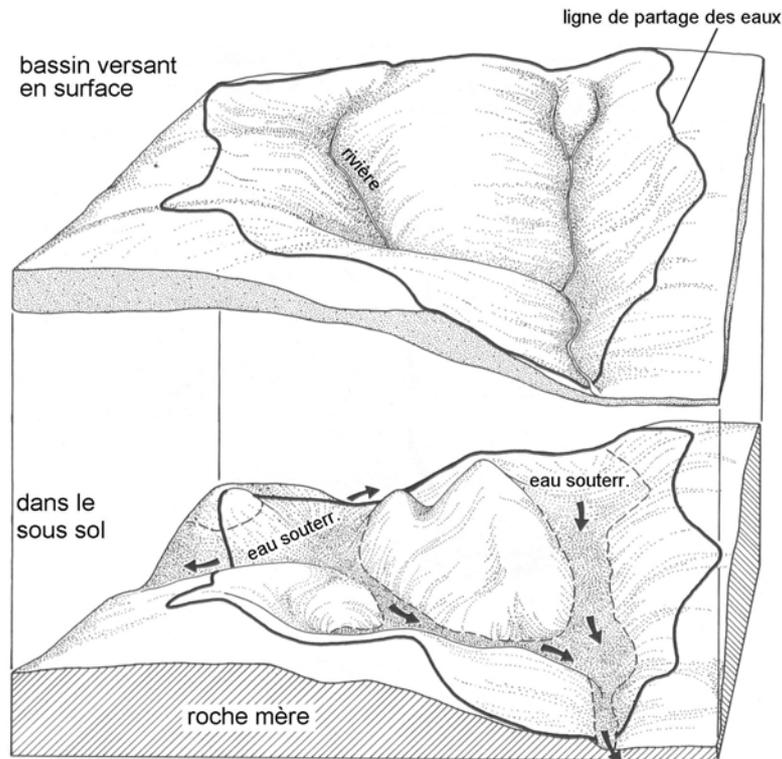
Figure 1.3 la concertation progressive du ruissellement en l'absence d'action humaine (CORPEN, 1997)

En l'absence de l'action de l'homme, c'est la topographie qui règle la concentration progressive de la circulation de l'eau (figure 1.3). Les pratiques agricoles et l'aménagement du paysage rural perturbent ce schéma simple. Cette organisation apparaît à différentes échelles et se manifeste dès le départ.



Ruissellement concentré

Notion de bassin versant



Le bassin versant est défini comme l'étendue drainée par un cours d'eau et ses affluents et limitée par une ligne de partage des eaux (ou ligne de crête). Il correspond donc au territoire alimentant un cours d'eau : toute goutte d'eau de pluie qui y tombe est susceptible (à moins qu'elle ne soit utilisée en chemin par les plantes par exemple) de s'écouler par gravité dans la rivière. Parfois, la complexité du sous-sol fait que des zones situées pourtant au-delà des limites topographiques du bassin (c'est-à-dire à l'extérieur de la ligne de partage des eaux) contribuent à l'alimentation de la rivière ; et inversement, des zones situées sur le bassin peuvent s'écouler vers une autre rivière. On définit alors un bassin versant hydrogéologique.

Adapté de Andreassian (2005).

◆ Le rôle du travail du sol et du parcellaire

Le travail du sol crée un modelé qui constitue un micro-relief plus ou moins marqué : depuis la simple ligne de semis jusqu'au buttage des pommes de terre. Les traces de roues constituent également des micro-chenaux dont le rôle est renforcé par l'imperméabilisation due au tassement.

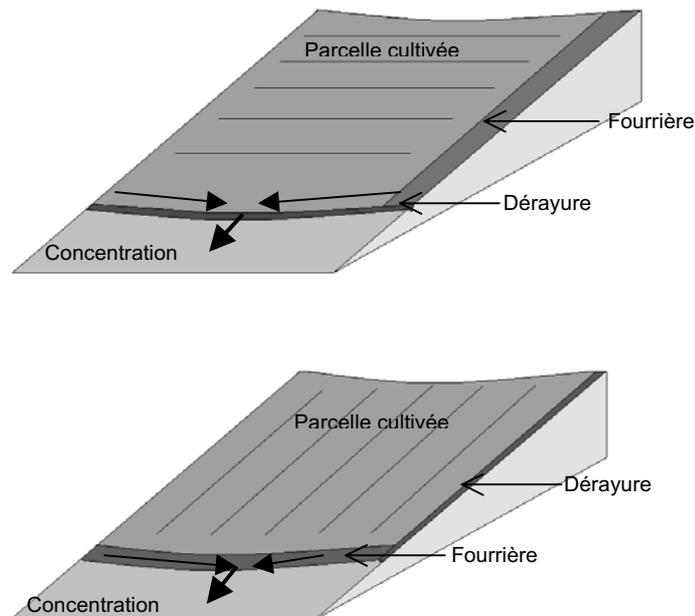
A l'échelle de la parcelle entière, apparaissent les discontinuités formées par la dérayure ou la tournière (ou fourrière).

L'importance du rôle joué par ces éléments dépend à la fois de leur orientation par rapport à la pente locale et du degré de cette dernière.

QUELQUES RAPPELS D'HYDROLOGIE

ANNEXE A.1

Dans la majorité des situations, les parcelles ne sont pas planes, surtout les grandes : elles incluent fréquemment un vallon (ou plusieurs) plus ou moins marqué dont le rôle sur la concentration se combine avec celui des précédents éléments. Ainsi, on peut se demander si le ruissellement diffus ne se réduit pas à une notion théorique (figure 1.4) – en dehors du cas d'une prairie naturelle plane.



*Figure 1.4 Rôle des fourrières et dérayures
(Cemagref, 2004)*

En pratique, on peut plutôt distinguer un niveau de concentration faible (quand il suit les lignes de semis, les traces de roues, les dérayures) en l'absence de vallonement, d'un niveau de concentration plus ou moins élevé en sa présence. Cette distinction présente un intérêt pour les zones tampons, comme on le verra un peu plus loin.

◆ Le rôle des espaces interstitiels et de l'aménagement du paysage

Les espaces interstitiels non cultivés qui entourent les parcelles agricoles et les différents aménagements qui sont présents dans l'espace rural jouent un rôle direct ou indirect vis-à-vis du ruissellement émis par les parcelles agricoles :

- en le concentrant ou en le dispersant ;
- en l'accéléralant ou en le ralentissant ;
- en le réduisant, pour certains, en favorisant l'infiltration.

La figure 1.5 (tirée de CORPEN, 1997) présente quelques éléments fréquents qui jouent ce type de rôle.

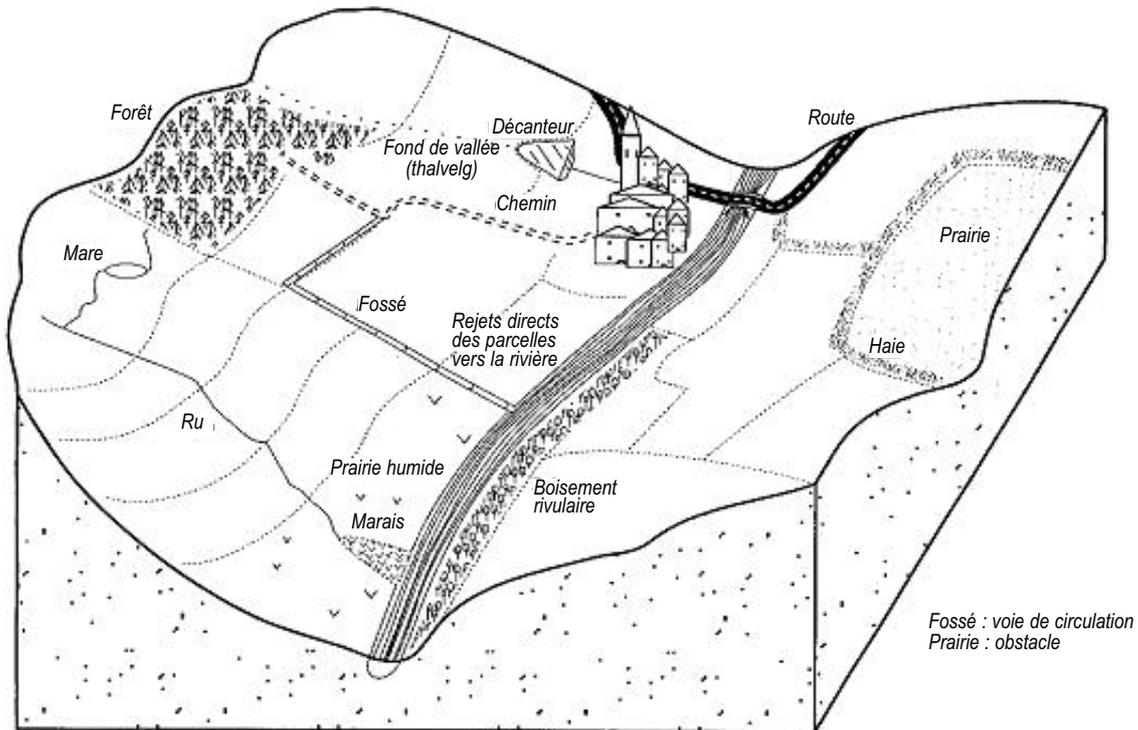


Figure 1.5 Quelques éléments du paysage jouant un rôle sur le ruissellement, entre les parcelles cultivées et le milieu aquatique superficiel (CORPEN, 1997)

Les zones tampons enherbées et boisées jouent ainsi un triple rôle de dispersion, ralentissement et réduction du ruissellement, comme on va le voir au chapitre suivant.

2.2. Les écoulements sous la surface du sol et leur interaction avec le ruissellement à l'échelle du bassin versant

A l'échelle du bassin versant, le partage initial entre ruissellement et écoulements sous la surface du sol peut se trouver modifié selon le trajet que suit l'eau.

◆ Transfert du ruissellement dans le sol et le sous-sol

Le ruissellement peut être ré-infiltré, partiellement ou totalement, en atteignant une zone plus perméable que la zone émettrice. Cela peut être intéressant pour la protection des eaux de surface, mais éventuellement dommageable pour les eaux souterraines : le bilan avantages – inconvénients dépend de la vulnérabilité des milieux respectifs et des enjeux qui y sont attachés.

Il faut citer en particulier le cas des milieux karstiques avec une couverture superficielle peu perméable (mais discontinue) : c'est le cas, par exemple, de l'engouffrement dans des avens (ou « bétoires ») de plateau ou encore via des pertes en rivière qui mettent en lien direct l'eau de ruissellement avec celle des nappes, sans que le rôle filtrant du sol puisse s'exercer.

◆ Exfiltration des eaux souterraines

A l'inverse, les conditions topographiques, géologiques et pédologiques peuvent conduire à la résurgence d'un écoulement hypodermique pour former un ruissellement plus ou moins diffus (exfiltration).

Ce phénomène peut se produire sur le versant et produire un ruissellement plus ou moins concentré. Le drainage est un cas particulier où ce processus est créé par le réseau de drains et de fossés.

Il faut noter également le cas de la nappe d'accompagnement d'un cours d'eau : une topographie concave accentuée au bord du cours d'eau peut engendrer une zone de ruissellement par exfiltration.

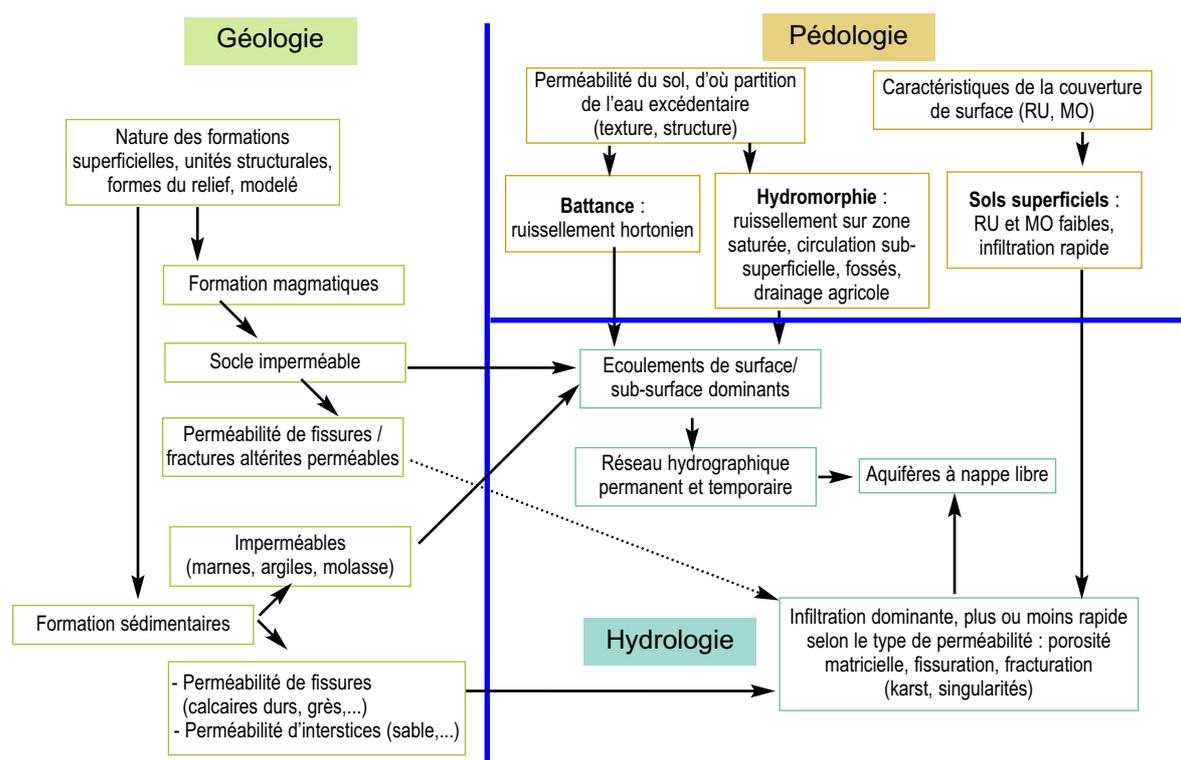
D'une manière générale, les écoulements latéraux, plus ou moins profonds, contribuent à l'alimentation des cours et plans d'eau, directement ou via des nappes de versant ou alluviales.

3. Les voies de transfert de l'eau dominantes à l'échelle d'un bassin versant et intérêt des zones tampons

A l'échelle d'un bassin versant, petit ou grand, les différentes voies de circulation de l'eau sont toutes présentes dans des proportions diverses. Toutefois, de multiples facteurs contribuent à faire apparaître un mode dominant. C'est ce qu'illustre à titre d'exemple la figure 1.6, qui présente le « modèle de connaissance » utilisé pour la construction de la démarche du CORPEN à l'échelle régionale (CORPEN, 2003).

D'une manière générale, en se référant à ce modèle, l'utilisation des zones tampons pour leurs fonctions de protection des eaux sera adaptée aux situations à « écoulements de surface / subsurface dominants » et bien moins aux situations à « infiltration dominante .. ». D'une manière simple, ces premières correspondent assez bien aux bassins versants présentant un chevelu hydrographique dense, souvent complété par un réseau de fossés important : ce type de comportement est caractéristique des régions sur socle (exemple du Massif Armoricain) ou sur substrat argileux (exemple de la Bresse).

Toutefois, d'autres situations se présentent : par exemple (cf. § précédent), celles où le ruissellement alimente indirectement un système aquifère profond, via des bétoires ou des pertes en rivières. C'est ainsi le cas de plateaux ondulés, où le ruissellement se concentre dans des longs thalwegs avant de rejoindre les rares vallées (exemple du Pays de Caux).



NB. Le trait pointillé représente une relation possible entre une caractéristique du milieu et la circulation de l'eau ; les traits pleins une relation habituelle.

Figure 1.6 « Modèle de connaissance » reliant géologie, pédologie et hydrologie pour la construction de la démarche de diagnostic régional (CORPEN, 2003)

Références citées

- ♦ AMBROISE B., 1999. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant : processus, facteurs, modèles, Bucarest, 200 p.
- ♦ ANDREASSIAN V., 2005. Pourquoi les rivières débordent-elles ? Collection Les petites Pommes du Savoir, éditions Le pommier, 64 p.
- ♦ AUZET A.V., 1997. Processus élémentaires d'érosion: l'expérience des terres agricoles. Mémoire de géosciences, Rennes, hors-série.
- ♦ CEMAGREF, 2004. Intérêt des zones tampons enherbées et boisées pour limiter le transfert diffus des produits phytosanitaires vers les milieux aquatiques : de l'état des connaissances aux recommandations pratiques. Rapport Cemagref pour le MAP (DGFAR) et le MEDD (DE), 37p.
- ♦ CHAMBRE D'AGRICULTURE de l'Aisne. Calculateur Réserve utile http://www.agri02.com/pages/Outil/outil_detail.php?IdO=572
- ♦ CORPEN, 1999. Désherbage : éléments de raisonnement pour une maîtrise des adventices limitant le risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires, 161 p.
- ♦ CORPEN, 1997. Produits phytosanitaires et dispositifs enherbés, 88 p.
- ♦ CORPEN, 2003. Diagnostic régional de la contamination des eaux liée à l'utilisation des produits phytosanitaires : éléments méthodologiques - Utilisation des Systèmes de traitement de l'Information Géographique (SIG), 84 p.
- ♦ HÉNIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. Le profil cultural ; l'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Masson ed. Paris, 332 p.
- ♦ MUSY A., HIGY C., 2004. L'hydrologie, une science de la nature. Masson ed.
- ♦ MUSY A., SOUTTER M., 1991. Physique du sol. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lavoisier ed., 335 p.

FONCTION D'ATTÉNUATION HYDRIQUE DES ZONES TAMPONS

1. Les propriétés hydriques des zones tampons

Les zones tampons enherbées et boisées ont en commun d'être constituées par un couvert végétal à la fois pérenne et dense qui exerce une influence significative sur le ruissellement intercepté, en réduisant la vitesse et en favorisant l'infiltration.

1.1. Ralentissement du ruissellement

La densité des tiges, herbacées ou ligneuses, donne à la surface des zones tampons une rugosité qui a pour effet de ralentir le ruissellement (voir encadré 2.1).

La loi de Manning-Strickler et la rugosité hydraulique

ENCADRE 2 - 1

La vitesse d'un écoulement à surface libre peut être calculée en appliquant la loi de Manning- Strickler :

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot \sqrt{p}$$

V est la vitesse, R_h est le rayon hydraulique, p est la pente et n le coefficient de rugosité hydraulique de Manning.

Quand l'épaisseur de la lame d'eau h est très faible par rapport à la largeur de l'écoulement (ce qui est pratiquement toujours le cas dans les situations qui nous intéressent), R peut être assimilé à l'épaisseur de la lame d'eau.

Pour caractériser la rugosité hydraulique, on utilise aussi le coefficient de Strickler $K_s = 1/n$.

On trouvera quelques valeurs de rugosité hydraulique dans le tableau 2.1.

La vitesse d'écoulement pour un ruissellement diffus sur un champ de blé a été mesurée par V. Chaplot (1995) : entre 0,15 et 0,20 cm/s (traçage à la fluorescéine). Deletic et al. (2006) ont mesuré des vitesses de 0,05 à 0,13 m/s pour des débits unitaires de 1,4 à 6,3 l/s.m sur une bande enherbée de pente 8 %. La vitesse du ruissellement sous couvert herbacé varie entre 0,05 et 0,10 cm/s.

Dans le cas d'un couvert herbacé, la rugosité diminue quand l'épaisseur de la lame de ruissellement augmente, pour chuter brutalement quand l'herbe est submergée, comme le montre la figure 2.1.

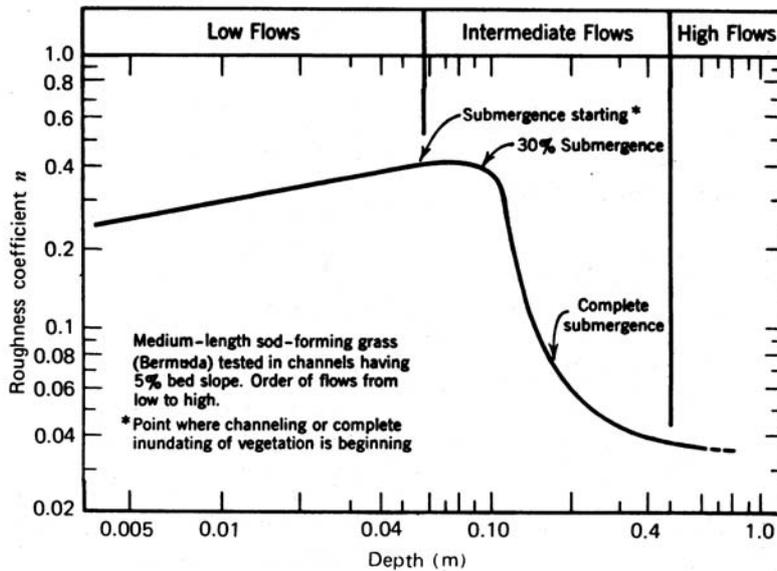


Figure 2.1 Rugosité et épaisseur de la lame de ruissellement (Ree, 1949)

Il faut préciser que cette épaisseur dépasse rarement quelques centimètres en présence d'un ruissellement diffus : cette chute concerne donc les écoulements concentrés.

Les graminées sont les plantes herbacées les plus favorables, du fait de la densité de leur végétation (tableau 2.1).

Végétation	Classe de densité	Densité (tige/m ²)	Espacement	Hauteur maximale (cm)	Rugosité n (K=1/n)
Bermudagrass (chiendent) <i>Cynodon dactylon</i>	dense	5400	1.35	25	0.15 (7)
Tall fescue (fétuque élevée) <i>Festuca elatior</i>	forte	3900	1.63	38	0.074 (14)
Ray grass <i>Lolium perennis</i>				18	
Weeping lovegrass (Amourette) <i>Eragrostis curvula</i>				30	
Blue Grass (paturin des prés) <i>Poa pratensis</i>				20	
Andropogon (bluestem)	bonne	2700	1.9		0.046 (22)
Mélange	acceptable	2150	2.15	18	0.032 (31)
Alfalfa (luzerne) <i>Medicago sativa</i>	Pauvre	<1000	>3		<0.023 (>43)
Lespedeza (trèfle)					
Sol nu compacté					0.01 (100)
Sol labouré					0.05 (25)

tableau 2.1 Rugosité et nature du couvert (d'après Munoz et al., 2004 et Haan et al., 1994)

Néanmoins, une pousse de graminées trop haute est susceptible de se coucher sous l'effet de la vitesse et de l'épaisseur de la lame de ruissellement, contribuant ainsi à la perte de rugosité. A noter que ce phénomène conduit aussi à une relative imperméabilisation de la surface.

Il ne semble pas exister de données concernant la rugosité des couverts ligneux. Comme leur densité est plus faible que celle d'un couvert herbacé, on peut supposer que leur rugosité est également plus faible. Par contre, ils ne posent pas de problème de flexibilité.

Des essais de ruissellement simulés ont été réalisés dans le Pays de Caux (Richet et al. en cours) pour comparer la rugosité et la perméabilité de la partie d'une bande enherbée tassée par les engins agricoles de celles de la partie non tassée. La végétation de la première était sensiblement moins haute et moins dense que celle de la seconde. Les valeurs de Ks mesurées variaient respectivement de 0,4 à 1,1 et 1,4 à 7,5.

Enfin, un autre facteur influe sur la vitesse : l'élargissement (ou le rétrécissement) de l'écoulement concentré, en relation avec la topographie du lieu.

1.2. Augmentation de l'infiltration

Là encore, la pérennité du couvert et sa densité sont à l'origine de la forte perméabilité des zones tampons. Quatre types d'effet sont en jeu (figure 2.2) :

- le rôle du couvert ;
- le rôle de l'enracinement et de la richesse en humus ;
- l'activité biologique ;
- l'évapotranspiration.

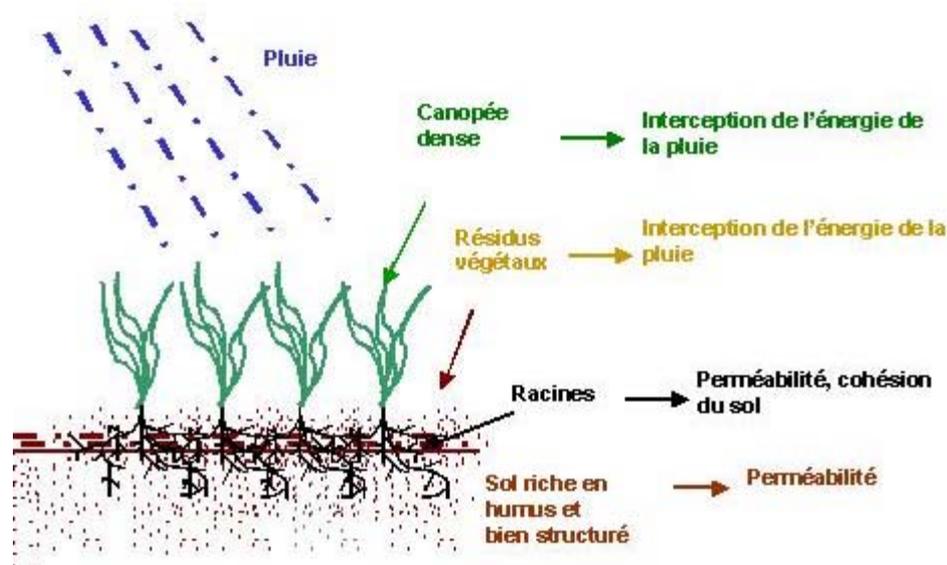


Figure 2.2 Propriétés hydrodynamiques d'un couvert herbacé

◆ Le rôle du couvert

Le couvert végétal (la « canopée » ou le « dais ») protège le sol de l'effet destructeur de la pluie sur les agrégats superficiels du sol (voir le chapitre 3), limitant la battance et favorisant ainsi le maintien de la perméabilité de surface. Les débris végétaux et en particulier les feuilles mortes ont le même effet : même en période hivernale, les boisements à feuilles caduques protègent aussi le sol, tant que la litière de feuilles est à peu près continue (elles sont facilement entraînées par le ruissellement concentré).

Le couvert d'une culture annuelle peut être aussi important que celui d'une zone tampon, mais d'une manière saisonnière. Quant aux cultures pérennes, l'écartement entre les rangs en limite la continuité le plus souvent.

Par ailleurs, le couvert a une certaine capacité de stockage de l'eau de pluie (tant que cette dernière reste relativement brève) qui diminue l'intensité pluviométrique à la surface du sol et donc le seuil pluviométrique d'apparition du ruissellement hortonien.



Les feuilles mortes protègent le sol en période hivernale dans un boisement à feuilles caduques

J.J. Grl / Cemagref

◆ Le rôle de l'enracinement et de la richesse en humus

Le chevelu racinaire dense exerce une action favorable, en produisant des voies d'infiltration rapide permanentes. La couche racinaire sous prairie a une épaisseur d'une quinzaine de centimètres, en général. Elle est beaucoup plus importante dans les boisements, sauf limitation par un substrat compact : Canadell et al. (1996, cité par Viaud 2004) donnent une fourchette de profondeur d'enracinement des arbres allant de 1,2 m à 7 m.

La richesse en humus des sols de zone tampon leur confère une structure « grumelée » très stable et également favorable à une infiltration rapide.

◆ L'activité biologique

L'absence de travail du sol permet une activité biologique intense qui agit dans le même sens (bio-porosité).

◆ L'évapotranspiration

On a vu que le développement de la végétation contribue à favoriser l'infiltration en asséchant le sol par évapotranspiration. Cette dernière est importante sous un couvert herbacé comme le montre, à titre d'exemple, le tableau 2.2.

Sites	Type d'enherbement	Pluviométrie (mm)	Évapotranspiration pour un hectare de couverture (mm)
Rothamsted Jealott's Hill (GB)	Fétuque	650	499
Saint Genès (F)	Prairie permanente	702	404
Bâle-Binningen (CH)	Prairie naturelle fauchée	913	625
Lindau-Eschikon (D)	Gazon	1073	494
Châlons en Champagne (F)	Herbe non coupée	621	433

Tableau 2.2 Comparaison des évapotranspirations sur différents sites (Ballif, 1994)

L'évapotranspiration dans les boisements est importante : elle varie de 400 à 700 mm en France, d'après Saugier (2001, in Viaud 2004).

Caubel (2001), en comparant un transect dans une haie de vieux chênes avec un transect voisin non arboré, a mis en évidence un déficit hydrique de 100 mm du premier par rapport au second. L'influence de la haie sur la teneur en eau du sol était marquée jusqu'à 10 m en amont.

◆ Interaction entre rugosité et infiltration

En diminuant la vitesse du ruissellement, la rugosité contribue également à augmenter l'infiltration :

- ◆ le temps de contact entre l'eau et le sol augmente ;
- ◆ à débit égal, la diminution de la vitesse produit une augmentation de l'épaisseur de la lame d'eau et donc de la charge hydraulique : selon la loi de Darcy (voir encadré 1.3), le débit infiltré augmente également en conséquence.
- ◆ quand les pentes longitudinale et latérale ne sont pas trop importantes (moins de 3 % environ), la rugosité de la zone tampon lui permet d'exercer une action dispersante sur les écoulements concentrés qui se traduit par une augmentation de la surface d'infiltration.



◆ Le rôle du débit entrant

Les expérimentations de simulation de ruissellement, mis en oeuvre pour étudier le fonctionnement épuratoire des zones tampons, présentent l'intérêt de permettre de faire varier le débit d'entrée d'une manière contrôlée (Souiller et al. 2002, Gril et al. 2003). Elles permettent ainsi de faire le constat que, toutes choses égales par ailleurs, la vitesse d'infiltration en surface augmente avec ce paramètre. Cette observation est probablement à mettre en relation avec plusieurs phénomènes : augmentation de l'épaisseur de la lame d'eau, mise en charge de la macroporosité et augmentation de la surface d'infiltration effective (la surface d'une zone tampon n'est jamais parfaitement plane).

2. La perméabilité des zones tampons et le devenir subsuperficiel de l'eau infiltrée

2.1. L'efficacité des zones tampons pour réduire le ruissellement

Le tableau 3.2 de l'annexe A-3, réalisé pour faire un bilan de l'efficacité des zones tampons vis-à-vis de la rétention des matières en suspension, fournit également des informations sur l'efficacité vis-à-vis de la lame ruisselée. On en tire un double constat : d'une part, on peut supposer que la perméabilité des zones tampons est élevée dans une majorité de cas ; d'autre part et en revanche, dans certaines situations, elle paraît faible, voire nulle : il y a donc des limites qui méritent d'être analysées.

2.2. La vitesse d'infiltration dans les zones tampons

Dans le cadre des expérimentations de simulation précédentes, réalisées sur sols limoneux, de fortes perméabilités ont été mises en évidence : de 80 à 1300 mm/h.

Le même type d'expérimentation, ainsi que des mesures effectuées en conditions de pluie naturelle ont été réalisées sur une bande enherbée du Beaujolais implantée sur un sol sableux : la vitesse d'infiltration observée a atteint 400 mm/h (Lacas 2005a)⁽¹⁾.

La très forte perméabilité fréquemment observée dans les haies et boisements s'explique par l'enracinement profond qui crée un véritable drainage vertical.

En comparaison, la vitesse d'infiltration de l'horizon de surface d'un sol travaillé est généralement sensiblement plus faible, du moins dès que le lit de semence est installé et subit des pluies. La perméabilité d'un sol de culture pérenne maintenu nu par désherbage chimique est également assez faible, surtout quand cette pratique est associée au tassement par les passages d'engins agricoles.

(1) Une description du dispositif expérimental est présentée dans l'encadré en fin d'annexe 5 et dans Lacas (2005b)

2.3. Les limites de l'infiltration dans une zone tampon

Cette forte perméabilité est un facteur essentiel de la capacité d'infiltration d'une zone tampon, mais il n'est pas le seul.

En effet, l'infiltration effective dans une zone tampon ne dépend pas que de sa perméabilité propre, à savoir celle de la partie aérienne et de la couche de sol colonisée par les racines qui la constituent spécifiquement. Interviennent également :

- ◆ le ruissellement intercepté (en débit et volume), qui dépend lui-même des caractéristiques et de l'état du bassin versant amont, ainsi que de l'événement climatique qui l'engendre ;
- ◆ les caractéristiques et l'état des horizons sous-jacents.

◆ Rôle du ruissellement intercepté

La vitesse d'infiltration ci-dessus correspond à un débit d'eau pouvant s'infiltrer sous la surface de la zone tampon : $1\text{mm/h} = 1\text{l/m}^2\cdot\text{h}$ (ou $10\text{m}^3/\text{ha}\cdot\text{h}$). Le débit maximal qu'une zone tampon est susceptible d'intercepter entièrement est donc fonction de sa perméabilité et de sa superficie : au-delà, l'eau en excédent s'écoule vers l'aval.

L'importance du débit et du volume ruisselé sont fonction de la superficie de l'impluvium amont, et de différents facteurs liés à sa géologie, sa pédologie et sa morphologie, ainsi qu'aux conditions climatiques et à l'occupation du sol. On n'abordera pas plus ici cette question complexe, en renvoyant aux nombreux documents d'hydrologie générale, par exemple Musy (2005).

On insistera, en revanche, sur un point crucial pour le fonctionnement des zones tampons, celui de la forme de l'interception d'un ruissellement, diffus ou concentré.

Cette question de la concentration du ruissellement en recouvre en fait deux : d'une part celle du rapport entre la superficie de l'impluvium et celle de la zone tampon et, d'autre part, celle de l'écoulement ne concernant qu'une partie de la surface de la zone tampon.

Le rapport des surfaces

La capacité d'une zone tampon à infiltrer le ruissellement qu'elle intercepte est fonction de ses caractéristiques propres, mais également de l'importance du débit du ruissellement. Celui-ci dépend de nombreux facteurs dont, en particulier, la superficie de l'impluvium qui l'engendre : le rapport entre cette dernière et la superficie de la zone tampon où ce débit de l'amont doit s'infiltrer est donc à prendre en considération.

Une zone tampon enherbée ou boisée est généralement capable de supporter des rapports de surface assez importants. A titre d'illustration, on prendra l'exemple de la bande enherbée du Beaujolais dont la perméabilité mesurée atteignait 400mm/h (voir encadré la fin de l'annexe A-5). Le rapport de surface entre la parcelle de vigne collectée et la zone enher-



bée était de 110. Or, sur ce dispositif, très peu d'épisodes de ruissellement en aval de la placette ont pu être observés. De plus, leurs volumes étaient très faibles, bien inférieurs aux volumes de ruissellements interceptés à l'occasion des violents orages qui se sont produits durant la période d'étude.

Mais il y a des limites à cette capacité :

- d'une part, la capacité d'infiltration d'une zone tampon peut être inférieure. Ainsi, une valeur d'environ 100 mm/h, par exemple, paraît plus caractéristique des limons argileux : pour obtenir une performance identique à celle qui précède, le rapport des surfaces devrait a priori être réduit à 25.
- d'autre part, sans chercher à préciser la question par des calculs, il apparaît clairement qu'une zone tampon d'une dizaine de mètres de large aura peu de capacité d'absorption face au ruissellement conduit par un thalweg alimenté par quelques dizaines d'hectares, ce qui n'est pas une situation exceptionnelle⁽¹⁾.

La concentration du ruissellement dans la zone tampon

Quand un ruissellement concentré pénètre dans la zone tampon, il conserve plus ou moins sa largeur d'écoulement, même si la pénétration dans la ZT peut plus ou moins contribuer à une certaine dispersion produisant un élargissement. Mais celui-ci reste limité et ne se produit de toute façon pas quand la concentration est due au relief et concerne également la zone tampon.

Ce phénomène a pour conséquence de réduire considérablement la surface utile de la zone tampon, donc sa capacité d'infiltration, même si la perméabilité y est élevée.

Il est donc essentiel, pour implanter et dimensionner des zones tampons efficaces, de prendre en compte cette question de la concentration du ruissellement. Comme disent les spécialistes américains du sujet : « le ruissellement concentré est le talon d'Achille de l'interception des produits phytosanitaires par les zones tampons ».⁽²⁾ (USDA 2000), et cette affirmation est aussi valable pour les autres fonctions.

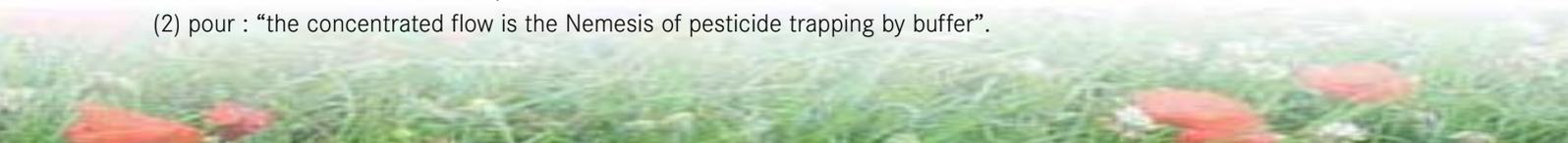
◆ Rôle des horizons sous-jacents

L'horizon de surface d'une zone tampon a des caractéristiques spécifiques qui sont à l'origine de sa forte perméabilité, comme on l'a vu ci-dessus. Dans le cas d'une surface en herbe on observe généralement que son épaisseur est d'une quinzaine de cm. Au-dessous, le chevelu racinaire se raréfie et la coloration sombre due à la richesse en humus s'atténue nettement. Le constat est identique pour les boisements, mais cette couche de surface est généralement plus épaisse, souvent présente jusqu'au substrat.

En dessous de cet horizon de surface, ce sont les caractéristiques du sol en place (perméabilité des horizons, état d'humidité) qui règlent son fonctionnement hydrodynamique,

(1) En situation de plateau, on peut couramment rencontrer des thalwegs en zone cultivée qui collectent des bassins versants « secs » de plusieurs centaines d'ha.

(2) pour : "the concentrated flow is the Nemesis of pesticide trapping by buffer".



indépendamment de son couvert. Le remplissage par l'eau du réservoir sol dépend donc de la quantité d'eau qui s'infiltré (pluviométrie - évapotranspiration), mais aussi de la profondeur de cet horizon sous jacent.

En fonction de l'absence ou de la présence d'un horizon plus ou moins imperméable et plus ou moins profond, le transfert de l'eau infiltrée en profondeur peut prendre différentes formes.

Cette question est détaillée en annexe A-5 (figure 5.2) qui porte sur le transfert hydrique des produits phytosanitaires : en effet, la forme de l'écoulement subsuperficiel joue un rôle essentiel sur leur devenir.

L'importance du ruissellement intercepté et l'état hydrique de la zone tampon interviennent également sur la capacité d'infiltration d'une zone tampon :

- ◆ Lors de l'interception d'un débit de ruissellement très important, un écoulement latéral peut se produire sur le fond de la couche de surface de la zone tampon, même sur un substrat perméable. En effet, même un matériau pédologique très perméable le sera généralement moins que celui de l'horizon racinaire qui s'y développe. Ce phénomène a été observé, à l'occasion d'une expérimentation de simulation de ruissellement sur le dispositif déjà cité (Lacas 2005b , annexe A-5), alors même que le substrat de la bande enherbée est un sable homogène, sans autre discontinuité que celle produite par le système racinaire.
- ◆ A l'inverse, lors d'épisodes de ruissellement plus faibles se produisant en période estivale, quand le sol de la zone tampon est sec, le volume total de l'eau intercepté peut être stocké dans la zone tampon (tant que la réserve utile n'est pas pleine). En effet, la forte densité végétale contribue à assécher le sol et la richesse en humus augmente la RU.

La saturation en eau de la zone tampon conduit à réduire très fortement ou même à annuler sa capacité d'infiltration, quelles que soient ses propriétés intrinsèques. Cette situation extrême n'est pourtant pas exceptionnelle. C'est le cas, en particulier, des prairies humides de bas-fond qui bordent les cours d'eau, pendant une période plus ou moins longue.

◆ Le tassement de la zone tampon

Le tassement dû à la circulation des engins agricoles peut influencer considérablement sur la perméabilité d'une zone tampon. L'expérimentation dans le Pays de Caux, déjà citée (Richet et al. en cours) , a mis en évidence une perméabilité de 170 mm/h dans la partie de la bande non tassée, contre environ 10 mm/h dans la partie tassée.

Le tassement de la zone tampon peut également être causé par le piétinement excessif des animaux quand elle est pâturée.



2.4. Variations temporelles de l'infiltration dans une zone tampon

◆ Effet de l'intermittence des épisodes de ruissellement et variation saisonnière

La zone tampon a une capacité d'interception des écoulements d'autant plus importante que le sol y est plus sec. L'espace de temps entre deux épisodes de ruissellement influence donc cette capacité de remplissage, en particulier par le biais de l'évapotranspiration.

Toutefois, la capacité d'infiltration d'une zone tampon reste assez stable et ne chute qu'à l'approche de la saturation (Arora et al. 1996). La capacité d'infiltration est reliée directement à la capacité de remplissage du réservoir sol.

Le cas des prairies de bas-fond, que l'on vient de citer, est une bonne illustration de cette variation saisonnière. De façon imagée, le réservoir sol se remplit pendant la saison hivernale quand l'ETP est réduite et les pluies abondantes (d'octobre à mars, en conditions moyennes). Puis d'avril à septembre, l'ETP devient supérieure à la pluie et le réservoir sol se vide par le haut. Cette variation saisonnière influence les capacités d'infiltration de la zone tampon.

◆ Age du couvert végétal de la zone tampon

Avec l'âge, la végétation développe ses parties aériennes et son système racinaire. Le sol s'enrichit en humus et l'activité biologique devient plus intense : sa capacité d'infiltration augmente en conséquence.

Mais on peut observer également une diminution de celle-ci, si le vieillissement conduit à un moindre développement ou à la réduction de la densité du couvert.

2.5. Largeur et efficacité

La notion de « largeur » d'une zone tampon mérite d'être explicitée : voir l'encadré 2.2.

ENCADRE 2 - 2

La « largeur » des zones tampons

C'est une notion importante concernant les fonctions de transfert hydrique des zones tampons, en rapport avec la question de leur forme, et qui présente un risque d'ambiguïté.

La majorité des zones tampons sont longilignes, implantées de telle sorte que leur plus grande longueur est plus ou moins perpendiculaire à la ligne de plus grande pente : cela conduit, par usage, à définir la largeur de la zone tampon comme étant la longueur du trajet de l'écoulement qui la traverse. On conservera ce terme, même quand il n'est pas parfaitement adapté (bande enherbée en position oblique par rapport à l'écoulement). Toutefois, s'il paraît trop gênant par rapport à l'usage commun (cas du chenal enherbé le long d'un thalweg, par exemple), il suffira, pour éviter les ambiguïtés, d'employer le terme le plus naturel (largeur ou longueur), en précisant « dans le sens de l'écoulement » ou « perpendiculairement à l'écoulement ».

Il est difficile de définir avec rigueur la largeur minimale permettant à une zone tampon de réduire les débits et les volumes de ruissellement d'une manière significative, tant le nombre de facteurs à prendre en compte est important. On reviendra sur les limites des résultats expérimentaux au chapitre suivant.

Il est pourtant indispensable de répondre à ce type de question pour apporter des éléments pratiques à la mise en œuvre des zones tampons (Cf. chapitre 2).

Ceci précisé, on peut se risquer à dire qu'une bande relativement étroite (une dizaine de mètres environ) devrait réduire assez sensiblement les débits et volumes de ruissellement. Toutefois, certaines conditions doivent être respectées :

- le ruissellement intercepté est diffus ou, au pire, légèrement concentré ;
- le sol qui supporte la zone tampon n'exerce pas une action limitante suffisante pour produire du ruissellement par saturation dans celle-ci ;
- la zone tampon n'est ni tassée par les engins agricoles ni fortement piétinée par les animaux.

3. Les courts-circuits dans les zones tampons

Au paragraphe précédent, on s'est intéressé au problème causé par la concentration des écoulements qui se produit à la surface même des parcelles cultivées situées en amont des zones tampons ou à leur périphérie. Mais cette concentration peut prendre des formes plus radicales, par la formation de véritables courts-circuits. On abordera maintenant les conséquences de la présence de réseaux de drainage, de fossés et de ruisseaux.

3.1. Les réseaux de drainage enterrés

Le drainage enterré des parcelles cultivées limite la formation du ruissellement, souvent drastiquement. Dans l'ouest de la France, par exemple, une réduction moyenne de 85 à 90 % est observée en comparant parcelle drainée et non drainée (Kao 1994). Dans ces conditions, l'implantation d'une zone tampon en aval d'une parcelle drainée n'aura qu'une influence assez négligeable sur les transferts d'eau et de substances.

Ceci a une valeur assez générale, mais n'est pas nécessairement valable partout : ainsi, dans les conditions climatiques du Sud-Ouest, où les orages de printemps peuvent provoquer simultanément un ruissellement important et le fonctionnement des drains, la réponse doit être plus nuancée. L'intérêt, en présence de drainage enterré, d'implanter ou non une zone tampon (du moins, du point de vue des transferts hydriques) dépend donc du diagnostic local des modes de circulation de l'eau.



3.2. Les fossés et les ruisseaux

D'une manière générale, les fossés ont pour vocation d'évacuer rapidement l'eau en excès ⁽¹⁾ issue des terres agricoles (associé ou non au drainage enterré) ou destinés à protéger la voirie.

Quand ces fossés traversent une zone tampon, le rôle de tampon hydrique de cette dernière est annulé pour ce qui concerne la surface dont ils collectent les écoulements. C'est du moins vrai si on considère que les fossés ne jouent que le rôle de collecteur. En fait, ils sont susceptibles de jouer aussi, dans certaines conditions, un rôle de tampon plus ou moins important : cette question, complexe et encore peu documentée, sort du cadre imparti à ce document. On l'abordera néanmoins succinctement au chapitre 3, sous l'angle du diagnostic.

Les fossés constituent un réseau hydraulique de l'amont qui alimente le réseau hydrographique naturel (la limite n'étant pas toujours nette entre un fossé et un ruisseau calibré). Cette question conduit directement à celle de la localisation des zones tampons qui est traitée au chapitre 2. On peut toutefois noter que, plus une zone tampon sera implantée en aval d'un versant, plus elle risquera d'être court-circuitée.

4. Le rôle hydrologique du bocage

La fonction hydrologique du bocage a été étudiée en région armoricaine. Les éléments constitutifs de ce type de bocage sont principalement des haies sur talus, qui cumulent donc les propriétés des zones tampons boisées avec la contribution spécifique des talus.



Paysage bocager

X. Boulangé / Chambre d'agriculture des Vosges

(1) Il faut signaler néanmoins le cas du bocage, essentiellement quand il a gardé sa structure traditionnelle (situation devenue peu fréquente) : dans ce cas, le fossé peut n'être que la conséquence de la fabrication du talus et donc un fossé « non circulant ».

Comme on l'a vu ci-dessus, l'importante évapotranspiration des haies exerce un effet d'assèchement important qui retarde la saturation des sols à l'automne (d'environ 1,5 mois, d'après Caubel 2001) et la remontée de la nappe.

En conséquence, les écoulements latéraux sub-surfaciques sont influencés par la présence des haies à l'échelle de l'année : retard d'écoulement à l'automne et accélération du tarissement au printemps. Par contre, en période hivernale, elles n'ont plus d'influence sensible.

Le ruissellement est également influencé par l'évapotranspiration, car dans ce milieu le ruissellement par saturation est plus important que le ruissellement hortonien. Il est également fortement influencé par la présence des talus (Mérot et al. 1999, Viaud 2004) qui ralentissent le ruissellement et en limitent le volume.

A l'échelle du bassin versant, Mérot (1978) a montré que le pic de crue à l'exutoire d'un bassin bocager était 1,5 à 2 fois plus faible qu'à celui d'un bassin non bocager (mais très semblable par ailleurs).

La densité de haies (linéaire / ha) est le critère caractérisant l'importance du rôle du bocage sur les écoulements subsuperficiels. Ce critère compte aussi pour le ruissellement de surface, mais il s'y rajoute l'orientation de la haie, qui doit être en position de l'intercepter.

5. Les zones tampons rivulaires

La bande de végétation, souvent en partie ou totalement ligneuse, qui borde les cours d'eau joue un rôle important vis-à-vis de la dynamique de l'eau à l'échelle du bassin versant :

- ◆ au niveau du versant, en interceptant les écoulement latéraux non court-circuités, en réduisant leur débit et leur volume par évapotranspiration ;
- ◆ au niveau du cours d'eau lui-même en période de crue, grâce au ralentissement de son écoulement par l'effet de la rugosité et du stockage temporaire produit par le débordement.

Comme on l'a déjà vu, grâce à sa hauteur et à sa rigidité, la végétation ligneuse est plus efficace que la végétation herbacée en présence d'une inondation, la hauteur d'eau étant généralement plus importante que dans le cas d'un ruissellement de versant, même concentré. A ce titre, la strate buissonnante et arbustive paraît plus intéressante que la strate arborée.

A l'échelle du lit majeur dans son ensemble, la rugosité « en grand » produite par un maillage bocager joue un rôle similaire de ralentissement des écoulements fluviaux en période d'inondation.



Références citées

- ♦ ARORA K., MICKELSON S.K., BAKER J.L., TIERNEY D.P., PETERS C.J., 1996
Herbicide retention by vegetative buffer strips from runoff under natural rainfall, *Trans. ASAE* 39, 2155–2162.
- ♦ BALLIF J. L., 1994. Lysimètres en monolithes d'une rendzine brune sur craie cryoturbée. Bilans hydrique et minéral en sols nu, enherbé, cultivé et planté en vigne 1973-1974 à 1990-1991. Chalons en Champagne, INRA.
- ♦ CAUBEL V., 2001. Influence de la haie de ceinture de fond de vallée sur les transferts d'eau et de nitrates.
- ♦ CHAPLOT V., 1995. Processus et déterminisme de l'érosion diffuse à différentes échelles spatiales. DEA, Géosciences, Nancy 1
- ♦ DELETIC, A. AND FLETCHER T. D, 2006. Performance of grass filters used for storm-water treatment--a field and modelling study. *Journal of Hydrology* 317(3-4): 261-275.
- ♦ GRIL J.-J., SOUILLER C., BONNET F., LOUSSOT P. L'intérêt des zones boisées dans la lutte contre la contamination des eaux de surface par les produits phytosanitaires. Rapport MEDD-DE, 2003. 41 p. + annexes.
- ♦ HAAN C. T., B. J. BARFIELD AND J. C. HAYES, 1994. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. San Diego: Academic Press.
- ♦ KAO C., 1994. Le ruissellement en parcelle agricole en situation hivernale. Mécanismes de genèse et de modélisation. Parcelles drainées et non drainées, site expérimental de la Jaillièrre (Maine et Loire). Mémoire DEA Hydrologie (Univ. P. et M. Curie, Paris - Engref).
- ♦ LACAS J.G., VOLTZ M., GOUY V., CARLUER N., GRIL J.-J., 2005a. Using grassed buffer strips to limit pesticide transfer to surface water: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 25, 1-14.
- ♦ LACAS J.G., 2005b. Processus de dissipation des produits phytosanitaires dans les zones tampons enherbées ; étude expérimentale et modélisation en vue de limiter la contamination des eaux de surface. Thèse université de Montpellier – Cemagref Lyon. 306 p.
- ♦ MÉROT P., GASCUEL-ODOUX C., WALTER C., ZHANG X., MOLÉNAT 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(1), 23-44.
- ♦ MÉROT P., 1978. Le bocage en Bretagne granitique : une approche de la circulation des eaux. Thèse Univ. R – ENSA Rennes. 1996 p.
- ♦ MUNOZ-CARPENA, R. AND J. E. PARSONS, 2004. "A design procedure for vegetative filter strips using VFSSMOD-W." *Transactions of the Asae* 47(6), 1933-1941.
- ♦ MUSY A., 2005. <http://hydram.epfl.ch/e-drologie/general/tmchaptres.html>
- ♦ REE W.O., 1949. Hydraulic characteristics of vegetation for vegetated waterways. *Agricultural Engineering* 30(4), 184-189.
- ♦ SAUGIER B., 2001. Comment les forêts contrôlent-elles le cycle de l'eau. Forêts et eaux, colloque d'hydrotechnique 168° Cession de la CST, Nancy, septembre 2001. Société d'hydrotechnique de France.
- ♦ SOUILLER, C., COQUET, Y., POT, V., BENOÎT, P., RÉAL, B., MARGOUM, C., LAILLET, B., LABAT, C., VACHIER, P. DUTERTRE, A., 2002. Capacités de stockage et d'épuration des sols de dispositifs enherbés vis-à-vis des produits phytosanitaires. *Étude et gestion des sols*, 9, pp.269-285.
- ♦ US DEPARTMENT OF AGRICULTURE, Conservation buffers to reduce pesticide losses. (2000) Natural Resources Conservation Service. 21 p.
- ♦ VIAUD V. 2004. Organisation spatiale des paysages bocagers et flux d'eau et de sédiments ; approche empirique et modélisation. Thèse ENSA Rennes.

FONCTION DE RÉTENTION DES MATIÈRES EN SUSPENSION

1. Rappel succinct concernant l'érosion hydrique des terres agricoles

1.1. Les facteurs de la genèse de l'érosion

L'érosion des terres agricoles a fait l'objet de nombreuses présentations (par exemple Auzet 1990, Papy 1988). On se contentera de rappeler quelques points essentiels pour notre propos.

Comme on l'a vu au chapitre précédent, la pluie exerce, par son énergie cinétique, un effet destructeur sur les agrégats du sol, provoquant l'imperméabilisation de la surface. Mais cette énergie a aussi pour effet de disperser en tous sens les particules arrachées (« effet splash »). Du fait de la pente, une dissymétrie apparaît : les particules projetées vers l'aval tombent plus loin du point d'impact que les particules amont, produisant ainsi un premier mouvement vers l'aval. A noter que le travail du sol produit un phénomène équivalent.

Ces processus sont très lents. Quand le ruissellement se forme, son action se manifeste bien plus fortement et rapidement. Il possède en effet une énergie qu'il « utilise » de deux manières : pour cisailer le sol et pour transporter le matériau ainsi arraché.

◆ L'origine de l'érosion hydrique : le cisaillement du sol par le ruissellement

Le ruissellement exerce une « contrainte de cisaillement » dont l'importance est principalement fonction de la pente ⁽¹⁾ du terrain et de l'épaisseur de la lame d'eau.

Le premier facteur explique la fréquence de l'érosion sur les terres pentues, phénomène bien connu.

En revanche, le rôle de l'épaisseur de la lame d'eau est moins bien perçu. Il permet d'expliquer le ravinement observé dans les thalwegs à faible pente, mais qui drainent des bassins versants de grande étendue au sol peu perméable (comme on en observe dans de nombreuses régions de plateaux).

A cette contrainte, le sol oppose une résistance jusqu'à un seuil critique au-delà duquel le cisaillement se produit, seuil qui dépend de la cohésion du matériau. Mais si la cohésion est obtenue au prix d'une diminution de la perméabilité, le ravinement apparaît assez rapidement. On se contentera d'illustrer cette interaction un peu complexe par quelques exemples :

(1) Ou de la vitesse, les deux facteurs étant étroitement liés (voir l'équation de Manning-Strickler au chapitre 2 de l'annexe 1).

- ◆ un sol sableux, très peu cohérent, est facilement raviné, malgré sa perméabilité ;
- ◆ un sol tassé, très cohérent, ne résiste que dans certaines limites, à cause de son imperméabilité, qui génère un fort ruissellement ;
- ◆ un sol argilo-calcaire, de structure macro-poreuse et stable, donc à la fois perméable et cohérent, ne manifeste que rarement des phénomènes d'érosion ;
- ◆ enfin, le couvert végétal a un effet protecteur très significatif, non seulement par son effet sur la perméabilité, mais par la très sensible amélioration de la cohésion du sol qu'apporte le système racinaire.



Début de ravinement

B. Augard / Cemagref

Ainsi les surfaces enherbées et boisées ont, non seulement la capacité de retenir les MES produites par l'érosion comme on va le développer plus loin, mais elles ont également celle de limiter l'érosion à la source.

Cette aptitude est largement utilisée : enherbement des cultures pérennes ou des thalwegs, reboisements en montagne, etc.

◆ La capacité de transport du ruissellement

Les particules arrachées sont transportées par le ruissellement ; sa capacité de transport dépend de sa vitesse (et donc de la pente) et du poids du matériau mis en suspension : plus les particules sont lourdes, plus la vitesse nécessaire pour les entraîner doit être importante. Inversement, quand la vitesse faiblit, les MES se déposent. Ainsi, les particules argileuses sont facilement entraînées et les particules sableuses sont les premières à se déposer quand un obstacle ou un adoucissement de la pente réduit la vitesse. Les agrégats de terre fine peuvent également être entraînés sur une certaine distance avant de se disperser (si leur structure est stable) ; leur dynamique est proche de celle des particules de même dimension.

Il y a également une limite de charge totale en MES, dépendante de la vitesse, que le ruissellement peut transporter.

1.2. Les figures de l'érosion et la progression de l'érosion au sein du bassin versant

De la même manière que le ruissellement est d'abord diffus, puis se concentre progressivement, l'érosion commence par se manifester sous forme diffuse, puis par des incisions plus ou moins profondes : les rigoles et les ravines (figure 3.1). L'augmentation progressive du débit tend à engendrer des figures d'érosion de plus en plus marquées de l'amont vers l'aval. Mais cette tendance n'est pas systématique : les dimensions de ces incisions varient également en fonction de la cohésion des matériaux rencontrés, de la topographie et de la présence d'obstacles. Des zones de dépôts peuvent également se former sur le trajet, dans lesquels se produit un enrichissement en éléments grossiers. Ce phénomène peut parfois marquer fortement le paysage : il est, par exemple, à l'origine des « rideaux » du nord de la France.

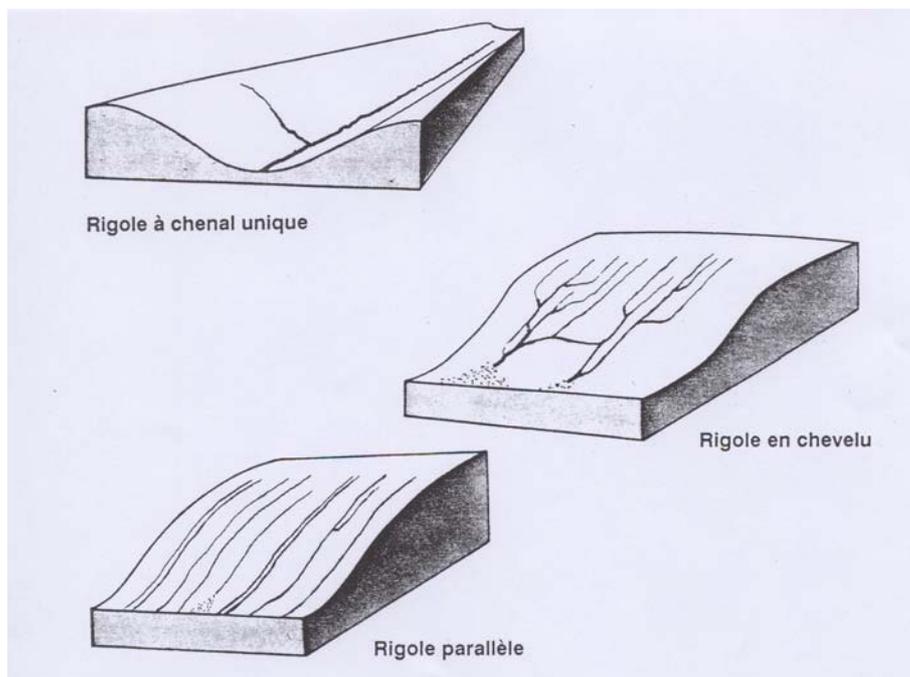


Figure 3.1 Types de figures d'érosion

J.F. Ouvry / AREAS



Dépôt de terre au contact de la végétation herbacée

Ainsi, toute la masse de terre érodée ne rejoint en général pas le cours d'eau : le rapport entre la masse de terre qui le rejoint et celle qui est érodée s'appelle le « coefficient de restitution » (sediment delivery ratio). Plus le bassin est grand, plus ce rapport est faible, comme l'illustre le tableau 3.1.

Surface du BV (km ²)	Coefficient de restitution
0,05	0,58
0,1	0,52
0,5	0,39
1	0,35
5	0,25
10	0,22
50	0,15
100	0,13
500	0,08
1000	0,06

Tableau 3.1 Estimation du coefficient de restitution (SCS, 1971 in Kirkby et al., 1980)

La morphologie influe sur l'importance et la manifestation de cette concentration ; ainsi on distinguera :

- ◆ l'érosion de versant, plutôt intra-parcellaire et de type diffus ou légèrement concentrée (érosion le long des lignes de semis ou dans les traces de roues, par exemple) ;
- ◆ l'érosion dans les thalwegs, souvent inter-parcellaire ;
- ◆ il faut rajouter à cette classification sommaire l'érosion propre aux bords de parcelles : dans les dérayures, au pied des talus, etc.



B. Guyot

Ravinement et dépôt de terre

Sans être systématique, le premier type domine dans les régions de collines ou sur les coteaux, où les pentes sont fortes mais courtes. Le deuxième est classique des régions de plateau. Quant au troisième, il n'est pas caractéristique d'un milieu naturel donné.

On signalera, enfin, l'existence d'une cartographie de l'aléa érosion en France, élaborée par le BRGM et l'INRA en 2000, qui permet une comparaison des petites régions aux différentes saisons ⁽¹⁾.

2. Les propriétés des zones tampons permettant la rétention des MES

On retrouve ici les mêmes propriétés fondamentales déjà présentées au chapitre précédent : le ralentissement du ruissellement et l'augmentation de l'infiltration.

2.1. Le ralentissement du ruissellement

Il est commun d'observer, sur un territoire où l'érosion est forte, l'apparition de dépôts importants à l'endroit où une ravine pénètre dans une prairie ; de constater que ces dépôts sont constitués d'un matériau nettement plus grossier que le sol environnant ; et, enfin, de noter que la ravine disparaît fréquemment à cet endroit. Les deux premiers constats sont en relation avec la réduction de la vitesse au contact avec la surface enherbée et concernent le sujet de ce chapitre ; on reviendra plus loin sur le troisième qui concerne la maîtrise de l'érosion elle-même.

(1) Disponible sur le site de l'IFEN : www.ifen.fr/publications. (n°ET 18)

Une analyse expérimentale plus fine (Dillaha 1989, Tingle 1998, Meyer 1995, Deletic 2006) montre que, si la densité de la végétation est suffisante, l'essentiel de cette sédimentation se produit dans le premier mètre de zone tampon enherbée – en débutant d'ailleurs un peu en amont (figure 3.2).

En effet, au cours du cheminement des eaux à travers la surface enherbée, la diminution de la concentration des MES s'achève dès que celle-ci redevient égale à la concentration d'équilibre ; celle-ci correspond à la capacité de transport pour la vitesse d'écoulement entre les brins d'herbe : elle diminue donc quand la vitesse augmente. La quantité de dépôts varie selon le débit entrant, la charge du flux, et la taille des particules transportées.

2.2. Le rôle de l'infiltration

L'infiltration dans la zone tampon contribue également à la rétention des MES : la réduction progressive du volume du ruissellement conduit à réduire celle de la capacité de transport. De plus, comme on l'a vu, plus l'épaisseur de la lame d'eau est faible, plus la rugosité augmente : outre son effet propre, l'infiltration renforce l'effet de cette dernière.

Une dernière remarque peut être faite à propos des propriétés des zones tampons : elles sont souvent qualifiées de « filtre » (Cf. le terme américain de vegetated filter strips). Ce terme n'est que très partiellement exact et ne concerne, au sens strict, que la très faible fraction des particules susceptibles de se coller aux végétaux. Il semble que deux phénomènes se combinent : la décantation des particules lourdes et l'effet de la turbulence produite par la circulation de l'eau au milieu des tiges : cette turbulence engendrerait une « microcentrifugation » favorisant l'interception des particules plus fines (Dorioz et al 2006).

3. Efficacité des zones tampons

3.1. Efficacité globale

A titre d'exemple, la figure 3.2. compare les hydrogrammes d'entrée et de sortie d'une bande enherbée lors d'un événement pluvieux dans le Pays de Caux ainsi que les chroniques de MES correspondantes. Outre le rôle hydrique de la bande (ralentissement et infiltration), sa capacité à réduire la charge en MES apparaît nettement.



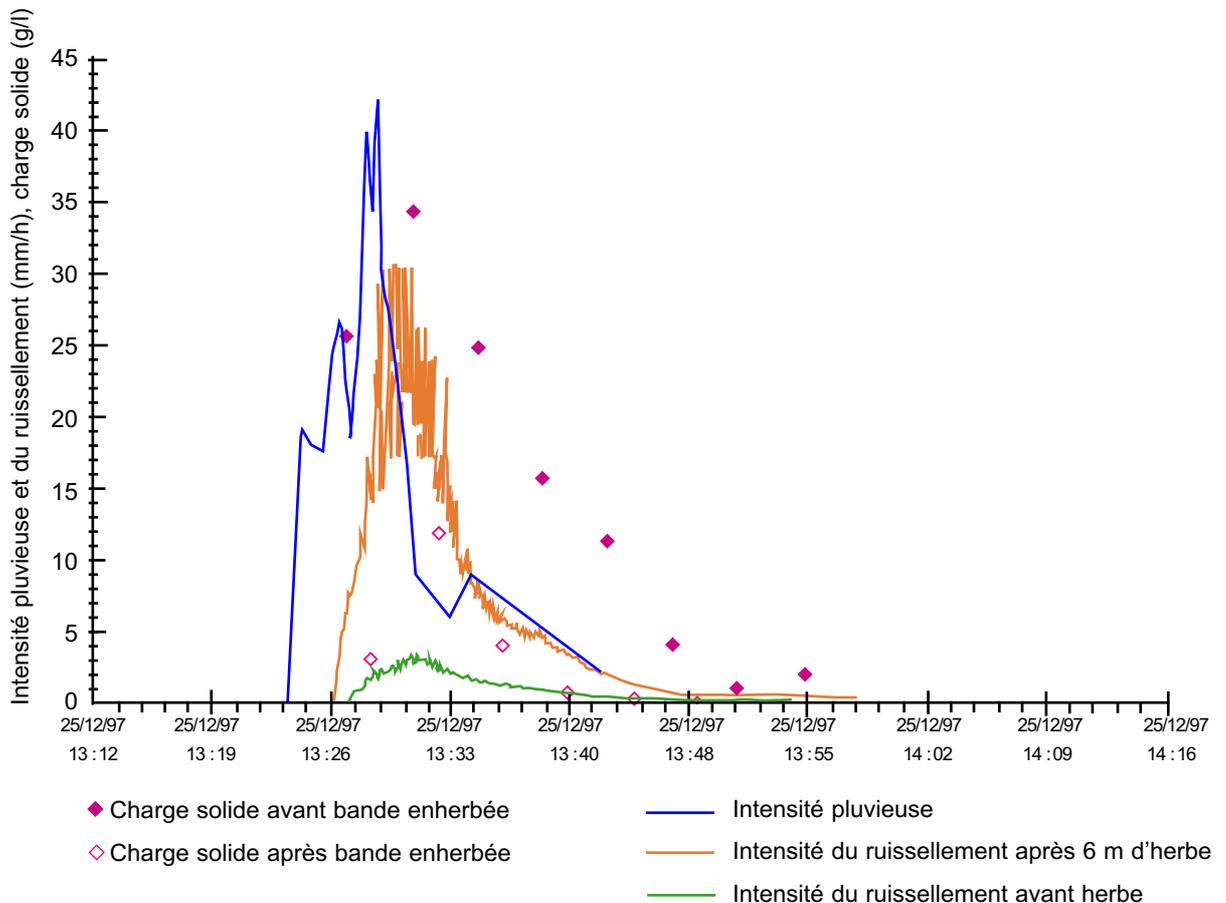


Figure 3.2 Comparaison des hydrogrammes d'entrée et de sortie d'une bande enherbée lors d'un événement pluvieux (Lecomte 1999)

Le tableau 3.2 présente un bilan de l'efficacité de rétention mesurée par différents auteurs, dans des conditions expérimentales variées. Comme celles-ci influent sensiblement sur les résultats (comme le confirment ces auteurs), ces valeurs doivent être considérées avec une certaine prudence (voir encadré 3.1). Il est néanmoins intéressant de constater que si ces valeurs s'échelonnent entre 40 et 100 %, la majorité des études obtiennent des taux moyens compris entre 70 et 90 %.

On notera également que la très grande majorité de ces études concernent les zones tampons enherbées et très peu les boisements. La faible densité de tiges de ces derniers laisse prévoir une efficacité inférieure des zones tampons boisées. Néanmoins, leur perméabilité souvent forte est à leur avantage.



Remarque générale sur les approches expérimentales de l'efficacité des zones tampons

Un certain nombre d'expérimentations a été réalisé pour évaluer les performances des zones tampons vis-à-vis de l'interception du ruissellement, des MES, des fertilisants ou des produits phytosanitaires. Elles opèrent par comparaison de placettes équipées de diverses largeurs de bandes (le plus souvent enherbées) à une placette témoin équivalente, sans bande. Ces essais sont réalisés, soit en conditions de pluie naturelle, soit de pluie et/ou ruissellement simulé. Les premières reproduisent plus fidèlement le fonctionnement normal du système et les secondes permettent de mieux contrôler les facteurs de cette efficacité.

Pour une analyse critique détaillée de l'intérêt et des limites de ces approches expérimentales, on renverra à Lacas (2005b) et Dorioz (2002) ; on se contentera d'insister ici sur deux points :

- la grande majorité de ces expérimentations reproduisent les conditions d'un ruissellement diffus, avec un rapport Surface(impluvium) / Surface(zone tampon) relativement faible, ce qui donne des conditions relativement favorables ;
- beaucoup ont été réalisées aux États-Unis, dans des conditions climatiques assez différentes de celles de l'Europe occidentale, avec en particulier une fréquence des fortes pluies plus élevée (Gril et al. 1991) : donc, en conditions défavorables.

Ces résultats ont néanmoins le mérite d'exister et, très globalement, le premier point tend à compenser (probablement partiellement) le second. On les utilisera, avec une certaine prudence, pour évaluer le dimensionnement des zones tampons. Par ailleurs, ces expérimentations éclairent la compréhension des mécanismes de transfert, et contribuent au raisonnement de leur localisation dans le paysage.

FONCTION DE RETENTION DES MATIERES EN SUSPENSION

ANNEXE A.3

Dispositif enherbé				S.E./S.C. (en %)	Conditions expérimentales	Efficacité (%) Limitation						Référence bibliographique	
nature	longueur (m)	largeur (m)	pente (%)			Ruissellement			transfert MES				
						Minimale	Maximale	Moyenne	Minimale	Maximale	Moyenne		
H	7,6 7,6 7,6 3,6	91 213 305 170	0,1 0,1 0,1 0,6	- - - -	R. Sim. R. Sim. R. Sim. R. Sim.							52 94 9	Wilson (1967)
H	2 4	- -	4 à 7 4 à 7	- -	non spécifiées non spécifiées	38 64	59 70			46 70 90	68 88 92		Roose <i>et al.</i> (1971) cités par Duvoux (1990) Asmussen <i>et al.</i> (1977)
H	4,6	24,4	<3	370	P. Sim.	3	51			94	98		Young <i>et al.</i> (1980)
H	4,06 4,06	21,3 27,4	4 4	150 200	P. Sim. P. Sim.	41 61	66 98			75 66	81 93		Rohde <i>et al.</i> (1980)
H	4,6	24,4	<3	370	P. Sim.	44	73						Dillaha <i>et al.</i> (1986)
H	5,5 5,5	4,6 9,1	11 à 16 11 à 16	25 50	P. Sim. P. Sim.							81 91	Dillaha <i>et al.</i> (1989)
H	5,5 5,5	4,6 9,1	4 à 16 4 à 16	25 50	P. Sim. P. Sim.		27 51		53 70	86 98			Magette <i>et al.</i> (1989)
H	5,5 5,5	4,6 9,2	- -	20 50	P. Sim. P. Sim.		3 20		66	82		50 75	Parsons <i>et al.</i> (1991)
H	4 4	4,3 8,5	2 à 3 2 à 3	10 25	P. Nat. P. Nat.		50 50					70 70	Parsons <i>et al.</i> (1993)
H	4,6 4,6	4,2 8,4	1,5 1,5	10 25	P. Nat. P. Nat.				80	90			Mickelson <i>et al.</i> (1993)
H	1,5 1,5	4,6 9,1	3 à 6 3 à 6	10 20	P. Sim. + R. Sim. P. Sim. + R. Sim.		37 56					72 76	Arora <i>et al.</i> (1993)
H	1,5 1,5	20,1 20,1	- -	3 7	P. Nat. P. Nat.		4 13					41 76	Misra <i>et al.</i> (1994)
H	1,5 1,5	12,2 12,2	2 à 3 2 à 3	3 7	P. Sim. + R. Sim. P. Sim. + R. Sim.					32 39			Misra <i>et al.</i> (1994) cité par Baker <i>et al.</i> (1995)
H	1,5	12,2	-	7	P. Sim. + R. Sim.	54	83						Hoffman (1995) cité par Baker <i>et al.</i> (1995)
H	-	9,1	-	25, 10, 8	P. Nat.			57					Patty (1997) La Jaillière (site 1) (1993-94)
H	25 25	5,7 11,1	10 10	44 23	P. Nat. P. Nat.	0 0	100 100	66 75	0 0	100 100	82 90		Real ITCF (1998) et Patty (1997) La Jaillière (site 2) (1993-94)
H	50 50 50	6 12 18	10 10 10	83 42 28	P. Nat. P. Nat. P. Nat.	0 0 0	99 99 100	66 73 73			>98,8 >99,2 >99,9		Real ITCF (1998) et Patty (1997) Bignan (1993-94)
H	50 50 50	6 12 18	13,8 13,8 13,8	83 42 28	P. Nat. P. Nat. P. Nat.	75 86 67	100 100 100	87 95 96			>72,5 >35,6 >97,3		Real ITCF (1998) et Patty (1997) Pléio (1994-95)
H	50 50	6 12	13,8 13,8	83 42	P. Nat. P. Nat.	79 86	100 100	92 97			88,9 96,8		Coyne <i>et al.</i> (1995) cité par Dossekey (2001)
H	50	18	13,8	28	P. Nat.	67	100	96			99,4		Coyne <i>et al.</i> (1998) cité par Dossekey (2001)
H	-	9	9	-	P. Sim.			88			99		Arora <i>et al.</i> (1995/6) cité par Dossekey (2001)
H	-	4,5 9	9	-	P. Sim.	76	85		96	98			Barfield <i>et al.</i> (1998) cité par Dossekey (2001)
H	-	20,1	2	-	P. Nat.	9	98		40	100			Tingle <i>et al.</i> (1998) cité par Dossekey (2001)
H	-	4,6 13,7	9 9	-	P. Sim.						>90		Sheridan <i>et al.</i> (1998) cité par Dossekey (2001)
H	-	0,5 4	3	2 à 18	P. Sim.	83 47	93 69		88	98			Schmitt <i>et al.</i> (1999) cité par Dossekey (2001)
H	-	8	3,5	-	P. Nat.	56	72		78	83			Lee <i>et al.</i> (2000) cité par Dossekey (2001)
H + A	-	7,5 15	6 à 7 6 à 7	-	P. Sim.	36	82		84	98			Uusi-kämpä <i>et al.</i> (2000) cité par Dossekey (2001)
H + A	-	7,1 16,3	5,0	-	P. Sim.	25	80		70	94			Duchemin <i>et al.</i> (2002)
H + A	-	10	10,0	-	P. Nat.	0	15						Blanco-Canqui <i>et al.</i> (2004)
H	3 3 3	3 6 9	2 à 3 2 à 3 2 à 3	4,6 9,2 13,8	P. Nat.			47,9 87,3 87,8			89,7 87,3 87,8		Deletic <i>et al.</i> (2006)
H	3	0,7	4,9	8,7	P. Sim.			12,7			71,5		Syversen (2005)
H + B	3	0,7	4,9	8,7				16			92,9		Lecomte (1999)
H	3	4	4,9	50				26			90,6		Rankins (2001) cité par Lacas <i>et al.</i> (2005)
H + B	3	4	4,9	50				26,1			97,1		Chambre d'Agri. Du Vaucluse (2000) cité par Lacas <i>et al.</i> (2005)
H	0,3	6,2	7,8	tout tout tout	R. Sim. 0,33 l/s/m R. Sim. 0,67 l/s/m R. Sim. 1,00 l/s/m	38 55 83	67 77 85		76 61 75	77 63 86			Souiller <i>et al.</i> (2002) cité par Lacas <i>et al.</i> (2005)
H	10 10	5 10	12 à 17 12 à 17	11 22	P. Nat et P. Sim.			>80	81	91			Klöppel <i>et al.</i> (1997) cité par Lacas <i>et al.</i> (2005)
H	8 8	3 6	3,7 3,7	5 10	P. Nat.	53 57	100 100	73 80	76	81 98			Misra <i>et al.</i> (1996) cité par Lacas <i>et al.</i> (2005)
H	-	0,3	-	1,4	P. Nat.	49	76						Van Dijk <i>et al.</i> (2001)
H	-	3 6	- -	4 8	P. Nat.	55	86						
H	-	3	-	-	R. Sim.	55	92						
H	-	10 20	- -	- -	R. Sim.	0	92						
H	-	12	-	3 7	R. Sim.	29	34						
H	0,5 0,5 0,5 0,5	1 4 5 10	5,2 5,2 2,3 à 5,2 2,3 à 5,2	ZTE jeune	R. Sim. 0,5 l/s/m	0 49 0 28	1 85 33 95		45 74 52 84	54 83 82 100	77 92		
H	0,5 0,5 0,5	1 5 10	8,5 7-8,5 8,5	ZTE ancienne		8 19 66		36 78	58 75 96	82 94 99	97		
Moyenne						40	80	54	67	89	80		

Tableau 3.2 Efficacité des zones tampons vis-à-vis de l'interception de l'eau et des MES : bilan des expérimentations

3.2. Efficacité sélective : le tri granulométrique

Des travaux ont été plus loin, en comparant la composition granulométrique des MES en entrée et en sortie de zone tampon (Neibling 1979, Lecomte 1999, Lee 2000, Deletic 2006, Meyer 1995).

Les résultats obtenus par V. Lecomte, pour des ruissellements s'écoulant sur 6 m de zone enherbée (représentant 10 % de la surface contributive) en sol de limons montrent que dans la quantité de particules restantes (4 % de la quantité initiale), la proportion des classes 0-2 μm et 2-10 μm double presque entre l'entrée et la sortie, la classe 10-20 μm s'enrichit également, par contre les classes supérieures diminuent.

Après une heure de simulation de ruissellement sur un chenal de 5 m enherbé, A. Deletic obtient des taux de rétention globaux des MES compris entre 61 à 86 % mais bien différenciés selon la taille des particules :

Particules de 0 à 5.8 μm : de 18 à 86 %, moyenne de 45 %
Particules de 5.8 à 22 μm : de 23 à 86 %, moyenne de 45 %
Particules de 22 à 57 μm : de 66 à 87 %, moyenne de 77 %
Particules de 57 à 180 μm : de 79 à 92 %, moyenne de 89 %

De même, en condition de chenal expérimental, Meyer et al (1995), montrent que des zones tampons enherbées étroites de 0.14 à 0.76 m retiennent 90 % des éléments de la classe des sables et seulement 20 % des fractions d'argile et de limon.

3.3. Les facteurs de l'efficacité

De très nombreux facteurs influent sur l'efficacité de la zone tampon vis-à-vis de la rétention des MES.

Différents auteurs (Dabney 1995, Jin 2000, Meyer 1995, Schmitt 1999 et Van Dijk 1996) considèrent les quatre facteurs suivants comme étant les plus importants (ZT enherbées) :

1. la densité et la hauteur de la végétation (tiges, feuilles) de la ZT en relation avec son âge ;
2. l'épaisseur de la lame de ruissellement par rapport à la hauteur de la végétation ;
3. la taille des particules ou agrégats entrant sur la ZT ;
4. le débit de l'écoulement arrivant sur la ZT.

Les deux derniers facteurs ne sont pas contrôlables, sinon par la maîtrise du ruissellement et de l'érosion sur le bassin versant – ce qui est une autre question. Les deux premiers, en revanche, concernent la zone tampon elle-même et sont contrôlables : on va donc les aborder ici.

Mais, auparavant, il est intéressant de se demander pourquoi la largeur de la zone tampon n'apparaît pas comme un facteur important de son efficacité.

◆ Rôle de la largeur de la ZT enherbée

D'après Dillaha et al. (1989) et Magette et al. (1989), 53 à 86 % des MES sont retenues dans les 5 premiers mètres et, dans les 5 m suivants, une quantité environ 5 fois plus faible est piégée – mais il s'agit de fractions plus fines.

Dans le cas d'une ripisylve, Barling et al. (1994) ont montré que, pour un même débit et la même végétation, la distance optimale pour piéger les sables, limons et argiles était respectivement de 3, 15 et 122 m. Mais les auteurs ne précisent pas clairement ce qu'il entendent par « distance optimale ».

Largeur du filtre (m)	% de réduction de sédiments
91.5	80
26,2	80
22.4	92
9.1	84
4.6	70

Tableau 3.3 Largeur et sédiments selon Castelle et al. (1994), in Dorioz (1982)

Castelle (tableau 3.3) montre que la réduction de la charge en MES plafonne à partir de 9 m.

Par ailleurs, beaucoup d'études concluent que ce paramètre n'est pas déterminant, ce qui peut paraître surprenant (Chambre d'Agriculture du Vaucluse 2000, Dillaha 1989, Lim 1998, Schmitt 1999, Spatz 1997, Srivastava 1996, Tingle 1998, Patty 1997, Lecomte 1999, Dosskey 2001).

En fait, on peut suggérer une explication simple : la végétation des placettes expérimentales semble être systématiquement des graminées en couvert dense. Or, on a vu l'importance de la sédimentation dans le premier mètre dans ces conditions : les particules qui ne sont pas piégées à ce niveau sont les plus fines, et elles ne représentent généralement qu'une faible proportion pondérale.

Quelques auteurs ont tenté une approche par modélisation de la question : ces modèles restent trop sommaires (comme celui de Barfield 1979, qui ne prend pas en compte l'infiltration) ou trop complexes pour être utilisés facilement d'une manière opérationnelle (Munoz-Carpena 1999).

En fait l'intérêt de la question dépend de l'objectif exact que l'on veut atteindre en matière de protection des eaux. On retiendra pour l'instant qu'une faible largeur pourra être suffisante pour répondre à un objectif quantitatif de réduction du flux de MES. Par rapport à un objectif de rétention des particules fines, des éléments sur la largeur adaptée pourront indirectement être tirés du chapitre suivant concernant la rétention du phosphore.

Enfin, une évidence mérite d'être rappelée : si tout le volume de ruissellement s'infiltré dans la zone tampon – ce qui n'est pas une situation exceptionnelle – son efficacité vis-à-vis de la rétention des MES sera totale.

◆ **Rôle de la pente**

La pente pénalise l'efficacité de la zone tampon (en rapport avec l'augmentation de la vitesse du ruissellement). Aux USA, les largeurs préconisées sont mises en relation avec la pente ; cependant, ces préconisations ont été modifiées plusieurs fois depuis les années 80 (Dorioz 2006), devenant de plus en plus exigeantes. A titre d'illustration la dernière en date est présentée dans le tableau 3.4.

Pente (%)	Largeur (m)
< 0,5	11 – 22
0,5 – 5	22 – 36
> 5	36 - 71

Tableau 3.4 Préconisations du SCS aux États-Unis (1997), in Dorioz (2006)

On notera que ces valeurs sont assez conservatives, par rapport aux données de la littérature. Cela peut être expliqué par les conditions sévères d'érosion aux États-Unis, mais aussi par la volonté d'atteindre un niveau élevé de réduction de la turbidité.

◆ **Rôle de la hauteur de végétation**

Une végétation dense et haute est celle qui a le plus d'influence sur le ralentissement des écoulements, et donc la sédimentation des particules (Barfield 1979, Kao 1978, Munoz 1993, Tollner 1976, Williams 1988, Wilson 1967). Mais la limite d'efficacité est atteinte lorsque l'écoulement submerge la végétation qui se plie ou se couche et ondule dans le courant (Dosskey 2001, Dickey 1981, Wilson 1967). Aussi, les enherbements avec des tiges raides fonctionnent mieux. Dillaha (1986) recommande de maintenir une hauteur minimale de 10 à 15 cm.

◆ **Rôle de la densité de végétation**

La rugosité augmente avec la densité des tiges et, en conséquence, la vitesse diminue (figure 3.3).

La densité de végétation est mesurée soit par le nombre de brins par cm² (tiges + feuilles) soit par leur écartement moyen (tiges au contact du sol). A partir de modèles sédimentaires, Muñoz (1993 et 1999) recommande un écartement moyen de 2.2 cm. Il constate un effet significatif sur l'augmentation de la sédimentation des particules fines (argile et limons) pour une gamme d'écartement allant de 0.05 cm à 10 cm. Au-delà de 10 cm, il n'y a plus de variation d'efficacité. Pour les fractions sableuses, l'évolution de l'efficacité est uniforme même en deçà de 10 cm.

Deletic (2006) présente des résultats avec une densité de 3.6 brins par cm², ou un écartement moyen de 0.15 cm. V. Lecomte (1999) observe, au printemps, une amélioration de l'efficacité d'une zone enherbée de 6 m par rapport à l'automne-hiver, qu'elle attribue à l'augmentation de la densité du couvert végétal.



FONCTION DE RETENTION DES MATIERES EN SUSPENSION

ANNEXE A.3

Plus les particules transportées par les flux sont fines, plus il est nécessaire de prendre en compte ce paramètre et de choisir des densités élevées. Ce facteur peut aussi expliquer en partie la meilleure efficacité des zones tampons enherbées âgées.

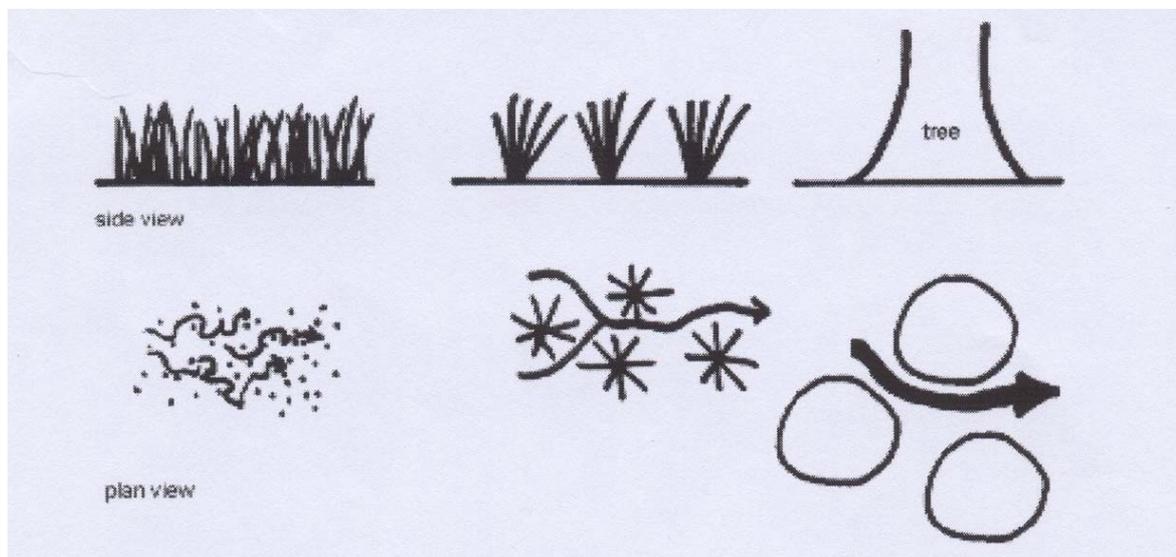


Figure 3.3 Rôle de la densité du couvert au sol et rétention des MES (Karssies et al., 1999)

⇒ La densité de la végétation au niveau du sol et la manière dont elle permet la dispersion et le ralentissement de l'écoulement sont les principales propriétés du couvert végétal d'une bande filtrante du point de vue de son efficacité à piéger les MES (l'épaisseur des flèches est une indication de la vitesse d'écoulement).

◆ Différents couverts végétaux

Il apparaît assez nettement que les graminées constituent le couvert végétal le plus adapté. Un couvert arboré et/ou arbustif peut néanmoins convenir, grâce à sa forte perméabilité : soit un boisement en place, en position de zone tampon et d'une largeur significative, soit une association zone tampon enherbée (en amont) + zone tampon boisée (en aval), associant les avantages des deux : dominante de la rugosité d'abord, puis de la perméabilité ensuite.

3.4. Évolution temporelle

Ce qui a été dit au chapitre précédent sur la variation temporelle de l'infiltration dans une zone tampon intervient évidemment. Il faut y ajouter les conséquences sur la rugosité :

- l'espacement entre deux épisodes de ruissellement joue un rôle sur la capacité du couvert végétal (surtout les graminées) à se redresser et à traverser les dépôts ;
- la végétation est plus dense pendant la période de végétation et augmente avec la maturité de la zone tampon. A l'inverse, si le vieillissement conduit à une perte de densité des tiges, sa rugosité diminue.

Par ailleurs, l'aptitude même des zones tampons à faire sédimenter d'une manière presque instantanée les particules grossières peut se révéler un inconvénient pour leur fonctionnement. En effet, ce processus se manifestant intensément dans les premiers décimètres (et même un peu en amont), cela peut conduire à la formation d'un bourrelet de dépôt en bordure, entraînant la formation de ruissellement concentré, voire la dérivation du ruissellement hors de la zone tampon. Ce problème se manifeste assez rapidement aux USA, dans les régions où l'érosion est forte (Dillaha, 1986). En France, les situations érosives sévères en zone agricole sont bien moins fréquentes, mais existent néanmoins (vignobles de coteau sur arène granitique, par exemple). Ailleurs, il sera sensiblement plus lent à se produire.

4. Le cas des chenaux enherbés

L'enherbement des fonds de thalwegs (les « chenaux enherbés ») pour en limiter l'érosion est une technique employée classiquement aux États-Unis (Gril et al. 1991) et qui a été développée un peu en France, en particulier dans le Pays de Caux. Ces chenaux enherbés paraissent a priori également intéressants pour limiter le transfert des MES. Mais l'expérience montre qu'on peut se heurter à deux problèmes :

- dans les régions à forte érosion, la terre interceptée est susceptible de recouvrir complètement l'herbe sur quelques dizaines de mètres de longueur, ce qui réduit leur efficacité le temps que l'herbe repousse au-dessus de ces dépôts ;
- les chenaux enherbés sont habituellement dimensionnés pour collecter des débits qui peuvent être très importants, grâce à la bonne résistance de l'enherbement au ravinement : ces débits conduisent au couchage de l'herbe, ce qui n'est pas gênant par rapport à leur fonction première, mais limite fortement leur intérêt pour piéger les MES. Pour limiter cet inconvénient, il est suggéré de réaliser des chenaux larges (une vingtaine de m) et peu profonds (moins de 20 cm), tout en sachant qu'il y a une évolution temporelle inévitable du fait de la sédimentation.

5. Le cas des haies sur talus

Carnet, dès 1978, a mis en évidence la dissymétrie des sols au voisinage des talus perpendiculaires à la pente : il y a accumulation à l'amont et érosion à l'aval. Cette différenciation est d'autant plus visible que le sol de départ est peu épais. Walter et al. (2003, cité par Viaud 2004) ont décrit l'évolution du profil de sol sur un versant jusqu'à un talus et ont observé un épaissement progressif de l'horizon organique, avec un enrichissement net en carbone dans la haie. Ce dernier a ainsi deux origines : le transfert par ruissellement et le rôle propre de la végétation. Les mêmes auteurs estiment qu'un réseau de haies de densité 200 m/ha contribue pour 38 % au stock de carbone du bassin versant.

Ces observations montrent le rôle anti-érosif et de piégeage des MES des haies sur talus, mais restent qualitatives : il n'y a pas, à notre connaissance, de mesure quantitative directe de leur efficacité.

6. Le cas des ripisylves

On a vu au chapitre précédent (§ 4), le rôle de ralentisseur joué par la végétation rivulaire. Cet effet a pour conséquence la limitation des MES dans le cours d'eau, à la fois celles qui proviennent des versants et celles qu'il transporte, en période de débordement.

Références citées

- ♦ AUZET A.V., 1990. L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques. Min. Env. Centre d'Études et de Recherches Eco-Géographiques, 39 pp.
- ♦ BARFIELD B.J., TOLNER E.W., HAYES J.C., 1979. Filtration of sediment by simulated vegetation. I. Steady-state flow with homogeneous sediment. Transactions, American Society of Agricultural Engineers, 22:540-545, 548.
- ♦ BARLING R.D., MOORE I.D., 1994. Role of buffer strips in management of waterway pollution : a review. Environmental Management, 18:543-558.
- ♦ CARNET C., 1978. Étude des sols et de leur régime hydrique en région granitique de Bretagne : une approche du rôle du bocage. Thèse 3ème cycle, Université de Rennes, Multigr, 235 p.
- ♦ CASTELLE A.J., JOHNSON A.W., CONOLLY C., 1994. Wetland and stream buffer size requirements-a review. Journal of Environmental Quality, 23:878-882.
- ♦ CHAMBRE D'AGRICULTURE DU VAUCLUSE, 2000. Efficacité des bandes enherbées sur la qualité des eaux de ruissellement. Groupement de développement agricole-Viticulture du Vaucluse, 26 p.
- ♦ DABNEY S.M., MEYER L.D., HARMON W.C., ALONSO C.V., FOSTER G.R., 1995. Depositional patterns of sediment trapped by grass hedges. Transactions, American Society of Agricultural Engineers, 38:1719-1729.

- ♦ DELETIC A., FLETCHER T.D., 2006. Performance of grass filters used for stormwater treatment-a field and modelling study. *Journal of hydrology* 317 (2006), pp 261-275.
- ♦ DICKEY E.C., VANDERHOLM D.H., 1981. Vegetative filter treatment of livestock feedlot runoff. *Journal of Environmental Quality*, 10:279-284.
- ♦ DILLAHA T.A., RENEAU R.B., MOSTAGHIMI S., SHANHOLTZ, LEE D., 1989. Vegetative filter strips for agricultural nonpoint source pollution control. *Transactions, American Society of Agricultural Engineers*, 32 :513-519.
- ♦ DILLAHA T.A., SHERRARD J.H., LEE D., 1986. Long-term effectiveness and maintenance of vegetative filter strips. *Virginia Water Resources Research Center, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Bulletin* 153, 31 p.
- ♦ DORIOZ J.M., WANG D., POULENARD J., TRÉVISAN D. 2006. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics ; a critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment.*, 117, pp. 4-21.
- ♦ DORIOZ J.M., VANSTEELANT A., 2002. Les dispositifs enherbés : outils de gestion de la pollution diffuse phosphorée d'origine agricole ? Rapport bibliographique pour le CORPEN, 63 p.
- ♦ DOSSKEY M. G., 2001. Profile, toward quantifying water pollution abatement in response to installing buffers on crop land. *Environmental Management* Vol. 28, N° 5, pp. 577-598.
- ♦ GRIL J.-J., DUVOUX B., 1991 - Maîtrise du ruissellement et de l'érosion. Conditions d'adaptation des méthodes américaines. *CEMAGREF*, 157 p.
- ♦ JIN C.-X., ROMKENS M.J.M., GRIFFIOEN F., 2000. Estimating manning's roughness coefficient for shallow overland flow in non-submerged vegetative filter strips. *Trans. ASAE* 43, 1459-1466.
- ♦ KAO D.T.Y, BARFIELD B.J., 1978. Prediction of flow hydraulics for vegetated channels. *Transactions, American Society of Agricultural Engineers*, 21:489-494.
- ♦ KARSSIES L.E., PROSSER I.P., 1999. Guidelines for riparian filter strips for Queensland irrigators. *SCIRO Land and Water, Australia, TR* 32/99. 39 p.
- ♦ KIRKBY M. J., MORGAN, R. P. C., 1980, *Soil Erosion*, Wiley, New York
- ♦ LACAS J.G. 2005b. Processus de dissipation des produits phytosanitaires dans les zones tampons enherbées ; étude expérimentale et modélisation en vue de limiter la contamination des eaux de surface. Thèse Cemagref –Université de Montpellier II., 307 p.
- ♦ LECOMTE V., 1999. Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant. Thèse, 235 p.
- ♦ LEE K.H., ISENHART T.M., SCHULTZ R.C., MICKELSON S.K., 2000. Multispecies riparian buffers trap sediment and nutrients during rainfall simulations. *Journal of Environmental Quality*, 29:1200-1205.
- LIM T.T., EDWARDS D.R., WORKMAN S.R., LARSON B.T., DUNN L., 1998. Vegetated filter strip removal of cattle manure constituents in run-off, *Trans. ASAE* 41, 1375-1381.
- ♦ MAGETTE W.L., BRINSFIELD R.B., PALMER R.E., WOOD J.D., 1989. Nutrient and sediment removal by vegetated filter strips. *Transactions, American Society of Agricultural Engineers*, 32:663-667.

FONCTION DE RETENTION DES MATIERES EN SUSPENSION

ANNEXE A.3

- ♦ MEYER L.D., DABNEY S.M., HARMON W.C., 1995. Sediment-trapping effectiveness of stiff-grass hedges. Transactions, American Society of Agricultural Engineers 38:809-815.
- ♦ MUÑOZ-CARPENA R., PARSONS J. E., GILLIAM J. W., 1993. Numerical approach to the overland flow process in vegetative filter strips. Transactions, American Society of Agricultural Engineers, 36:761-770.
- ♦ MUÑOZ-CARPENA R., PARSONS J. E., GILLIAM J. W., 1999. Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips. Journal of hydrology 214 (1999) 111-129.
- ♦ NEIBLING W.H., ALBERTS E.E., 1979. Composition of yields of soil particles transported through sod strips, paper n° 792065, ASAE, St Joseph, Michigan.
- ♦ PAPY F, BOIFFIN J., 1988. Prévision et maîtrise de l'érosion : influence des systèmes de cultures. Perspectives agricoles n° 122, pp 93.
- ♦ PATTY L., REAL B., GRIL J.-J., 1997. The use of grassed buffer strips to remove pesticides, nitrate and soluble phosphorus compounds from runoff water, Pestic. Sci. 49, 243-251.
- ♦ ROOSE E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. Bulletin pédagogique de la FAO n° 80 2d. FAO, 422 p.
- ♦ SCHMITT T.J., DOSSKEY M.G., HOAGLAND K.D., 1999. Filter strip performance and processes for different vegetation, widths, and contaminants. J. Environ. Qual. 28, 1479-1489.
- ♦ S.C.S., 1988, 1990, 1997. Standards and specifications. Soil Conservation Service. Field Office technical guide. USADA-SCS, Washnigton, USA.
- ♦ SPATZ R., WALKER F., HURLE K., 1997. Effect of grass buffer strips on pesticide runoff under simulated , Med. Fac. Landbouww. Univ. Gent. 62, 799-806.
- ♦ SRIVASTAVA P., EDWARDS D.R., DANIEL P.A., MOORE P.A., COSTELLO T.A., 1996. Performance of vegetative filter strips with varying pollutant source and filter strip lengths. Trans. ASAE 39, 2231-2239.
- ♦ TINGLE C.H., SHAW D.R., BOYETTE M., MURPHY G.P., 1998. Metolachlor and metribuzin losses in runoff as affected by width of vegetative filter strips. Weed Science 46:475-479.
- ♦ TOLLNER E.W., BARFIELD B.J., HAAN C.T., KAO T.Y., 1976. Suspended sediment filtration capacity of simulated vegetation. Transactions, American Society of Agricultural Engineers, 19:678-682.
- ♦ VAN DIJK P.M., KWAAD F.J.P.M., KLAPWIJK M., 1996. Retention of water and sediment by grass strips. Hydrol. Process. 10, 1069-1080.
- ♦ VIAUD V. 2004. Organisation spatiale des paysages bocagers et flux d'eau et de sédiments ; approche empirique et modélisation. Thèse ENSA Rennes.
- ♦ WALTER C., MEROT P., LAYER B., DUTIN G. 2003. The effect of hedgerows on soil organic carbon storage in hillslope. Soil Use and Management, 19. pp 201-207.
- ♦ WILLIAMS R.D., NICKS A.D., 1988. Using CREAMS to simulate filter strip effectiveness in erosion control. Journal of soil and Water Conservation, 43:108-112.
- ♦ WILSON L.G., 1967. Sediment removal from flood water by grass filtration. Transactions, American Society of Agricultural Engineers, 10:35-37.