

Vers un outil de dimensionnement des dispositifs enherbés pour limiter les flux de phytosanitaires transférés par ruissellement – Tests de scénarios

Nadia Carlier^a, Gaele Giannone^a, Pierre-Henri Bazin^a, Rim Cherif^b et Jean-Joël Gril^a

En France, une des décisions phares du Grenelle de l'Environnement vise à réduire de moitié l'usage des pesticides d'ici dix ans, en privilégiant des pratiques agricoles plus respectueuses des milieux naturels. En complément, les bandes enherbées, judicieusement implantées, peuvent être efficaces pour limiter le transfert des produits phytosanitaires vers les eaux de surface, en piégeant les pesticides transportés par les eaux de ruissellement. S'appuyant sur les simulations numériques des écoulements pour évaluer plus précisément les capacités de filtration des dispositifs enherbés, et ce dans des contextes agropédo-climatiques variés, les auteurs nous présentent ici les premiers développements d'un outil permettant de dimensionner et de localiser au mieux les bandes enherbées sur un bassin versant donné.

Contexte

L'utilisation massive des produits phytosanitaires, notamment pour assurer une productivité élevée de l'agriculture, a conduit en France à une contamination des différents compartiments de l'environnement dont le constat est largement partagé. La directive cadre sur l'eau (DCE, 2000/60/CE) suppose pourtant d'atteindre le « bon état » des masses d'eau avant 2015 et impose donc la mise en œuvre d'actions pertinentes en termes de diagnostic des causes et de réduction de la contamination. En parallèle, le plan Ecophyto 2018 (MAP¹, 2008), récemment adopté dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, a vocation à diminuer la dépendance de l'agriculture aux produits phytosanitaires. Il s'articule autour de huit axes complémentaires, une des mesures phare étant la diminution de moitié des quantités de produits phytosanitaires utilisées, à l'horizon de dix ans, complétée par le retrait ou la réduction d'usage des molécules jugées les plus dangereuses. Le plan n'aborde pas la question **des transferts de produits phytosanitaires**, l'accent étant mis quasi exclusivement sur **la réduction des intrants** à l'échelle de la parcelle. Cet aspect est pourtant

essentiel dans la mesure où les quantités rejoignant le milieu récepteur dépendent fortement de l'organisation du paysage, et notamment de la présence ou non de zones tampons (dispositifs enherbés ou boisés, zones humides, talus...) et de courts circuits (réseau de drainage, fossés de bord de route, rigoles d'érosion...). En particulier, les dispositifs enherbés sont susceptibles de diminuer de façon significative les flux de phytosanitaires transférés par ruissellement entre la parcelle où ils sont épandus et le réseau hydrographique (ou les eaux souterraines dans un contexte karstique). Ces dispositifs sont le plus souvent implantés en bordure de rivière, en conformité avec différentes mesures réglementaires ou incitatives et par facilité d'implantation pour les agriculteurs². Ce n'est pourtant pas la seule implantation possible, comme le rappelle la brochure du CORPEN³ (CORPEN, 2007) faisant le point sur les connaissances disponibles sur le rôle des zones tampons pour la protection des eaux. En effet, l'efficacité de ces structures provient essentiellement de l'infiltration (Lacas *et al.*, 2005), ce qui implique que la capacité d'infiltration du sol doit être suffisante, et les écoulements non fortement

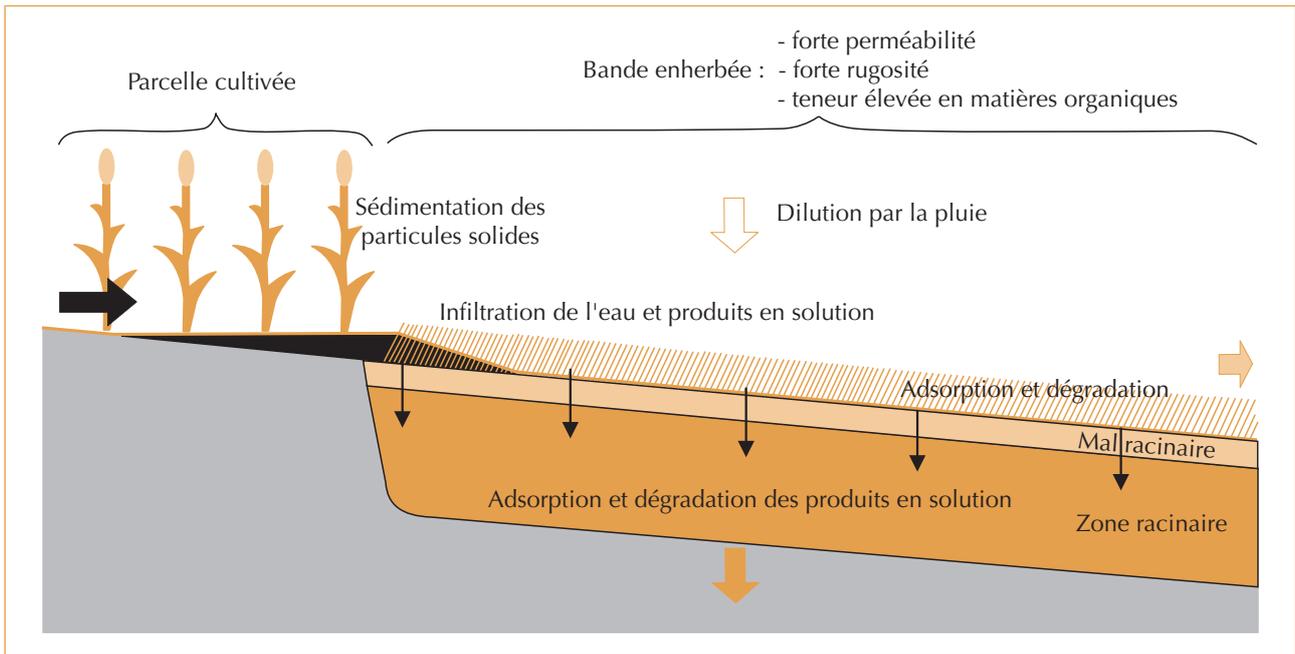
Les contacts

a. Cemagref Lyon, UR QELY, Qualité de l'eau et prévention des pollutions, 3 bis quai Chauveau, CP 220, 69336 Lyon Cedex 09
b. ISSTE, Institut supérieur des sciences et technologies de l'environnement, Technopole de Borj Cédria, CP 1003 hammam-lif, Tunis, Tunisie

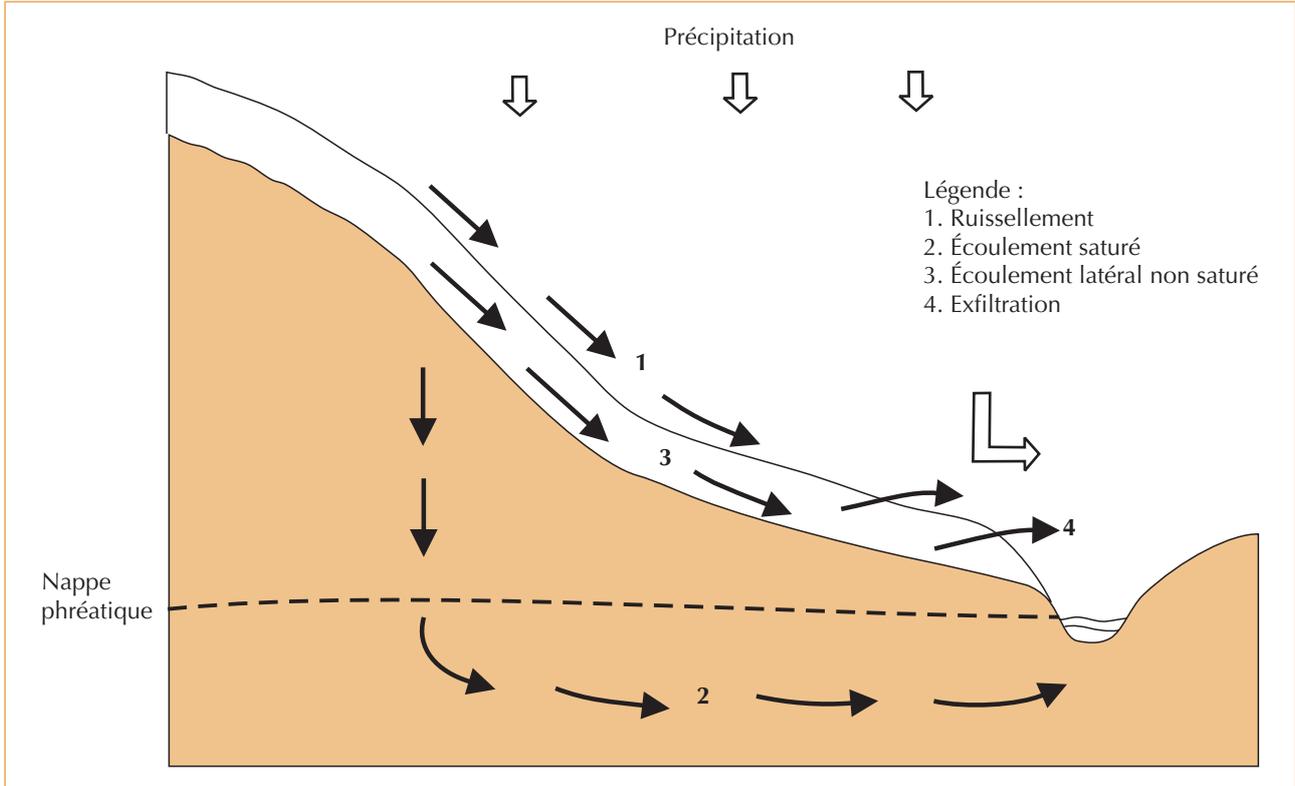
1. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

2. On notera que cette logique d'aménagement, ayant pour objectif le contrôle de la pollution des eaux, recoupe celle des « trames vertes » et « bleues » prises en compte dans le Grenelle de l'Environnement, qui vise la préservation de la biodiversité.

3. Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement.



▲ Figure 1 – Processus de dissipation des produits phytosanitaires dans une bande enherbée (d'après Lacas, 2005).



▲ Figure 2 – Chemins d'écoulement sur un versant (d'après Dunne, 1978).

concentrés. Les principaux processus à l'œuvre au sein d'une bande enherbée sont représentés sur la figure 1. La figure 2 présente les principaux types d'écoulement sur un versant (hors structures anthropiques comme les fossés, drainage par tuyaux enterrés...).

À l'heure actuelle, il n'existe que des indications empiriques pour le dimensionnement des dispositifs enherbés, liées essentiellement à la longueur du versant intercepté (CORPEN, 2007) et ne tenant pas compte des caractéristiques propres du site considéré (occupation du sol, type de sol, pente, climat...). Pourtant, la demande est forte d'éléments permettant de dimensionner avec plus de précision les dispositifs enherbés, à la fois pour assurer au mieux l'efficacité des plans d'action mis en oeuvre à l'échelle de petits bassins versants et pour disposer d'arguments quantitatifs vis-à-vis des acteurs de terrain.

Le travail présenté ici est une première étape dans la mise au point d'un tel outil de dimensionnement, qui tente d'affiner les recommandations empiriques fournies par le CORPEN, en intégrant autant que possible la diversité des situations que l'on peut rencontrer sur le territoire métropolitain, qu'il s'agisse des caractéristiques intrinsèques des bandes enherbées ou des ruissellements entrants (débit et durée). Il s'appuie sur des simulations numériques des écoulements au sein de bandes enherbées, afin d'évaluer leur efficacité à limiter le ruissellement dans **plusieurs contextes agro-pédo-climatiques contrastés**. La démarche utilisée et les scénarios choisis sont d'abord présentés, avant d'exposer les résultats obtenus et les conclusions que l'on peut en tirer d'un point de vue opérationnel. Nous nous sommes intéressés ici aux bandes enherbées ; l'approche reste toutefois valable pour les autres zones tampons que sont les prairies ou les zones boisées. Elle ne s'applique pas en revanche aux haies sur talus ou zones tampons humides, qui relèvent d'un autre type de fonctionnement.

Matériels et méthodes

Il s'agit de simuler le ruissellement sortant de bandes enherbées de caractéristiques variées, dans des contextes agro-pédo-climatiques contrastés. Dans cette première étape, seul le **ruissellement de l'eau** est considéré. On ne s'intéresse pas ici au devenir des produits infiltrés, question prise en compte dans d'autres travaux (Boivin et al., 2007 ; Lacas et al., 2006). Par

ailleurs, on considère, en première approximation, que la rétention des pesticides à la surface du dispositif est négligeable⁴ : un dispositif enherbé sera efficace pour dissiper les flux de phytosanitaires transférés par ruissellement pour autant qu'il limite ce ruissellement. L'abattement des flux de pesticides transférés dans le ruissellement sera donc fonction à la fois de l'abattement de la lame ruisselée et du chémogramme⁵ des pesticides dans le ruissellement. Nous reviendrons sur ce point dans la discussion.

Les contextes agro-pédo-climatiques ayant servi de base aux simulations ont été choisis, d'une part parce qu'ils représentaient des secteurs étendus aux situations bien typées, d'autre part parce que des données relatives au fonctionnement des bandes enherbées à l'échelle de la bande enherbée y étaient disponibles, ce qui n'est pas très fréquent dans la littérature. Il s'agit des sites :

– de **La Morcille**, situé dans le Beaujolais viticole. Les pentes sur ce bassin sont fortes (15 à 25 %), les sol sableux et très perméables. Les événements estivaux y sont fréquemment intenses, induisant une érosion marquée. Les données servant de base aux simulations sont issues de la thèse de Lacas (2005) qui y a étudié le fonctionnement d'une bande enherbée située à l'aval d'une parcelle de vigne, en considérant à la fois l'abattement du ruissellement et le devenir des produits infiltrés. C'est donc un site abondamment documenté, et sur lequel une modélisation a déjà été menée, permettant de valider les paramètres d'entrée du modèle HYDRUS-2D ;

– de **La Jaillière**, situé en Loire Atlantique. C'est sur ce site que les premières expériences relatives à la dissipation au sein de bandes enherbées des flux de pesticides transférés dans le ruissellement ont été menées en France (Patty, 1997). Ce site, géré par Arvalis-Institut du végétal, est essentiellement cultivé en céréales et fourrages. Les sols bruns lessivés sont situés sur un socle peu profond et peu perméable de schiste plus ou moins altéré, conduisant à un engorgement fréquent en hiver. Les sols cultivés sont ainsi souvent drainés ; les pentes sont de 2 à 5 %. Les caractéristiques des sols de bandes enherbées sont issues de Souiller et al. (2002) et Madrigal-Monarez (2004), la partie inférieure du profil étant décrite dans Adamiade (2004). Les événements ruisselants « types » proviennent d'une parcelle expérimentale non drainée suivie par Arvalis-Institut du végétal ;

4. Ce n'est probablement pas tout à fait le cas quand la zone tampon est large (par exemple, une prairie) et pour les molécules à forte capacité de fixation ; on manque toutefois de données précises sur cette question.

5. Courbe de variation de la concentration en fonction du temps, associée à l'hydrogramme.

– du **Pays de Caux**, région de grandes cultures aux sols limoneux très battants. Les scénarios à simuler ont été définis à partir de Lecomte (1999) et Ouvry (communication personnelle). Les pentes sont faibles sur le plateau (moins de 1 %) et peuvent atteindre quelques pourcents (2 à 5 %) en bordure de plateau.

Le modèle utilisé est HYDRUS 2D (Simunek *et al.*, 1999), logiciel modélisant les écoulements dans le sol, dont le concepteur nous a obligeamment fourni une version permettant de représenter également le ruissellement à la surface du système modélisé (encadré 2).

Définition des scénarios

Les caractéristiques générales des sites ayant servi de base aux scénarios sont synthétisées dans le tableau 1. Pour chaque site, on a repré-

senté des bandes de pentes (2 ; 7 et 15 %), de rugosité (coefficient de Manning de 0,05 ; 0,1 et 0,4 s.m^{-1/3}, correspondant à des rugosités respectivement faible, moyenne et forte) et de largeur (1 ; 5 ; 10 et 20 m) différentes⁶. Ces paramètres sont en effet tous susceptibles d'avoir une influence significative sur le fonctionnement de la bande.

Pour chaque site, on a également modélisé des événements ruisselants modérés et longs (plutôt hivernaux) et d'autres intenses mais courts (plutôt estivaux), afin d'évaluer l'évolution de l'efficacité du dispositif enherbé au fil des saisons. Les caractéristiques de ces événements ont été déterminées en fonction :

– de la taille moyenne des parcelles dans la zone (relevée sur le site Géoportail⁷), qui conditionne le rapport surface ruisselante/surface enherbée,

6. On entend ici par « largeur de bande » la dimension du dispositif dans le sens de la pente, c'est-à-dire la distance possiblement parcourue par le ruissellement au sein de la bande. Le dispositif enherbé est considéré comme étant plan : il n'y a donc pas de phénomène de convergence ou divergence des écoulements, et les débits entrants sont exprimés en L/s pour une bande de 1 m de large.

7. Destiné aux citoyens comme aux services de l'État, aux collectivités publiques et aux entreprises, le Géoportail (www.geoportail.fr) est un site internet de référence pour l'accès aux données géographiques publiques.

► Tableau 1 – Caractéristiques des sites d'études.

8. Climat de type océanique : hivers doux et pluvieux, étés frais et relativement humides.

9. Climat du département Rhône : hivers rigoureux et relativement secs, étés chauds et ensoleillés avec des orages violents fréquents.

	La Jaillière	Le Pays de Caux	La Morcille
Géographie	Loire-Atlantique	Haute-Normandie	Rhône et Beaujolais
Climat	Tempéré de type océanique ⁸	Tempéré de type océanique	Type semi-continentale avec une influence méditerranéenne ⁹
Pédologie	Sols bruns hydromorphes argilo limoneux	Sols limoneux en surface avec formation d'une croûte de battance sur sols cultivés. Horizons limoneux sableux en profondeur.	Sols sablo-argileux
Lithologie	Schiste/schiste altéré	Craie	Granite/arène granitique
Comportement hydrologique	La couche peu perméable de schiste à faible profondeur entraîne la formation d'une nappe perchée en hiver. Drainage par tuyaux enterrés.	La formation d'une couche de battance diminue très fortement la perméabilité du sol. Le ruissellement se forme indépendamment de la hauteur de la nappe, très profonde.	Nappe pérenne, entre 1 et 2 m en hiver. Orages violents en été.
Végétation de la bande enherbée de l'étude de référence	Ray-grass anglais de 7 ans	Ray-grass	Ray-grass, âge : 30 ans
Type de cultures	Fourrage pour élevage de bovins, céréales	Grandes cultures	Vignoble

- des événements climatiques typiques de la zone considérée,
- des coefficients de ruissellement sur les parcelles cultivées dans la zone considérée

On n'a pas cherché à représenter des événements exceptionnels, mais plutôt des événements de période de retour de l'ordre de l'année (pour la saison, hiver ou été considérée). Un événement remarquable du point de vue hydrologique ne le sera en effet pas forcément du point de vue du transfert des produits phytosanitaires : c'est surtout le délai [application des produits/événement ruisselant] qui conditionne les flux exportés par ruissellement. De plus, on cherche à estimer l'efficacité des dispositifs enherbés en conditions usuelles, pas exceptionnelles.

Pour les sites de La Jaillière et de La Morcille, on disposait de surcroît de chroniques de ruissellement en sortie de parcelle, permettant d'assurer le réalisme des événements ruisselants simulés. L'état d'humidité du sol de la bande enherbée et la profondeur de la nappe étaient fixés en cohérence avec l'événement ruisselant considéré (sol humide et nappe haute pour un événement hivernal, par exemple).

Les développements de profil des sols et les caractéristiques des horizons utilisées pour la modélisation sont issus de mesures de terrain. Notons qu'il est utile d'avoir des données de perméabilité acquises à l'échelle de la bande (par des simulations de ruissellement par exemple) plutôt qu'à une échelle ponctuelle, la variabilité spatiale de la conductivité hydraulique des horizons étant particulièrement prononcée pour les premiers horizons, très macroporeux, des sols de bande enherbée. Les tableaux 2 à 4 présentent les paramètres utilisés pour décrire les différents horizons des sols des bandes enherbées de La Morcille, de La Jaillière et du Pays de Caux respectivement. La signification des paramètres est explicitée dans l'encadré 1.

Horizon (cm)	θ_r	θ_s	α (cm ⁻¹)	n	Ks moyennes (mm/h)	Ks hautes (mm/h)
0-10	0,15	0,52	0,32	1,46	680	1 010
10-30	0,15	0,4	0,1	1,52	140	430
30-90	0,15	0,4	0,1	1,52	60	330
> 90	0,15	0,33	0,7	1,57	60	330

Sur La Morcille, Lacas (2005) a observé, tout comme Souiller *et al.* (2002) sur La Jaillière, que la perméabilité apparente de la bande enherbée augmente avec l'intensité du ruissellement entrant sur la bande, ce qui explique les deux gammes de perméabilités figurant dans le tableau 2 (correspondant respectivement à la moyenne et la valeur supérieure des conductivités à saturation mesurées par des tests de Muntz sur le terrain). Le tableau 5 récapitule les caractéristiques des événements ruisselants (intensité et durée du ruissellement entrant, conditions initiales) simulés dans ce contexte.

Sur le site de La Jaillière, l'horizon de schiste altéré est fréquemment présent dès 80 à 100 cm de profondeur, ce qui se traduit par des sols hydromorphes et souvent drainés. Cette configuration induisant souvent une efficacité limitée des bandes enherbées en hiver, comme nous le verrons plus loin, nous avons aussi simulé la situation, également présente sur le site, d'une profondeur plus importante pour le schiste altéré. On remarquera que, contrairement aux deux autres sites, l'événement estival est pour La Jaillière très modéré. Cela vient du mode de genèse du ruissellement sur les cultures : sur La Morcille et le Pays de Caux, il s'agit essentiellement de ruissellement hortonien (dépassement de la capacité d'infiltration du sol). Sur La Jaillière, il s'agit de ruissellement par remontée de nappe perchée : en été, cette nappe perchée disparaît

▲ Tableau 2 – Caractéristiques du sol de La Morcille.

Horizon (cm) avec schiste altéré épais	Horizon (cm) avec schiste altéré fin	θ_r	θ_s	α (cm ⁻¹)	n	Ks (mm/h)
0-10	0-10	0,069	0,4174	0,009	1,50	300
10-90	10-150	0,070	0,4151	0,012	1,45	100
90-190	150-190	0,07	0,36	0,005	1,09	0,72
> 190	> 190	0,07	0,4	0,005	1,09	3,6

◀ Tableau 3 – Caractéristiques du sol de La Jaillière.

10. Le potentiel de pression en un point, égal à la somme de la cote du point considéré et de la pression de l'eau en un point ($\psi = \varphi + z$) caractérise l'état d'humidité d'un sol ; l'eau se déplaçant dans le sens des potentiels les plus forts vers les moins forts. φ , la pression de l'eau dans le sol est ≥ 0 pour un sol saturé, < 0 pour un sol non saturé.

Encadré 1

Paramètres permettant de décrire le comportement hydrodynamique d'un sol

Le comportement hydrologique d'un sol dépend de la façon dont la teneur en eau, le potentiel de pression de l'eau dans le sol¹⁰, et la conductivité hydraulique du sol, c'est-à-dire la facilité avec laquelle l'eau peut s'écouler dans le sol, sont reliées. Pour les besoins de la modélisation, ces différentes variables sont reliées *via* des fonctions, qui permettent de décrire les caractéristiques hydrodynamiques de chaque horizon de sol, en s'appuyant sur des paramètres mesurés sur le terrain ou des échantillons de sol.

Ainsi, dans HYDRUS (encadré 2), la teneur en eau est reliée au potentiel de pression par la formule

$$\text{de Van Genuchten} : \Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right]^m .$$

– $\Theta = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)}$ est la saturation relative du sol, égale à 1 quand le sol est saturé et égale à 0

quand le sol est à la teneur en eau résiduelle ;

– θ_r est la teneur en eau résiduelle du sol, c'est-à-dire le pourcentage de volume du sol qui reste occupé par l'eau quand l'eau ne peut plus s'écouler ou être utilisée par les plantes. On la détermine par pesée avant et après passage à l'étuve, pour un échantillon soumis à une succion élevée (classiquement au point de flétrissement des plantes) ;

– θ_s est la teneur à saturation du sol, c'est-à-dire le pourcentage du volume de sol occupé par l'eau quand l'échantillon est totalement saturé ;

– $\alpha [L^{-1}]$ est un coefficient empirique représentant l'inverse de la frange capillaire, c'est-à-dire la hauteur de la zone quasi saturée au-dessus de la surface libre de la nappe pour un sol à l'équilibre hydrostatique. Pour une argile, la frange capillaire peut atteindre plusieurs mètres (α est donc très faible) ; pour un sable au contraire, cette frange ne dépasse pas quelques centimètres ;

– n et m ($m = 1 - 1/n$) sont des coefficients empiriques liés à la distribution des tailles de pores ;

– HYDRUS utilise les relations de Van Genuchten et Mualem pour représenter la variation de la conductivité hydraulique avec l'humidité du sol : $K(\theta) = K_s \sqrt{\Theta} \left[1 - (1 - \Theta^{1/m})^m \right]^2$;

– K_s est la conductivité hydraulique du sol à saturation. On la mesure classiquement en évaluant le débit d'infiltration dans un sol sous charge hydraulique constante (double anneau de Muntz par exemple).

Les trois paramètres α , n et m ne sont pas mesurés directement : ils peuvent être déterminés en ajustant au mieux les fonctions ci-dessus à des points expérimentaux, où l'on connaît les valeurs conjointes de $[K$ et $\psi]$ ou de $[\theta$ et $\psi]$. Les méthodes classiques sont l'infiltromètre multidisque (TRIMS, que l'on peut utiliser en place) ou la méthode WIND d'évaporation sur une colonne de sol au laboratoire (cf. par exemple : Lacas, 2005).

Si l'on dispose de la composition granulométrique du sol, on peut aussi déterminer ces paramètres en se reportant à des « catalogues » de sols – HYDRUS propose un tel catalogue, *via* sa fonction « ROSETTA ». Signalons toutefois que, par nature, la texture des sols est ainsi bien décrite (et donc la relation $[\theta - \psi]$, mais pas la structure, qui influe notamment sur la conductivité hydraulique à l'approche de la saturation. Il est donc préférable, dans tous les cas, de disposer d'une mesure de la conductivité hydraulique à saturation des horizons considérés, d'autant que dans les sols très macroporeux des bandes enherbées, la structure des horizons de surface joue un rôle prépondérant.

et le ruissellement sur les parcelles est donc très faible, même pour des événements pluvieux intenses (pour cette région, ils restent modérés par rapport à ceux qui peuvent advenir sur les deux autres sites).

Pour le site du Pays de Caux, nous avons simulé deux situations : une bande enherbée située sur le plateau, sans problème de perméabilité sous la couche pédologique, et une bande située en bordure de plateau, avec une rupture de perméabilité à 80 cm. Sur ce site, la nappe est profonde et n'intervient pas dans le fonctionnement de la bande.

Test de sensibilité

Les différentes valeurs de rugosité citées précédemment ont été testées pour les scénarios relatifs aux trois sites. Il est toutefois apparu que ce paramètre n'influence pas significativement les résultats, et nous ne reviendrons plus sur ce sujet : les résultats présentés correspondent à une rugosité moyenne, de $0,1 \text{ s.m}^{-1/3}$.

De même, les différentes valeurs de pente réalistes pour le site considéré ont été testées (2, 7 et 15 % pour La Morcille ; 2 % pour La Jaillièrre ; 2 et 7 % pour le Pays de Caux). Ce paramètre influence les résultats, puisqu'une pente plus forte (ou une rugosité plus faible) accroît la vitesse de ruissellement et laisse ainsi moins de temps au ruissellement pour s'infiltrer. *A contrario*, une pente plus forte accroît la vitesse des écoulements subsurfaciques et permet aux sols d'évacuer l'excès d'eau plus rapidement ; ce phénomène ne contrebalance toutefois pas totalement le premier, les écoulements subsurfaciques étant moins rapides que le ruissellement de surface. Si cette capacité de ressuyage accrue des sols ne joue que modérément pendant les épisodes de ruissellement, elle permet par contre aux sols de s'assécher plus rapidement : elle joue donc sur les conditions initiales d'humidité du sol, dont nous verrons qu'elles ont une influence majeure sur la capacité d'infiltration de la bande enherbée.

Au total toutefois, là encore, **à conditions d'humidité initiales équivalentes**, la pente ne change pas les ordres de grandeur des résultats et nous présenterons les résultats relatifs à une seule pente pour chaque site.

Afin d'évaluer l'influence de l'état d'humidité du sol sur l'efficacité de la bande, la succession d'événements ruisselants a été testée, en hiver et en été, sur les deux sites de La Morcille et du Pays

Horizon (cm)	θ_r	θ_s	α (cm ⁻¹)	n	Ks (mm/h)
0-15	0,0515	0,4182	0,0043	1,69	150
15-80	0,067	0,45	0,02	1,41	40
> 80 (limon beige)	0,078	0,43	0,036	1,56	5
> 80 (argile limono-sableuse)	0,078	0,43	0,036	1,56	1

de Caux. Sur La Jaillièrre, comme l'abattement en hiver est faible, il n'a pas semblé utile de faire une simulation équivalente.

▲ Tableau 4 – Caractéristiques du sol du Pays de Caux.

Les ruissellements entrants que nous simulons sont des créneaux (débits constants pendant un certain temps), ce qui ne correspond pas à la réalité. Pour évaluer l'influence de cette simplification, nous avons simulé quelques événements réels observés sur La Morcille et sur La Jaillièrre. Les pics de débit entrant conduisent à des pics de ruissellement en sortie, mais, à volume équivalent entre événement « créneau » et événement « avec pic », l'efficacité globale de la bande enherbée (volume ruisselant infiltré/volume ruisselant total) n'est pas significativement modifiée. Pour des raisons de simplicité, nous avons donc simulé essentiellement des événements « créneau ».

Nous avons également estimé l'influence de la prise en compte ou non de la pluie incidente sur la bande. C'est en fait le ratio [ruissellement entrant/pluie à la surface de la bande] qui importe. Le ruissellement est d'autant plus important par rapport à la pluie que la surface enherbée reçoit le ruissellement d'une surface cultivée importante ou dotée d'un coefficient de ruissellement important. Dans nos scénarios, la représentation de la pluie directement interceptée par la bande enherbée est conservée si son volume est significatif par rapport à celui du ruissellement entrant.

Le système modélisé (figure 3) est un profil de sol de 30 m de long et 2 m de profondeur à l'aval (la profondeur à l'amont varie en fonction de la pente du terrain). La bande enherbée a une largeur de 20 m, située entre les abscisses 5 et 25 m (l'abscisse 0 désignant l'amont du morceau de versant que l'on modélise) ; des points de contrôle où l'on peut suivre les différentes variables relatives aux écoulements sont implantés à 1, 5 et 10 m. Ils permettent, sans multiplier les simulations, de calculer ce que serait le ruissellement si la bande

11. C'est-à-dire pouvant se dégrader ou interagir avec les composants du sol.

Encadré 2

Présentation du modèle HYDRUS-2D

Le modèle HYDRUS 2D simule la propagation de flux (eaux et solutés réactifs⁽¹⁾) en deux dimensions dans des sols variablement saturés, en résolvant l'équation mixte de Richards par une solution aux éléments finis :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (K(\theta) \left(1 + \frac{\partial \psi}{\partial z}\right))$$

– θ : teneur effective en eau dans le sol [$L^3.L^{-3}$] qui est égale au volume d'eau dans le sol divisé par le volume total du sol ;

– t : temps ;

– z : cote ;

– K : conductivité hydraulique non saturée [$L.T^{-1}$]. Elle varie avec la teneur en eau du sol ;

– ψ : potentiel de pression [L].

Pour une présentation détaillée d'HYDRUS, on pourra se reporter à Simunek *et al.* (1999) ou Lacas (2005).

L'originalité de la version utilisée ici est qu'elle permet le couplage d'HYDRUS à proprement parler avec une équation d'onde cinématique (simplification de l'équation de Saint-Venant où l'on néglige les termes d'inertie) appelée aussi équation de Manning-Strickler, permettant ainsi la simulation conjointe du ruissellement et des écoulements dans le sol de la bande enherbée :

$$Q = \frac{\sqrt{S}}{n} . h^{\frac{5}{3}}, \text{ où :}$$

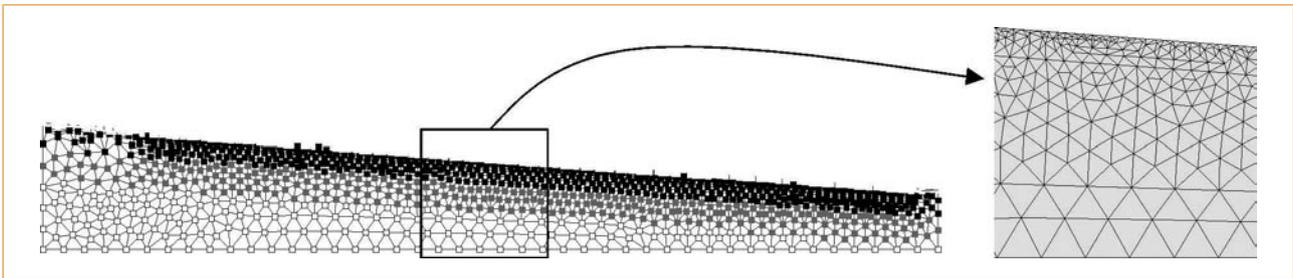
– Q : le débit [$L^3.T^{-1}$] ;

– S : la pente en % ;

– n : coefficient de rugosité de surface de Manning [$T.L^{-1/3}$] ;

– h : hauteur de la lame d'eau [L].

▼ Figure 3 – Profil de sol et distribution des horizons de sol. Pente de 7 %. Détail du maillage.



avait cette largeur. Les conditions aux limites sont une limite à flux nul sous le système, une condition de charge à l'aval et à l'amont (permettant de représenter une nappe, le cas échéant). Une condition de suintement au-dessus de la condition de charge aval permet de représenter les écoulements saturés induits par l'eau infiltrée

au sein de la bande. La condition à la limite à la surface est de type « conditions atmosphériques » de 0 à 5 et 25 à 30 m, et de type « ruissellement » sur le reste. Une simulation préalable de deux heures de pluie suivies de 48 h d'évaporation permet de partir de conditions initiales ayant un sens physique.

Résultats et discussion

Un moyen commode pour visualiser le comportement d'une bande enherbée est la courbe de double cumul, représentant, pour chaque largeur de bande, le ruissellement sortant cumulé en fonction du ruissellement entrant cumulé. La figure 4 illustre ainsi les résultats obtenus sur La Morcille, pour des bandes de 5 et 10 m, de pente 15 % et de rugosité $0,2 \text{ m.s}^{-1/3}$, en hiver (débit entrant de 300 L/h/m de bande, nappe à 70 cm de profondeur) et en été (débit entrant de $1\,600 \text{ L/h/m}$ de bande pendant 1 h , nappe à 150 cm). Pour une largeur de bande donnée, l'efficacité de la bande peut être résumée par le volume entré sur la bande avant déclenchement du ruissellement à l'aval, que nous appellerons **Volume tampon** (figure 4), et la **pente α** de la courbe après déclenchement du ruissellement. Si $\alpha = 1$, l'infiltration est nulle ; si $\alpha < 1$, elle reste effective.

Elle permet de constater que les mécanismes de genèse ne sont pas ici les mêmes en été et en hiver :

– en été, par exemple pour une bande de 10 m , le ruissellement s'amorce quand quasiment 950 litres sont déjà arrivés sur la bande. Toutefois, la bande continue à infiltrer de l'eau, puisque la pente de la courbe correspondante est bien inférieure à 1 ;

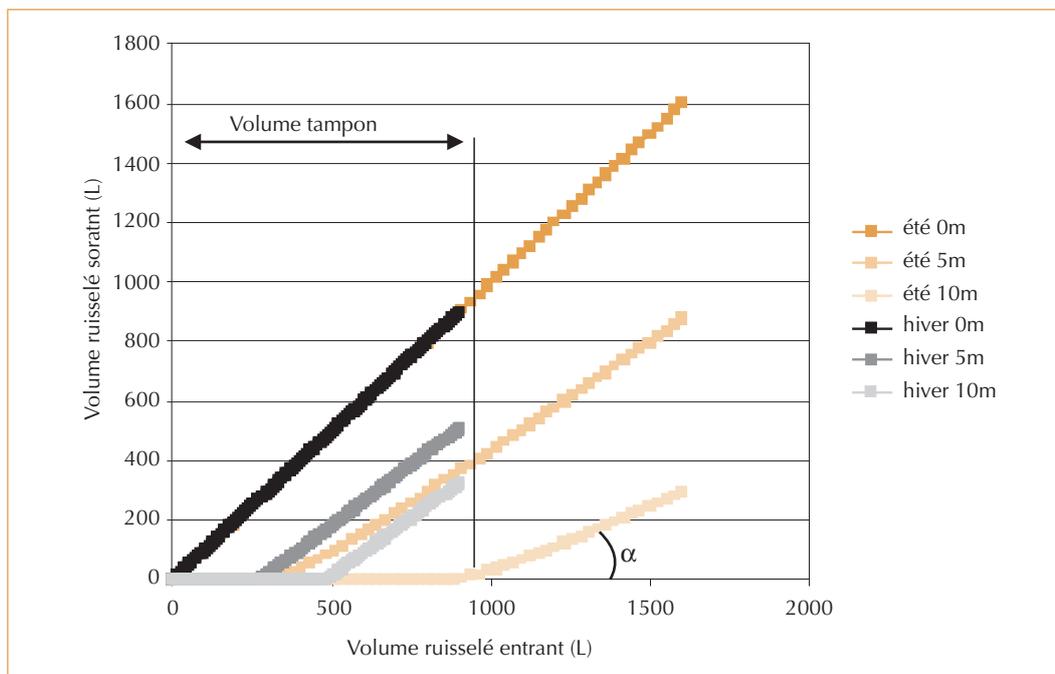
– en hiver, au contraire, le ruissellement commence dès que 500 litres sont entrés sur la bande (bien que ce soit à un débit bien moindre) et l'infiltration est ensuite quasi nulle, puisque la pente de la courbe correspondante est égale à 1 : quand un litre d'eau supplémentaire arrive sur la bande, il est transmis intégralement par ruissellement à l'aval.

Dans le premier cas, il s'agit de ruissellement hortonien (dépassement de la capacité d'infiltration de la surface ou d'un horizon pédologique proche), alors que dans l'autre, il y a remontée d'une nappe jusqu'à la surface et l'infiltration n'est plus possible : l'efficacité de la bande enherbée est ensuite nulle.

Il n'est pas possible ici de présenter l'ensemble des résultats, et nous exposons ceux qui nous paraissent les plus importants. Pour une présentation plus détaillée des résultats, on pourra se reporter à Giannone (2008). Les résultats relatifs à quelques scénarios « types » sont résumés dans le tableau 5.

Les résultats sont assez contrastés suivant les sites concernés.

Sur La Morcille, les bandes enherbées abattent efficacement le ruissellement. Par exemple **78 %** d'un ruissellement à débit intense est arrêté par



◀ Figure 4 – Volume d'eau sortant de différentes largeurs de bandes en fonction de la saison. La Morcille, pente de 15 %, rugosité de 0,2. $Q \text{ été} = 1\,600 \text{ L/h}$ pendant 1 h avec une nappe à 150 cm de profondeur. $Q \text{ hiver} = 300 \text{ L/h}$ pendant 3 h avec une nappe à 70 cm de profondeur.

▼ Tableau 5 – Abattements du ruissellement calculés par le modèle pour une bande de 10 m en fonction de la région. Le terme « succession » désigne le scénario représentant le deuxième événement de ruissellement 24 h après un premier similaire. « Ks horizon profond » est la perméabilité de l'horizon profond pour le Pays de Caux. Le débit de ruissellement entrant est suivi de parenthèses informant sur la durée du ruissellement.

Sol	Pente (%)	Saison	Profondeur de nappe (cm)	Ks horizon profond (mm/h)	Débit de ruissellement (L/h)	Volume total retenu (L)	Abattement (%)
La Morcille							
Sableux	7	Été	150		1 600 (1 h)	1 244	78
		Succession été	150		1 600 (1 h)	1 024	64
		Hiver	70		300 (3 h)	636	69
		Succession hiver	70		300 (3 h)	361	40
La Jaillière							
Argilo-limoneux	2	Été	190		144 (2 h)	288	100
		Hiver	60		288 (20 h)	242	4
		Hiver	120		288 (20 h)	1 037	18
		Hiver	120		1 440 (2 h)	607	21
		Hiver	120		120 (18 h)	939	44
Pays de Caux							
Limoneux	2	Été/Hiver	Absence de nappe	5	180 (10 h)	1 800	100
		Hiver	/	5	720 (10)	2 556	36
		Hiver	/	1	720 (10)	1 852	26
		Succession hiver	/	5	720 (10)	1 401	19
		Été	/	1 et 5	1 800 (3 h)	2 131	40
		Succession été	/	5	1 800 (3 h)	1 018	19

une bande de 10 m, en été. L'abattement est toujours supérieur à 50 % pour une bande de 10 m et un événement ruisselant « simple ». L'efficacité dépend de la saison, caractérisée par la profondeur de nappe et, plus globalement, par l'état d'humidité initial du sol. Ce dernier détermine le processus de déclenchement du ruissellement en sortie de bande et cela semble plus déterminant que le volume de ruissellement entrant dans la bande puisque la rétention est plus importante en été qu'en hiver alors que le volume entrant est presque deux fois plus grand en été. Le test de succession de deux événements de ruissellement illustre également ce point. L'efficacité de la bande augmente par ailleurs évidemment avec sa largeur.

Sur La Jaillière, les bandes enherbées sont très efficaces pour retenir le ruissellement en été, lors-

que la nappe n'intervient pas et que le débit de ruissellement entrant dans la bande est modéré. L'efficacité réduit grandement en hiver lorsque ces sols peu perméables sont rapidement engorgés par la remontée de la nappe perchée. La largeur de bande a alors un rôle très limité, ainsi que le débit de ruissellement entrant : il semble que ce soit ici le volume entrant qui importe. Même si les bandes enherbées sont placées plus en amont du versant, où la nappe est plus éloignée de la surface du sol, la porosité disponible n'est pas suffisante pour permettre une infiltration satisfaisante. À titre de comparaison, sur les profils de sol que nous utilisons pour la modélisation, le volume de sol disponible pour l'eau est de 22 litres par m² pour La Jaillière avec une nappe à 60 cm de profondeur et de 90 litres par m² pour La Morcille, avec une nappe à 70 cm de profondeur.

Dans le **Pays de Caux**, l'efficacité de rétention du ruissellement par les bandes enherbées dépend du débit entrant. Une largeur de bande de 10 m est optimale pour arrêter un débit modéré de 180 L/h pendant 10 h mais une bande de 20 m laisse ruisseler 30 % de l'eau entrant dans la bande avec un débit de 720 L/h pendant 10 h. La teneur en eau initiale joue un rôle important sur ce terrain, comme le montrent les tests de variation des perméabilités profondes ou de successions de deux événements de ruissellement qui entraînent une perte d'efficacité de plus de 30 % pour une bande de 20 m, en changeant le profil d'humidité initial du sol.

Vers une loi de généralisation des résultats

Il nous a semblé intéressant, dans l'optique d'une application opérationnelle de ces résultats, de tenter de dégager les principaux facteurs d'influence, qui permettraient de donner un ordre de grandeur de l'efficacité d'une bande dans une situation donnée sans avoir à passer par une simulation complète.

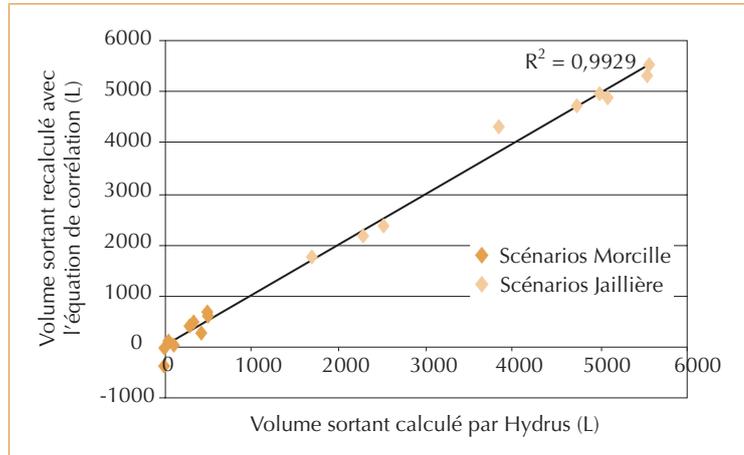
Une régression multiple sur les différents facteurs identifiés comme importants conduit, pour les scénarios où le déclenchement advient par remontée de nappe (La Jaillière en été et en hiver, La Morcille en hiver, soit 16 scénarios) à l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \text{Volume sortant (L)} = & \\ & [0,8867 \times \text{Volume entrant (L)}] + \\ & [- 42,4167 \times \text{Largeur de bande (m)}] + \\ & [- 14,2481 \times \text{Volume de sol disponible} \\ & \text{(L/m de bande)}] + 951,6585 \end{aligned}$$

où le volume de sol disponible correspond à la porosité libre dans le profil de sol (pour 1 m² de bande) au début de l'événement ruisselant.

Le coefficient de corrélation est de 0,99 (figure 5). Ce résultat très satisfaisant montre que la démarche est pertinente. Il est logique puisque nous avons vu que, dans ce cas, le volume de sol disponible pour l'infiltration est effectivement le facteur prépondérant, devant la perméabilité du profil ou les débits entrants.

Pour les scénarios où le ruissellement advient par dépassement de la capacité d'infiltration du sol en surface ou proche subsurface, la régression a été faite en deux temps, sur les scénarios ayant



conduit à du ruissellement à l'aval (La Morcille été, Pays de Caux hiver et été, soit 29 scénarios) :

– d'abord le **volume tampon**, que l'on relie à la perméabilité du premier horizon, la largeur de bande, le volume de sol disponible pour l'infiltration et le débit entrant. Cette corrélation conduit à :

$$\begin{aligned} \text{Volume tampon (L)} = & [136,3671 \times \\ & \text{Largeur de bande (m)}] + [0,7343 \times \text{Ks premier} \\ & \text{horizon (mm/h)}] + [- 0,4669 \times \text{Débit entrant} \\ & \text{(L/h)}] + [0,0457 \times \text{Volume disponible de sol} \\ & \text{(pour une bande de 20 m ; en L)} - 366,3564 \end{aligned}$$

avec un coefficient de corrélation de 0,84, ce qui reste très satisfaisant ;

– puis la **pente α** de la courbe de double cumul, que l'on relie à la perméabilité des premier et second horizons, au débit entrant et à la largeur de bande. L'équation obtenue est :

$$\begin{aligned} \text{Pente } \alpha = & [- 0,0270 \times \text{Largeur de bande (m)}] + \\ & [0,0005 \times \text{Ks premier horizon (mm/h)}] + \\ & [- 0,0068 \times \text{Ks deuxième horizon (mm/h)}] + \\ & [0,0003 \times \text{Débit entrant (L/h)}] + 0,8118 \end{aligned}$$

avec un coefficient de corrélation de 0,59 nettement plus faible que les autres. Ceci s'explique en partie par la complexité des processus en jeu qui interagissent fortement : les processus dominants (saturation de la surface, du deuxième horizon, écoulements subsurface latéraux, percolation profonde, ruissellement) pouvant varier en fonc-

▲ Figure 5 – Coefficient de détermination du volume sortant pour les scénarios ruissellement par remontée de la nappe.

tion des scénarios, voire au fil du temps pour le même scénario. Il semble donc qu'il faille dans ce cas s'appuyer sur une modélisation relativement complexe, capable de décrire les interactions entre les processus. La corrélation établie pour la pente α peut toutefois s'avérer utile pour donner des ordres de grandeur.

Les corrélations établies ici resteraient à valider dans d'autres situations. On peut déjà toutefois considérer dans un premier temps qu'elles ont été établies sur des résultats issus de scénarios assez contrastés pour qu'elles soient valides.

Conclusion sur la régionalisation

On constate que l'élaboration de règles de dimensionnement régionales à partir de simulations de scénarios régionaux très contrastés s'avère plus difficile que prévu. Ainsi, même si de grandes règles se dégagent (bandes enherbées très efficaces dans le Beaujolais, où une largeur de 10 m semble en général satisfaisante, peu efficaces en saison humide à La Jaillière et à l'efficacité très variable en fonction de l'intensité du ruissellement entrant en Pays de Caux), la variabilité intra-régionale reste forte, notamment en fonction des conditions d'humidité du sol, et on ne peut réduire l'efficacité des dispositifs enherbés à quelques facteurs régionaux. Dans ces conditions, il semblerait risqué de fournir des dimensions type par région, car il apparaît nécessaire de raisonner le dimensionnement des dispositifs enherbés au cas par cas, en tenant compte des facteurs d'influence mis en évidence dans les corrélations établies ci-dessus.

On peut en revanche, en s'appuyant à la fois sur le travail effectué ici pour la mise au point des scénarios et sur les résultats obtenus lors des simulations, envisager la mise au point d'une méthode de dimensionnement des dispositifs enherbés, qui serait intégrée soit dans un guide pratique, soit dans un logiciel aidant au dimensionnement. Il faudrait pour aller dans ce sens :

- d'une part, caractériser les ruissellements entrant, sur la base, par exemple, de la taille des parcelles amont, des coefficients de ruissellement et des caractéristiques statistiques des pluies dans la région, à moins qu'on ne dispose déjà de connaissances sur les débits de ruissellement type dans la zone considérée ;
- d'autre part, caractériser le sol du dispositif enherbé, avec idéalement des mesures de conductivité à saturation des horizons de surface

(les horizons sous-jacents étant les mêmes que ceux des parcelles cultivées), et l'état d'humidité du sol et/ou la profondeur de la nappe quand elle est susceptible de fluctuer dans l'horizon pédologique.

Cet exercice sera mené pour les saisons où les exportations de phytosanitaires sont majoritaires, ce qui relève de l'expertise locale.

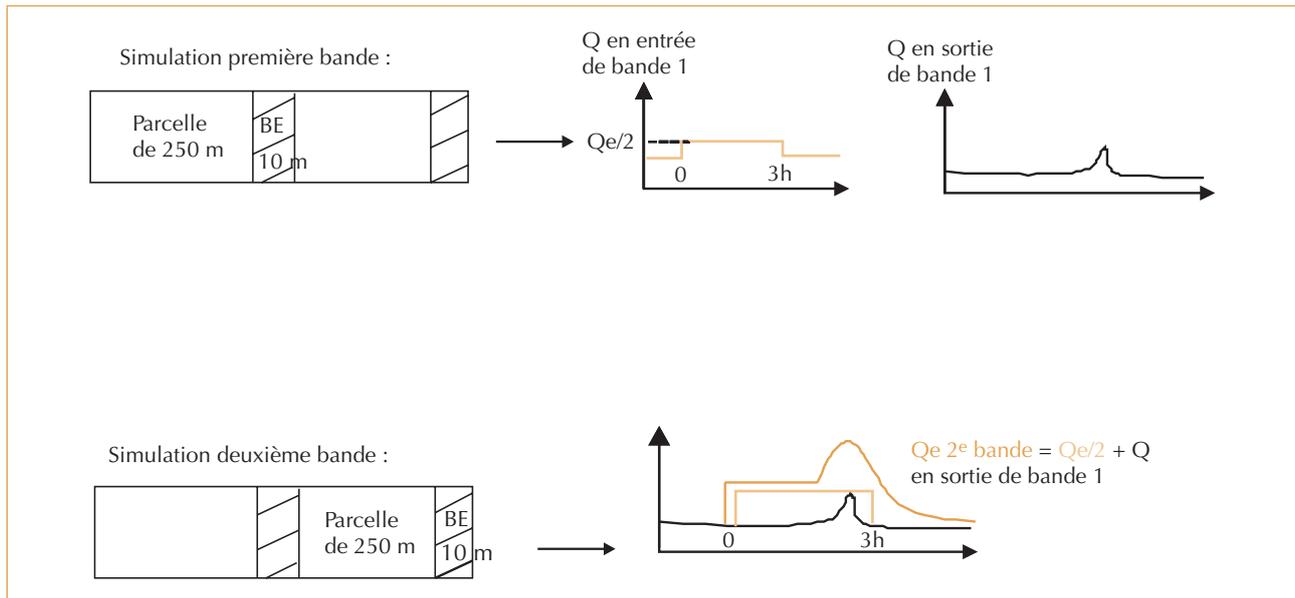
Ces données disponibles, on pourra alors utiliser les corrélations présentées au paragraphe précédent, ou utiliser un modèle simulant plus complètement le fonctionnement d'une bande enherbée vis-à-vis des phytosanitaires (un tel modèle est en cours de développement au Cemagref et devrait être disponible fin 2010). Toutefois, l'application de ces corrélations n'est pas immédiate, les paramètres qu'elles utilisent (comme le volume de sol disponible) n'étant pas directement accessibles sur le terrain. Une clé de passage entre les paramètres estimés sur le terrain ou à partir de bases de données régionales (par exemple : unité cartographique de sol, réserve utile, profondeur de la nappe) et ces paramètres reste à trouver et à régionaliser quand c'est possible. La mise au point d'un tel guide est prévue également pour la fin de l'année 2010, dans le cadre d'une convention avec la DGPAAT¹² du ministère en charge de l'agriculture.

Cas complémentaires

Les situations étudiées ci-avant concernaient une bande enherbée unique, située sur un versant. D'autres cas, intéressants au niveau opérationnel et qui n'étaient pas directement pris en compte par les scénarios précédents ont été simulés pour compléter le type de situations investiguées.

1. En cas de versant long ou convergent, le CORPEN recommande **la succession de zones tampons**, plutôt qu'une seule bande en bas de versant. Nous avons simulé, dans le cas du Pays de Caux, qui est effectivement celui qui montre les versants les plus longs, deux bandes de 10 m situées respectivement à mi-pente et en bas de versant sur un versant de 500 m de long, ou une seule bande de 20 m située en aval de ce même versant. Le débit d'entrée était $Q_e = 1\ 800$ L/h pendant 3 h sur la bande de 20 m. Pour la succession de bandes, on a simulé un débit $Q_e/2$ de 900 L/h sur chaque bande augmenté, pour la bande aval, du ruissellement sortant de la bande amont (figure 6).

12. Direction générale des politiques agricoles, alimentaires et des territoires.



Dans ce cas, les résultats ne montrent pas une efficacité très supérieure des deux bandes de 10 m placées en aval de parcelles successives (1 366 litres ruissellent à l'aval des deux bandes contre 1 431 litres pour la bande unique de 20 m). Quoiqu'il en soit, cette disposition permet de limiter la formation d'écoulements concentrés, qui diminuent drastiquement l'efficacité des dispositifs enherbés. De surcroît, l'utilisation d'hydrogrammes éloignés de la réalité et la non-prise en compte du temps de latence entre ce qui sort de la première bande et le temps qu'il lui faut pour atteindre la deuxième nécessitent la construction d'un scénario plus affiné pour trancher de façon plus définitive.

2. Les dispositifs enherbés sont fréquemment aménagés **en bordure de rivière** (photo 1), ce qui n'était pas directement pris en compte par le système modélisé. Cette implantation peut en effet induire des écoulements subsurface plus ou moins rapides, atteignant directement le cours d'eau. Nous avons donc mené des simulations complémentaires pour déterminer l'importance des écoulements subsurface dans cette situation, et vérifier que les résultats acquis dans les scénarios précédents pour des bandes de 5 m étaient valides. Nous nous sommes pour cela placés dans un cas maximisant *a priori* l'influence de la rivière car les écoulements subsurface y sont forts : le sol de La Morcille, pour une

pente de 15 %. Les résultats montrent qu'en hiver, quand la nappe est haute, l'infiltration est accrue dans le cas d'une bande de 5 m située en bordure de rivière, par rapport à une bande enherbée de 5 m située plus haut sur le versant. En raison d'un flux exporté par la surface de suintement augmenté en condition de nappe haute, l'eau infiltrée rejoint donc plus facilement la rivière *via* la subsurface. Du point de vue des phytosanitaires, on peut toutefois supposer que cette situation est plus satisfaisante que si on avait un ruissellement « strict », les pesticides ayant en partie la possibilité d'être adsorbés et/ou dégradés lors de leur passage dans le sol. On note toutefois que le temps de séjour n'y est pas très élevé (quelques heures). Ces simulations ne remettent pas en cause les résultats obtenus sur les bandes enherbées modélisées plus haut, les ordres de grandeur restant largement les mêmes.

Prise en compte de la variabilité des concentrations dans le ruissellement

Les simulations présentées concernent l'abattement des flux d'eau, sans tenir compte des concentrations en pesticides dans le ruissellement. Or ces concentrations varient au cours d'un épisode de ruissellement, et l'abattement des flux de pesticides transférés par ruissellement n'est donc pas strictement proportionnel à l'abattement des seuls flux d'eau.

▲ Figure 6 – Schéma de principe du calcul du ruissellement entrant sur chaque bande, dans le cas d'une succession de bandes sur un versant.



▲ Photo 1 – Bande enherbée au bord d'un cours d'eau (photo : J.-J. Gril).

Louchart (1999) a étudié la forme des chémo-graphes dans le ruissellement issu de parcelles de vigne et a identifié trois situations types, dépendant de la genèse des écoulements et des caractéristiques des molécules étudiées :

- 1) les concentrations augmentent de façon synchrone aux débits ;
- 2) le pic de concentration est en avance sur le pic de débit ;
- 3) le pic de concentration est en retard sur le pic de débit.

Il a montré que le premier cas est le plus fréquent, et qu'il correspond de surcroît aux épisodes où les flux exportés sont les plus importants. Dans ce cas, on peut considérer, en première approximation, que l'abattement par un dispositif enherbé des flux de pesticides exportés sera du même ordre de grandeur (en pourcentage) que l'abattement des flux d'eau ruisselés. Les données de chroniques de concentration en sortie de parcelle sont assez rares ; les résultats acquis sur Rouffach (site situé dans le vignoble alsacien ; Domange, 2004) et La Morcille (Lacas, 2005) conduisent aux mêmes conclusions. Il s'agit toutefois également de contextes de ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration du sol, lors d'épisodes pluvieux intenses. Il serait souhaitable de disposer de résultats analogues dans un contexte où le ruissellement se fait sur surface saturée avec des intensités pluvieuses moindres.

Conclusion

L'originalité du travail présenté ici est de tenir compte du contexte agro-pédo-climatique dans

lequel se situera un dispositif enherbé pour donner des indications quantitatives de son dimensionnement optimal pour limiter au mieux les flux transférés par ruissellement. L'approche adoptée, qui s'appuie sur trois sites représentatifs de contextes agro-pédo-climatiques contrastés, montre que de grandes lignes se dégagent selon la région considérée. Elle met aussi en évidence qu'il faut malgré tout raisonner le dimensionnement d'un tel dispositif au cas par cas, en tenant compte des caractéristiques propres du site sur lequel il sera implanté, notamment la pédologie et la profondeur de la nappe. Le type de genèse du ruissellement au sein du dispositif enherbé (saturation du sol depuis un horizon profond ou dépassement de la capacité d'infiltration des premiers horizons) apparaît déterminant pour l'efficacité du dispositif, notamment dans le cas d'événements de ruissellement successifs.

Ainsi, pour les scénarios La Morcille et Pays de Caux, où le ruissellement au sein des bandes enherbées est essentiellement généré par dépassement de la capacité d'infiltration de la surface ou de la proche subsurface, l'efficacité des bandes est significative, bien qu'elle dépende assez fortement pour le Pays de Caux de l'intensité du ruissellement entrant, ce qui plaide pour des dispositifs situés le plus en amont possible, avec une densité assez forte. Pour le scénario La Jaillière, où le ruissellement est surtout déclenché par remontée de la nappe, l'efficacité est très limitée en hiver. Ces conclusions restent à moduler en fonction des pratiques agricoles dominantes par région, et notamment de la ou des saisons où les exportations de produits sont majoritaires. Elles montrent toutefois d'ores et déjà que le positionnement des dispositifs enherbés en bordure de rivière n'est pas toujours optimal du point de vue de l'interception du ruissellement. Néanmoins, les zones tampons rivulaires restent les seules aptes à limiter la dérive de pulvérisation et sont généralement mieux acceptées que les zones tampons de versant. En conséquence, si les zones tampons rivulaires paraissent essentielles, elles ne seront pas toujours suffisantes et devraient alors être complétées par d'autres zones tampons implantées sur le versant.

Dans certains cas, où la capacité d'infiltration des sols est très limitée (typiquement dans le cas de zones abondamment drainées), il peut s'avérer plus efficace de mettre en place des zones tampons humides réceptrices, dont le dimensionnement reste à préciser.

Les simulations mathématiques réalisées ont permis de mettre en évidence les critères permettant de quantifier l'efficacité d'une bande enherbée et de proposer des corrélations linéaires simples entre l'efficacité d'un dispositif enherbé pour un débit d'entrée donné et quelques caractéristiques clés du dispositif enherbé, donnant ainsi des éléments de dimensionnement. Il reste à déterminer une « clé de passage » pour relier ces critères, directement liés aux paramètres d'entrée du modèle hydrologique HYDRUS, à des paramètres plus facilement accessibles sur le terrain. En parallèle, un modèle « bande enherbée » est en cours de développement au Cemagref : ce

modèle, à partir des caractéristiques de la bande enherbée et de l'événement ruisselant entrant (débit, durée et concentrations en pesticides), fournira en sortie les flux ruisselés à l'aval de la bande et percolés sous la couche pédologique de la bande.

Il restera, pour que ce travail trouve son application opérationnelle, à formaliser la méthode (dans un guide pratique et/ou un logiciel) permettant à la fois de définir des ruissellements d'entrée type et les caractéristiques intrinsèques de la bande, en faisant la part des choses entre ce qui peut être régionalisé (ou proposé par défaut) et ce qui relève de l'expertise locale. □

Remerciements

Les auteurs remercient la Direction générale des politiques agricoles, de l'alimentation et des territoires du ministère en charge de l'agriculture, qui a financé cette étude. Ils remercient également Jirka Simunek pour avoir mis à leur disposition une version du logiciel HYDRUS permettant la représentation du ruissellement. Jean François Ouvry, de l'AREAS¹³ est remercié pour la synthèse qu'il a fournie sur le comportement des sols du Pays de Caux, ainsi qu'Arvalis-Institut du végétal pour l'accès aux données des parcelles expérimentales de La Jaillière. Enfin, les auteurs remercient Claire Lauvernet pour la programmation qu'elle a effectuée de routines facilitant l'exploitation des résultats des simulations.

¹³. Association régionale pour l'étude et l'amélioration des sols.

Résumé

Dans le contexte de l'implantation de zones tampons pour limiter les flux de phytosanitaires transférés entre les parcelles agricoles et le milieu aquatique, cet article présente les résultats de simulations de l'efficacité d'une bande enherbée à limiter le ruissellement *via* HYDRUS 2D, un logiciel représentant les écoulements variablement saturés dans le sol. L'originalité du travail est de considérer une grande variété de caractéristiques de bandes enherbées, dans différents contextes agro-pédo-climatiques : La Morcille dans le Beaujolais viticole, aux sols très perméables, le Pays de Caux, aux sols très battants, et La Jaillièrre en Loire-Atlantique, aux sols fréquemment engorgés. Les résultats permettent de dégager de grandes tendances par type de milieu, tout en soulignant la nécessité de raisonner le dimensionnement de ces dispositifs au cas par cas. Quelques facteurs clés sont identifiés, qui permettent, sans passer par une simulation complète, de donner un ordre de grandeur de l'efficacité d'une bande enherbée à dissiper le ruissellement à partir de ses caractéristiques propres et de celles du ruissellement entrant.

Abstract

Vegetated strips can be useful in order to limit pesticides fluxes transferred from agricultural fields towards surface waters. However, these structures must be judiciously positioned and well proportioned to be really efficient. In this article, we assess the efficiency of vegetative strips to limit surface runoff in contrasted situations, representative of different parts of France. The modelling tool is HYDRUS 2D, which represents variably saturated flow in soil. Three agro-pedo-climatic situations were investigated : 1 - La Morcille, in a vineyard area near Lyon, with very permeable soils and intensive runoff events, 2 - Le Pays de Caux, where soils are very sensible to hortonian surface runoff, and 3 - La Jaillièrre, near Brittany, where soils are often hydromorphic. Results show different trends for each ensemble of scenario, representative of a given agricultural area. They also get prominence to the fact that it remains necessary to design each vegetative strip individually, taking into account the very local context. The more influent variable were identified ; this allows to give an order of magnitude of the efficiency of a vegetative strip to limit surface runoff, without a complete simulation, given its own characteristics and those of incoming runoff.

Bibliographie

- ADAMIADÉ, C.-V., 2004, *Influence d'un fossé sur les écoulements rapides au sein d'un versant. Application au transfert des produits phytosanitaires*, université Pierre et Marie Curie, 239 p.
- BOIVIN, A., MARGOUM, C., GUILLEMAIN, C., BALL, N., CARLUER, N., GRIL, J.-J., GOUY, V., 2007, Water and pesticide transport dynamic in a grass buffer strip, in : *WAPo : International Conference on Water Pollution in natural Porous media at different scales*, Assessment of fate, impact and indicators, Barcelone.
- CORPEN, 2007, *Les fonctions environnementales des zones tampons. Les bases scientifiques et techniques des fonctions de production des eaux*, 176 p.
- DOMANGE, N., 2004, *Étude des transferts de produits phytosanitaires à l'échelle de la parcelle et du bassin versant agricole (Rouffach, Haut Rhin)*, université Louis Pasteur, Strasbourg I, 328 p.
- GIANNONE, G., 2008, *Contribution à la construction d'un outil de dimensionnement et de positionnement de zones tampons enherbées. Tests de scénarios*, master Géoscience, environnement et risques, spécialité Ingénierie environnementale, université Louis Pasteur, Strasbourg I.
- LACAS, J.-G., 2005, *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*, université Montpellier II, Sciences et techniques du Languedoc, 239 p. + annexes.
- LACAS, J.-G., VOLTZ, M., GOUY, V., CARLUER, N., GRIL, J.-J., 2005, Using grassed strips to limit pesticide transfer to surface water : a review, *Agronomy for sustainable development*, n° 25, p. 253-266.
- LACAS, J.-G., CARLUER, N., VOLTZ, M., 2006, Étude expérimentale de l'efficacité globale (surface et subsurface) d'un dispositif enherbé pour limiter la contamination des eaux par les phytosanitaires, in : *XXXVI^e congrès du Groupe français des pesticides*, Strasbourg.
- LECOMTE, V., 1999, *Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant*, Sciences de l'eau Thesis, ENGREF, 210 p.
- LOUCHART, X., 1999, *Transfert de pesticides dans les eaux de surface aux échelles de la parcelle et d'un bassin versant viticole. Étude expérimentale et éléments de modélisation*, ENSAM, École doctorale de biologie intégrative, 215 p.
- MADRIGAL-MONARREZ, I., 2004, *Rétention de pesticides dans les sols des dispositifs tampon, enherbés et boisés. Rôle des matières organiques*, Institut agronomique Paris-Grignon, 212 p.
- MAP, 2008, Plan Ecophyto 2018 de réduction des usages de pesticides 2008-2018, ministère de l'Agriculture et de la Pêche.
- PATTY, L., 1997, *Limitation du transfert par ruissellement vers les eaux superficielles de deux herbicides (isoproturon et diflufenicanil). Méthodologie analytique*, Cemagref et université de Grenoble I, 215 p.
- SIMUNEK, J., SEJNA, M., VAN GENUCHTEN, M.-T., 1999, The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, in : *International Groundwater Modeling Center*, Riverside, California.
- SOUILLER, C., COQUET, Y., POT, V., BENOIT, P., REAL, 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. Première partie : Dissipation des produits phytosanitaires à travers un dispositif enherbé ; mise en évidence des processus mis en jeu par simulation de ruissellement et infiltrométrie, *Étude et Gestion des sols*, 9(4), p. 269-285.