GROUPEMENT SOLENVIE / INSELBERG

Étude hydrologique et propositions d'actions limitant le phénomène d'érosion dans le cadre de l'étude érosion du bassin versant de la Gandelée

Pré-rapport sur les préconisations de lutte contre l'érosion et l'envasement

Cédric LAVEUF / Alexandre POIRAUD

16/01/2019

SOMMAIRE

1. Préconisations générales au bassin versant 3

1.1. La couverture permanente du sol 3

1.1.1. Le non-labour 4
1.1.2. Le paillage et le non-déchaumage 5
1.1.3. Les cultures intermédiaires 6
1.1.4. Le semi intercalaire 8

1.2. Travail du sol 8

1.2.1. Le sens de travail du sol 8
1.2.2. Les travaux pendant et après récolte 10
1.2.3. Les lits de semence 11
1.2.4. Le binage 12
1.2.5. Compacter les talwegs 13

1.3. Les amendements 13

1.4. Aménagements parcellaires et paysagers 14

1.4.1. Taille, forme et orientation des îlots 14
1.4.2. Rotations culturales et concertation d'assolement 15
1.4.3. Cultures en rang et prairies temporaires 17
1.4.4. Bandes enherbées, haies, ripisylves et reboisement 18
1.4.5. Les chemins et les routes 20
1.4.6. Les fossés 21
1.4.7. Drainage 22
1.4.8. Zones d'expansion et sédimentation du cours d'eau 23

2. Exemples de préconisations spécifiques à différents secteurs modélisés comme les plus érosifs 25

2.1. Exemple d'un secteur à reparcelliser et rebocager avec une haie 32

2.2. Exemple d'un secteur de coteau avec haies restaurées 34

2.3. Exemple de changement de sens de travail et d'un fort apport de MO 36

2.4. Exemple de réaménagement horizontal d'occupation d'un versant 37

3. Conclusions partielles 38

4. Bibliographie 40

Référence :

LAVEUF Cédric et POIRAUD Alexandre (2019). *Étude hydrologique et propositions d'actions limitant le phénomène d'érosion dans le cadre de l'étude érosion du bassin versant de la Gandelée : Pré-rapport sur les préconisations de lutte contre l'érosion et l'envasement*. Rapport d'étude SOLENVIE/INSELBERG, Syndicat Mixte du Bassin de L'Orne Saosnoise, 43 pages.

1. PRECONISATIONS GENERALES AU BASSIN VERSANT

Rappelons avant tout que l'érosion hydrique des sols est un phénomène naturel qui participe à la construction des reliefs et modelés. La culture des terres induit logiquement une accélération du processus (Borrelli et al., 2017) qu'il convient de maitriser au mieux pour en limiter les conséquences néfastes.

L'érosion engendre un transfert de matière de l'amont vers l'aval. Réduire l'érosion repose sur une logique de gestion intégrée des bassins versants et requiert donc en premier lieu d'en réduire la production, puis le transfert et enfin l'accumulation.

Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, il a été supposé que cette accumulation était en tout ou grandement partie responsable de l'envasement qui pose problème aux exploitants agricoles – les autres compartiments du phénomène n'étant que peu ou pas ressentis – mais aussi aux gestionnaires des milieux aquatiques et aux établissements d'accompagnement de la mise en œuvre de la politique publique de l'eau en France qui font face à des demandes de curage auxquelles ils ne peuvent pas systématiquement répondre favorablement. Pour limiter l'envasement, les exploitants agricoles, en tant que gestionnaires principaux du paysage du Bassin Versant de la Gandelée, sont donc les principaux acteurs de la modulation des phénomènes de production et de transfert, l'accumulation – selon son emplacement – n'étant pas forcément de son ressort. D'où l'objet de cette étude.

Les préconisations générales de lutte contre l'érosion sont issues de la bibliographie scientifique, de revues d'ingénierie, de retours d'expérience et des guides institutionnels. La liste est consultable dans la bibliographie. Une préconisation technique peut agir sur un ou plusieurs des compartiments de l'érosion. Nous privilégions généralement les méthodes dites "douces", qui sont techniquement et financièrement plus aisées à mettre en œuvre, mais qui impliquent en revanche un important travail d'éducation et de concertation directement avec les acteurs du territoire. Nous n'abordons également que les techniques qui ont un intérêt dans le contexte du Bassin Versant de la Gandelée. Quelques grands principes régissent la lutte contre la production et le transfert dans l'érosion, généralement de l'amont vers l'aval :

1. Limiter la genèse du ruissellement
2. Limiter le détachement des particules
3. Interrompre les transferts hydro-sédimentaires
4. Eviter la concentration des flux hydro-sédimentaires
5. A défaut, canaliser les flux hydro-sédimentaires

1.1. La couverture permanente du sol

La végétation protège le sol de l'impact des gouttes de pluies, diminue la vitesse d'apparition de la battance (
Figure 1), ralentit les filets d'eau superficiels et favorise ainsi cumulativement l'infiltration. Différentes techniques permettent une couverture permanente du sol, qui est aujourd'hui une technique quasi-systématique. L'efficacité de certaines techniques est liée à leur sensibilité aux aléas pluviométriques ponctuels, le temps que la couverture se développe après implantation.

Figure 1. Exemple d'une croûte de battance en formation sur un sol insuffisamment protégé après récolte de betterave au sein du Bassin Versant de la Gandelée (source : Solenvie).

1.1.1. Le non-labour

Le labour du sol résulte en une absence de résidus végétaux ou de végétaux qui protège la surface du sol de l'impact des gouttes de pluie et de l'arrachement, ainsi qu'en une diminution de la résistance du sol à l'incision via différentes raisons, phénomène certes limité au sein du Bassin Versant de la Gandelée. La présence d'une semelle de labour peut dans certains cas engendrer aussi des difficultés d'infiltration de l'eau sous l'horizon de labour qui se sature alors plus rapidement en eau et favorise le ruissellement et par là même l'érosion potentielle.
Cependant, pour des sols compacts cohésifs argileux sur pente faible, le labour peut favoriser la capacité d'infiltration et créer une rugosité de surface stable qui limitent le ruissellement et favorisent les dépôts de matière.

Figure 2. Exemple de parcelle sous semi-direct (source : www.romon.ch).

*Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, le non-labour est aujourd'hui la pratique dominante et est efficace pour lutter contre l'érosion hydrique diffuse : la plupart des exploitants utilisent des TCS, quelques-uns le semi-direct (*Figure 2*). Toutefois, la suppression du labour doit tenir compte :*

(i) de l'existence au sein d'un bassin versant d'unités de sols ayant des rôles différents vis-à-vis de l'hydrologie de surface et de l'érosion, et

(ii) de la nécessité d'utiliser des pneus basse pression, le non-labour ne permettant pas la suppression des traces de roues (hors outillage spécifique), parfois nombreuses sur les parcelles de betteraves notamment, récoltées souvent dans de mauvaises conditions saisonnières. Certains replats argileux situés en bordure de Gandelée (nous pensons aux replats de rive droite sur la section en aval de Nouans) ne souffriraient ainsi pas d'être labourée pour créer une rugosité de surface favorable à la sédimentation et à l'infiltration d'un flux amont. A l'opposé, pour les zones les plus érosives, les techniques de semi sous culture se développent pour les systèmes conventionnels et pourraient être soutenues.

1.1.2. Le paillage et le non-déchaumage

Le paillage réduit significativement l'impact des gouttes de pluie (effet *splash*) grâce à une protection de surface, et favorise la rugosité de surface et donc la diminution du ruissellement diffus. Le paillage dit « mort » peut être réalisé lors de la récolte en laissant suffisamment de résidus sur place. Il peut s'agir d'un apport externe (paille de céréales et d'herbes diverses, écorces, débris végétaux) qui doit être réalisé le plus rapidement possible après récolte pour ne pas laisser le sol nu. Une alternative est la technique du non-déchaumage qui consiste à laisser le chantier de récolte en l'état pendant l'interculture et à reporter le travail du sol au semis de la culture suivante, permettant de maintenir l'effet de "mulch" (couverture végétale morte).

L'efficacité du paillage nécessite un taux de recouvrement de 30 à 50% afin de limiter significativement le ruissellement et l'effet *splash (*Figure 3*)*. Le ruissellement étant diffus au sein du bassin versant, les risques d'entraînement du paillage « mort » sont nuls, hormis très localement.

L'inconvénient majeur de cette pratique est qu'elle rend difficile le contrôle des repousses et des adventices et que l'absence d'enfouissement ne favorise pas la décomposition des résidus en surface. L'abondance des résidus végétaux peut gêner le passage du semoir et altérer la précision de semis ; il faut donc veiller à broyer et répartir de manière homogène le reste de culture précédent.

Figure 3. Exemple de paillage suffisant sur une parcelle du Bassin versant de la Gandelée (source : Solenvie)

Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, le paillage et le non-déchaumage sont pratiqués par certains exploitants, avec succès semble-t-il d'après nos observations des états de surface, d'autant qu'il ne semble pas y avoir de difficulté de décomposition des résidus dans la majorité des cas. L'augmentation des taux de matière organique en surface est d'autant plus favorable à la limitation de l'érosion. Cette préconisation est à développer, notamment dans les secteurs érosifs ou battants identifiés, et en concertation avec les exploitants selon leur expérience de décomposition des résidus dans les sols et leurs besoins en paille céréalière.

1.1.3. Les cultures intermédiaires

Les cultures intermédiaires dites « en dérobée » sont implantées entre les cultures annuelles principales, assurant ainsi la protection des sols nus. Elles limitent ainsi la battance et le ruissellement, piègent les particules en suspension des filets d'eau, améliore le sol de différents

points de vue, et limitent donc l'érosion… Elles peuvent être obligatoires en tant que CIPAN. Il peut aussi s'agir de repousses de céréales.
Deux types de cultures en dérobée peuvent être utilisées : celles destinées à la récolte (seigle, radis…) et les « engrais verts » destinés à être enfouis pour améliorer les propriétés organiques et structurales du sol (moutarde, phacélie, vesce, ray-grass…).

Le choix et les dates d'implantation sont à raisonner en fonction des cultures précédentes, des caractéristiques climatiques et de la concurrence avec les autres activités (récoltes, ramassage des pailles). La réussite d'une culture intermédiaire pour lutter contre l'érosion est lié à un développement végétal suffisant avant la période pluviométrique érosive (Figure 4).

Figure 4. Exemple d'une culture intermédiaire mélangée en semi-direct sur blé au sein du Bassin Versant de la Gandelée (source : Solenvie).

Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, la période critique débute dès juillet-août et reprend en automne (voir le chapitre sur les périodes de modélisation). Les cultures en dérobées et CIPAN ne sont donc pas assez développées en été pour limiter significativement l'érosion, mais le sont pour la période automnale. Le lit de semence en été peut néanmoins favoriser l'infiltration et empêcher l'érosion si l'orage n'est pas trop intense. Pour limiter cet aléa climatique d'été, il est donc recommandé de coupler une culture intermédiaire à croissance rapide et implantée immédiatement après récolte, avec un paillage. L'accompagnement des agriculteurs vers le semi sous culture serait l'idéal. Si elle a lieu, la destruction des cultures intermédiaires en interculture longue doit être effectuée le plus tard possible, et donc bien au-delà de toute considération réglementaire. Les cultures intermédiaires comme le seigle sont toujours possibles après la récolte des cultures tardives.

1.1.4. Le semi intercalaire

Le principe est le semis d'une espèce (généralement trèfle parfois en mélange avec le ray-grass) entre les lignes de la culture principale, afin d'éviter l'érosion dans les cultures sensibles telles que les sarclées (principalement le maïs) qui recouvrent lentement le sol et dont l'inter-rang est nu pendant tout l'été (Figure 5). Le semis se fait après la levée du maïs pour éviter la concurrence hydrique, et on trouve une culture bien en place avant l'entrée dans l'hiver. L'inconvénient majeur de cette préconisation est qu'elle implique une charge de travail supplémentaire durant les récoltes d'été.

Figure 5. Exemple de semi intercalaire sous maïs (source : Conseil canadien de Conservation des Sols).

Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, cette pratique ne semble pas être utilisée malgré un faible coût et une grande efficacité. Etant donnée la structure de la pluviométrie et l'importance des surfaces sous maïs, le semi intercalaire, s'il est possible, est à encourager fortement, notamment en secteur érosif.

1.2. Travail du sol

Le travail du sol joue sur l'état de surface du sol, via la rugosité du sol, sa porosité, son tassement… et donc sur la capacité d'infiltration et de rétention en eau, d'autant plus qu'après semis, sauf dans les cas des plantes sarclées, il n'y aura pas d'opération de travail du sol jusqu'après la récolte.

1.2.1. Le sens de travail du sol

Dans les terrains en pente, un travail perpendiculaire à la pente forme de petits barrages qui retardent voire empêchent l'apparition du ruissellement. A priori d'approche simple, le choix du sens du travail relève vite du casse-tête car les parcelles présentent souvent plusieurs versants avec des

pentes différentes, des talwegs secondaires… Les petits barrages peuvent alors déborder en des points préférentiels, se concentrer et l'écoulement acquérir une force d'arrachement importante et causer alors plus de dégâts que dans le sens précédent. Dans ce cas, le semis suivant les courbes de niveau est idéal (surtout si couplé avec une bande enherbée en fond de talweg), mais il est jugé trop contraignant par la plupart des exploitants et rarement mis en œuvre volontairement sans compensation. Dans le contexte du Bassin Versant de la Gandelée, ce problème de rupture du « réservoir », créé par les lignes de travail qui débordent et s'effondrent, peut ponctuellement survenir et le choix du sens de travail doit être bien réfléchi. En-dehors des zones de genèse d'un ruissellement chronique, le travail perpendiculaire peut être réalisé en amont, en bordure de plateau, pour casser les apports via un ruissellement événementiel qui pourrait survenir lors d'un gros orage, mais aussi en aval pour favoriser l'infiltration et la sédimentation, ce qui est souvent le cas pour la fourrière. En cas de labour sur les pentes les plus fortes, l'utilisation d'une charrue réversible est à privilégier afin de verser systématiquement du côté amont et remonter la terre dans le versant ; la dérayure peut être efficace si elle suit suffisamment bien la courbe de niveau, sans quoi elle risque de constituer une zone de concentration à fort pouvoir d'arrachement.

Figure 6. Au premier plan, la parcelle est idéalement travaillée perpendiculairement à la pente, contrairement au versant opposé de l'autre côté du Ruisseau de la Bonde, où l'absence de talweg secondaire évitant toute concentration le permettrait (source : Solenvie).

*Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, quelques parcelles, notamment en secteur érosif, ne sont pas travaillées dans le sens le plus favorable à la réduction de l'érosion (*Figure 6*). Si la configuration du parcellaire l'explique pour certaines, aucune considération technique ou économique ne le justifie a priori pour d'autres, le nombre de retournements pouvant même être diminué significativement pour quelques-unes.* A défaut, d*ans la rotation, il est nécessaire de tenir compte de ces parcelles pour y cultiver le moins possible de cultures sensibles (sarclées notamment).*

1.2.2. Les travaux pendant et après récolte

Le travail du sol doit être réalisé le plus tôt possible après les récoltes pour redonner au sol sa capacité d'infiltration. Lorsque des traces de roues sont laissées, le sol ainsi tassé voit sa capacité d'infiltration fortement limitée, augmentant le ruissellement. Pour éviter ce tassement lors des chantiers de récolte, on peut jouer sur la pression du gonflement des pneus, utiliser des équipements spéciaux tels que les roues cages ou roues jumelées qui répartissent la charge (Figure 7). A noter que ces équipements ont tendance à inciter les agriculteurs à intervenir avant un ressuyage suffisant du sol. A défaut, le récoltant peut n'effectuer qu'un travail partiel mais judicieusement réparti au sein de la parcelle.

Les choix et les modes d'utilisation des outils sont importants pour « rouvrir » la surface et recréer de la rugosité. L'emploi des déchaumeuses à soc permet d'obtenir une surface de sol rugueuse et hétérogène, ce qui permet un stockage efficace des excès d'eau. En revanche, les outils à dents ou à disques ne permettent pas d'obtenir un stockage aussi efficace mais maintiennent davantage de résidus en surface. Les premières sont donc plutôt pour les zones amont et aval, les seconds plutôt pour les zones de pente où la stabilité structurale est nécessaire.

Figure 7. Opération de déchaumage à disque avec tracteur à roues jumelées (source : www.grostracteurspassion.com).

Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, les parcelles semblent rapidement déchaumées. L'utilisation de techniques de répartition de charges pourrait être favorisée pour les cultures à récolte tardive comme les betteraves, même si les tassements des sols ne sont pas un problème majeur au sein du Bassin Versant. Lors des interventions avant récolte, utiliser si possible des effaces-traces.

1.2.3. Les lits de semence

La rugosité de surface du sol retarde et limite l'apparition du ruissellement. Il s'agit de trouver l'équilibre entre un lit assez fin pour assurer une bonne levée mais assez grossier pour limiter la vitesse d'apparition du ruissellement, en fonction de l'état hydrique actuel et prévu du sol. Par exemple, si des pluies sont prévues rapidement après le semis, un lit grossier permet de limiter le ruissellement tout en permettant une humectation suffisante malgré un contact graine-terre initial médiocre. L'affinement nécessaire pour assurer un bon contact terre-graine devrait être limité aux lignes de semis en utilisant un matériel spécifique, à l'image de ce qui se fait en semi direct ou en semi sous culture.
La pérennité et l'efficacité du lit de semence repose aussi sur un travail mené sur un sol bien ressuyé, en limitant les passages, avec des engins à répartition de charge.

Figure 8. Exemple d'un lit de semence grossier de céréales au sein du Bassin Versant de la Gandelée (source : Solenvie).

*Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, la structure de la pluviométrie permet généralement la réalisation de lits grossiers (*Figure 8*). Les lits de semence observés nous ont semblé assez grossiers*

pour être efficaces vis-à-vis de la problématique d'érosion. L'équipement avec des semoirs spécifiques pourrait sans doute être amélioré et soutenu.

1.2.4. Le binage

Le binage, en cassant la croûte de battance, limite fortement le ruissellement, et peut donc être mis en œuvre dans cette optique, en-sus de son rôle premier de lutte contre les adventices. Toutefois, la déstructuration de la surface qui en résulte peut favoriser l'entraînement de particules, si bien qu'il ne doit être mené qu'en l'absence de risque de forte averse et sur une culture avec une canopée suffisante. Il est donc à proscrire dans les bas de versants cumulatifs de flux et dans les parcelles où un talweg a tendance à concentrer le ruissellement.

Figure 9. Exemple de binage de betterave à un stade de canopée idéal (source : www.paysan-breton.fr).

*Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, peu de sols sont très battants. Le binage peut néanmoins fortement réduire l'érosion sur les parcelles sous betterave s'il est effectué lors des périodes critiques, permettant de maintenir ensuite un état de surface du sol satisfaisant jusqu'à la récolte (*Figure 9*).*

1.2.5. Compacter les talwegs

Selon la configuration topographique des ensembles parcellaires et quelque peu en opposition des recommandations précédentes qui visent à favoriser la perméabilité, le compactage des talwegs peut réduire l'érosion lorsque des concentrations de ruissellement sont inévitables. Le but est de réduire la capacité d'arrachement : après semis doublé en un seul passage), le fond de vallon est simplement retassé par deux passages supplémentaires du tracteur portant le semoir (Figure 10). La largeur de la bande compactée est d'au moins 6 à 8 mètres. Cette solution est donc applicable quelle que soit la sinuosité du talweg, du moment que sa pente reste faible (<2%) et son aire de drainage limitée (~50 ha).

Figure 10. Exemple de bande tassée à semi doublé suivant le talweg (source : AREAS).

Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, le compactage pourrait être utilisé sur quelques bas de talwegs de grands ensembles parcellaires. Il reste toutefois moins efficace que d'autres préconisations comme des plantations de haies entre parcelles, des changements de sens de travail du sol qui évitent une trop grande concentration du ruissellement dans le talweg, et doit donc être utilisé à défaut ou en complément, en suivant son impact régulièrement pour s'assurer de sa pertinence.

1.3. Les amendements

Les amendements en carbonates et en matière organique favorisant la création de liaisons inter-moléculaires entre les constituants du sol et l'activité des macro- et micro-organismes : la stabilité structurale et la capacité d'infiltration s'en trouve améliorée, la résistance des sols à l'érosion aussi

en conséquence. Ils sont recommandés en premier lieu sur les parcelles les plus battantes et à faible stabilité structurale.

Les amendements organiques tels que fumier, lisier, paille, résidus de récolte, engrais verts, … doivent être incorporés superficiellement afin de constituer des obstacles au ruissellement lors de précipitations.
Avant tout chaulage, il est nécessaire de vérifier le pH du sol, voire mieux, son taux de carbonate. Le chaulage doit être mené sur un sol (i) ressuyé, pour éviter le tassement, et (ii) non amendé en fumier ou lisier (et vice-versa) pour éviter la volatilisation de l'azote ammoniacal.
Les activateurs biologiques ou biostimulants, les ensemencements, les améliorateurs de la qualité des sols et autres produits d'origine biologique, minérale ou organo-minérale sont rarement homologués. Leur efficacité est à prouver pour certains, reconnus pour d'autres. Ils peuvent agir significativement sur la réduction de l'érosion dans certains cas, mais le manque de recul sur les conséquences et le coût associé ne permettent pas de les préconiser actuellement, sans un suivi des parcelles concernées.

Figure 11. Parcelles du Bassin Versant de la Gandelée amendée en fumier (à gauche) ou chaulée avec des matières résiduelles (à droite) (sources : Solenvie).

*Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, les teneurs en matière organique restent modérées d'après les statistiques de la BDAT ; des amendements organiques, sous quelque forme que ce soit, sont donc requis (*Figure 11*). La présence d'élevage le permet facilement pour certaines exploitations. Les sols carbonatés sont encore nombreux et pour les autres, le complexe d'échange est probablement encore souvent riche voire saturé en calcium ; en-dehors de toute considération agronomique, un soutien calcaire par chaulage n'est sans doute à envisager que sur les sols hydromorphes décarbonatés et les LUVISOLs, ce qui requiert des analyses de sol préalables.*

1.4. Aménagements parcellaires et paysagers

Ces aménagements visent à organiser l'espace de manière à réduire l'aléa érosif. Ils traitent donc de l'organisation foncière, de génie rural, des alternances de cultures et d'occupation du sol, d'aménagements techniques anti-érosifs à proprement parler. L'érosion ne pouvant être totalement stoppée, certains aménagements peuvent aussi viser à sédimenter les particules érodées afin de les piéger ou de les redéposer en amont.

1.4.1. Taille, forme et orientation des îlots

Depuis le remembrement, le parcellaire est de moins en moins morcelé, la taille des îlots culturaux a tendance a augmenté. Une réorganisation parcellaire entre exploitants est généralement inenvisageable. Néanmoins, les exploitants possédant plusieurs parcelles dans leur îlot peuvent en profiter pour réduire les tailles, jouer sur les formes, les orientations, les alternances de culture, notamment sur les secteurs un peu pentus, afin d'influer sur l'accumulation et la vitesse de l'écoulement lors de précipitations (Figure 12). La réduction des surfaces parcellaires offre en outre la possibilité de densifier un peu le maillage bocager.

Figure 12. Au Sud du cours d'eau, l'organisation parcellaire, parallèle au cours d'eau et suivant mieux les courbes de niveaux, permet de limiter l'érosion plus efficacement qu'au Nord, où les parcelles sont allongées sur plus de 450 m dans le sens de la pente vers le ruisseau.

Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, nous avons observé que certaines parcelles ont été regroupées au sein du même îlot cultural entre 2014 et 2016. L'agrandissement et l'uniformisation culturale résultante des îlots en secteur érosif peut être problématique notamment pour les sarclées telles que le maïs, la betterave.

1.4.2. Rotations culturales et concertation d'assolement

Sur une même parcelle, la rotation culturale permet de réduire l'érosion en modulant les apports et besoins humifères, par l'action complémentaire des différents systèmes racinaires sur la structure du sol, ou encore par une alternance du type de travail du sol.

Le long d'un même versant, la diversification des cultures favorise l'alternance entre des parcelles infiltrantes ou ruisselantes. Par exemple, une organisation adéquate du parcellaire évite que des surfaces importantes soient fortement dégradées et génèrent du ruissellement lors de la préparation des semis dans les parcelles en aval (Figure 13). Les assolements sont choisis en fonction des caractéristiques des parcelles (sensibilité à l'érosion, position sur le versant...). Une telle organisation suppose une concentration forte entre agriculteurs cultivant les parcelles d'un même versant ou un pilotage efficace par le conseiller de la chambre agricole.

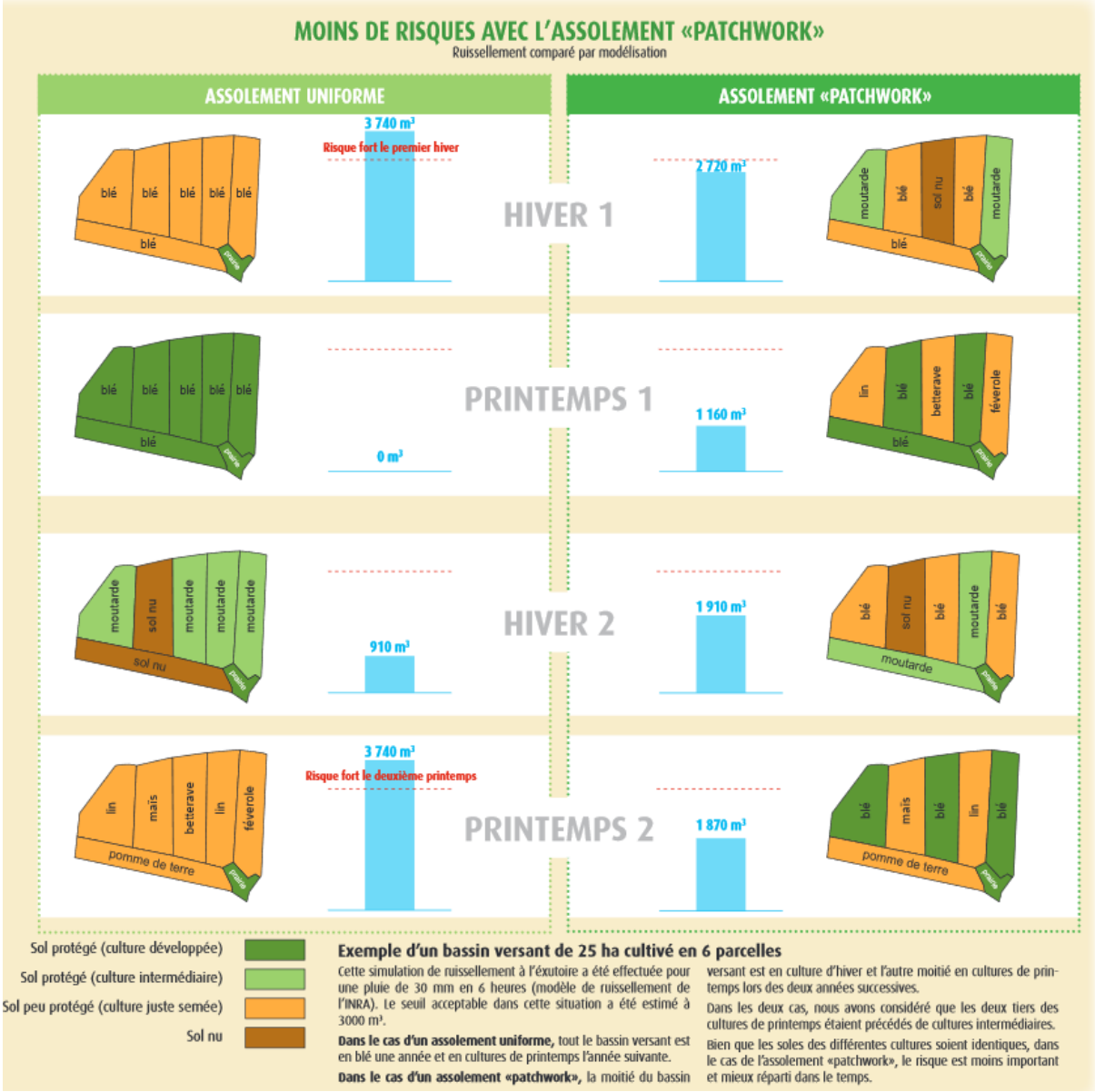

Figure 13. Exemple de ruissellement comparé par modélisation entre deux assolements d'un même versant (source :

Si on ne peut régir le choix des cultures au sein du Bassin Versant de la Gandelée, la monoculture, et notamment celle de sarclées, sur des mêmes parcelles et sur des parcelles voisines du même versant existe. Pour les secteurs sensibles à l'érosion, elle implique un nombre limité d'exploitants. Le pilotage externe de la coordination entre eux est toujours préférable pour limiter les conflits et pérenniser la mesure. Quelques parcelles sur secteur pentu pourraient être remises en prairie.

D'autre part, comme observé lors du chiffrage des coûts, environ 40 ha de colza sont cultivés en secteur défini comme hydromorphe d'après notre méthodologie, secteurs en bordure directe des

cours d'eau, et malgré la forte sensibilité du colza à l'état d'humidité du sol. Or, cette culture offre une protection du sol assez faible avec une connexion directe vers les cours d'eau. Il pourrait donc être bénéfique vis-à-vis de l'érosion et des rendements de choisir des parcelles appropriées pour l'implantation de cette culture.

1.4.3. Cultures en rang et prairies temporaires

Les sarclées représentent des surfaces importantes chaque année culturale. Ces cultures en rang favorisent l'érosion des sols. Sans les proscrire systématiquement, leur implantation en secteur érosif doit être limité. Leur alternance avec les prairies temporaires est idéale, car elles protègent le sol des problèmes d'érosion, stimulent la formation de matière organique et d'humus et améliorent la structure du sol. Plus la durée de la prairie est grande, meilleure est la protection du sol par la suite.

Un semis de céréale en bande (de 1 à 2 largeurs de moisson) perpendiculaire à la pente est possible sur les grandes surfaces (Figure 14), notamment sous sarclées ; la mesure est plus facile à mettre en œuvre si cette parcelle sous sarclées jouxte une parcelle sous cette même céréale appartenant au même propriétaire. La contrainte principale est l'existence éventuelle de mesures agroenvironnementales (MAE) sur îlot cultural qui se voit scindé en plusieurs. Les MAE durant 5 ans, il faut attendre leur fin pour éviter la rupture du cahier des charges qui déboucherait sur un remboursement de l'aide perçue les années précédentes. A la fin du contrat MAE ou en son absence, il suffira de dessiner les nouvelles parcelles et les déclarer en céréales, voire des protéagineux, ou des légumineuses à des fins d'alimentation animale de son cheptel pour les éleveurs, qui génèrent des aides supplémentaires.

Figure 14. Exemple de bande intercalaire fourragère au sein d'une parcelle de céréales (source : www.chasseurdelyonne.fr).

Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, quelques secteurs érosifs se situent sous sarclées. La betterave est spécialement à proscrire dans ces secteurs, car cette culture déstructure fortement les sols, ce qui favorise d'autant plus l'érosion. Le choix guidant l'emplacement des prairies temporaires ou de bandes de céréales peut aussi reposer sur les modélisations effectuées pour limiter l'érosion. La

réduction éventuelle des surfaces en sarclées par des prairies temporaires, voire permanentes, peut impliquer une modification de la structure de l'exploitation qu'il convient alors d'accompagner.

1.4.4. Bandes enherbées, haies, ripisylves et reboisement

Les bandes enherbées et les haies, avec une végétation permanente, suivant leur emplacement, assure une protection très efficace contre l'érosion des sols (production et transfert), tout en exerçant des fonctions écologiques importantes.

Les bandes enherbées sont préférentiellement localisées en rupture de pente pour stabiliser le sol et dans les zones de flux préférentiels (au fond des talwegs, le long des routes et chemins, en aval de parcelle). En bordure de cours d'eau, elles sont primordiales, elles sont le dernier obstacle avant le potentiel envasement et limite l'incision. La largeur réglementaire de 10 m est un minimum, il ne signifie pas qu'il est suffisant. Selon la pente et la surface drainée, son élargissement peut être requis pour assurer une fonctionnalité anti-érosive équivalente : par exemple pour une pente supérieure à 5% ou pour une monoculture en amont sur plus de 100 m. Une bande enherbée doit être bien nivelée et sans point de discontinuité critique pour éviter le passage préférentiel de l'eau. Son entretien est aussi important, il existe différents guides, tenant compte de la nature des variétés herbacées. Son utilisation comme zone de retournement est à proscrire. Hors cours d'eau BCAE, les bandes enherbées peuvent être implantées après un léger décaissement si la largeur requise est difficilement atteignable.

Les haies sont préférentiellement localisées le long d'une courbe de niveau, perpendiculaire à la pente, en bordure de parcelle. L'efficacité d'une haie, surtout lors de sa croissance initiale, repose aussi sur la présence d'un enherbement sur au moins 3 m (Figure 15). A terme, l'incorporation des feuilles et déchets verts (à broyer sur place) au sol favorise aussi la stabilité structurale du sol à proximité. L'encombrement d'une haie reste limité, le principal problème perçu par les exploitants est généralement la compétition hydrique, l'ombre portée et le temps d'entretien. Des aides existent pour la réimplantation de haies.

Les ripisylves sont implantées en bordure de cours d'eau pour le maintien des berges et la protection du transfert latéral, à condition qu'elle ne soit pas trop riche en arbres de haut-jet et soit constituée de buissonnants à enracinement fasciculaire profond.
Il convient alors de privilégier des espèces à dégradation rapide (feuillage léger décidu avec des tissus à faible C/N), et de les implanter dans des secteurs où le débit est suffisant pour l'évacuation des détritus afin de ne justement pas favoriser l'envasement ; l'entretien de la haie doit se réaliser de manière à éviter toute retombée de déchets verts dans le cours d'eau pour ne pas favoriser l'envasement. Il convient donc de peser le pour et le contre avant l'implantation d'une haie en bord de cours d'eau.

Pour des parcelles « clés », notamment, dans les fonds hydromorphes, le reboisement est parfois une option intéressante, car il favorise la stabilité du sol, son pouvoir d'interception et diminue l'hydromorphie. La suppression d'une parcelle en culture ou même d'une prairie est toutefois difficilement envisageable et acceptée.

Figure 15. La haie basse associée à une bande enherbée de 3 m est idéalement orientée et placée dans ce versant du Bassin Versant de la Gandelée, juste après la légère rupture de pente.

Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, dans les zones sans haies et à grandes parcelles, l'implantation judicieuse de haies mixtes (arbres de haut-jet + haie basse) transversalement aux axes de transfert permettraient de réduire significativement les transferts dans certains secteurs érosifs.
Pour les haies existantes et les zones bocagères plus ou moins dégradées, le maintien, le diagnostic et la prolongation des haies restantes (type, maillage, position sur le versant) est requis dans certains secteurs érosifs. L'efficacité anti-érosive des haies est visible sur certains secteurs du Bassin Versant.
L'implantation de ripisylves sur les berges des cours d'eau est aussi envisageable en quelques endroits spécifiques, après considération du potentiel d'évacuation des matières organiques par le cours d'eau, même si l'envasement constaté au sein du Bassin Versant de la Gandelée est plus d'origine minérale qu'organique. Il existe des guides spécifiques, car le milieu et la morphologie des berges imposent un choix d'essences à enracinement profond et fasciculé acceptant les battements de nappe. Il faut aussi limiter le poids des arbres sur les berges pentues ou à matériaux instables en privilégiant des buissonnants de type salix sp.
L'élargissement ponctuel des bandes enherbées à 15-20 m et leur réparation (nivellement, suppression des incisions et renforcement avec une diguette, des traces de roues parallèles à la pente), notamment au niveau du débouché de talweg en bordure du cours d'eau est une piste peu couteuse, facile à mettre en œuvre et très efficace. Des bandes enherbées trop rases ont été observées ponctuellement sur le terrain en 2017, et également sur les photos aériennes de l'été 2016 : en cas d'orage, leur rôle est quasi nul, l'herbe sèche est entraînée vers le cours d'eau et favorise son envasement : la diffusion d'un guide d'entretien des bandes enherbées aux exploitants concernés semble nécessaire.

Quant au reboisement, l'intensité de l'érosion dans le Bassin versant ne le justifie pas en première approche de remédiation, et le seul agriculteur enclin ne se situe pas en zone érosive.

1.4.5. Les chemins et les routes

Les routes sont généralement bordées de fossés qui permettent le captage du ruissellement et des particules transportées (voir le point suivant).

Les chemins peuvent :

- soit agir comme une barrière au transfert lorsqu'ils sont perpendiculaires à la pente, la zone centrale formant souvent un léger bombement tandis que le passage de roues est plutôt creusé piégeant ainsi l'eau chargée ; c'est souvent le cas des chemins enherbés « naturels »
- soit agir comme un axe de transfert préférentiel si le chemin est au débouché d'une zone de concentration des flux ; cela dépend toutefois de la nature du chemin, de son éventuel remblai… (Figure 16)

Lors de la restauration de chemins, il convient donc (i) de prendre en compte le potentiel de retenu d'érosion et d'envisager alors une légère surélévation, une stabilisation, un enherbement renforcé…. ou (ii) au contraire de prendre en compte son potentiel de transfert et d'envisager alors une déviation vers un fossé de décantation, un remblai drainant…, en particulier pour les chemins aboutissant vers le bord des cours d'eau.

Figure 16. Exemple de ruissellement sur un chemin entrainant une érosion (source : www.imagenesmy.com).

Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, quelques chemins en secteur érosif à proximité directe de la Gandelée constituent un axe de transfert préférentiel de terre vers celle-ci. Des mesures doivent y être étudiées, les flux peuvent par exemple être déviés vers une prairie adjacente ou dans un fossé à aménager comme présenté ci-après.

1.4.6. Les fossés

La fonction première d'un fossé est d'acheminer l'eau et non de retenir les sédiments. De ce fait, le fossé collecte principalement le ruissellement de la surface alimentant son point amont. Si l'on souhaite qu'il collecte l'eau qui arrive latéralement et sans concentration préalable des flux de ruissellement, outre une configuration topographique adéquate, il faut alors éviter de le border par une dérayure ou une fourrière, sans quoi le risque d'incision augmente.

Si on souhaite y favoriser et l'utiliser pour la sédimentation : le profil en travers doit être évasé () pour éviter l'affouillement des berges, surtout dans les sols limoneux fragiles (<18°) ; le renforcement des berges les plus sensibles par des dalles stabilisatrices à alvéole est à envisager, car il ne s'agit pas de créer une source supplémentaire de terre à curer ensuite ; le fossé doit être totalement stabilisé par un enherbement important et si possible sur ~30 cm le long des bords aussi ; la continuité hydraulique douce doit être assurée, prenant en compte le réseau de drainage éventuel, tout en favorisant le dépôt via par exemple des déversoirs (Figure 17) ; cela nécessite un curage coûteux et régulier, en évitant les périodes où les risques de ruissellement sont élevés, car le curage mécanique détruit la végétation qui stabilise le fossé qui se transformerait alors en ravine et serait source de sédiments pour le cours d'eau.

Infranchissable par les engins, l'implantation d'un fossé exige une limite de parcelles. En alternative, franchissable, le drain de surface (fossé comblé avec des matériaux filtrants stables comme des pierres concassées ou des graviers) est possible, mais à durée de vie temporaire en fonction de l'intensité de l'érosion et du potentiel de dépôt. Le drain de surface (mieux que le busage qui accélère le flux et l'affouillement) ne peut être que ponctuel pour permettre le passage sur une largeur plus ou moins importante.

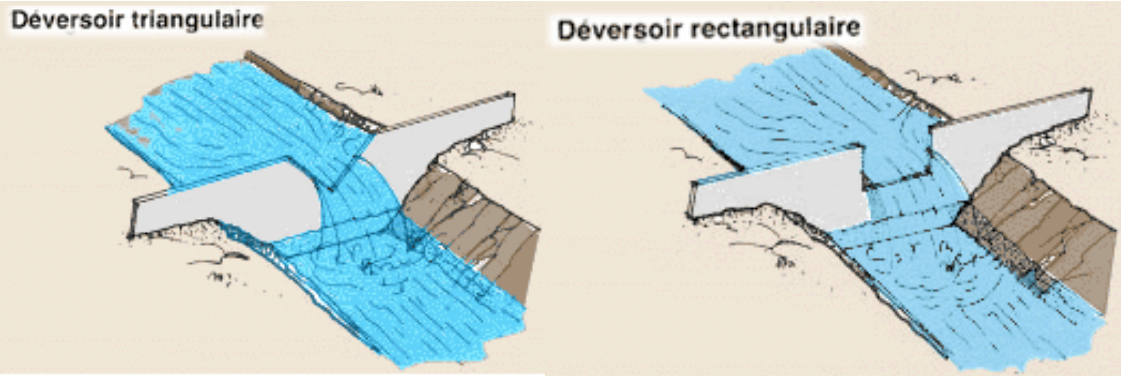

Figure 17. Deux types de déversoirs adaptés à des régimes hydriques et débits différents, la présence de petits branchages... (source : www.fao.org).

Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, certains fossés collectent les eaux de surfaces importantes, parfois en secteur érosif. De plus, bon nombre de collecteurs du réseau de drainage peuvent s'y déverser. Tous ne sont pas directement connectés au cours d'eau, mais tôt ou tard leurs sédiments y aboutiront, et ils ne doivent pas être négligés dans un second temps. Certains aboutissent directement dans les cours d'eau en suivant la ligne de plus grande pente : les sédiments sont donc directement déversés dans le cours d'eau. L'installation de déversoir avant le cours d'eau et leur curage régulier pourraient fortement limiter l'envasement des cours d'eau, la configuration hydraulique et topographique semble le permettre par endroit, les sapements de berge en amont devant être résolus avant toute chose. Le dimensionnement de ces déversoirs doit se réfléchir par une étude hydraulique spécifique préalable, étude globale au Bassin Versant s'ils étaient voués à se multiplier : la diminution ou le retard d'alimentation du cours d'eau peut effectivement influer sur son

équilibre écologique. Les volumes curés seront redéposés en amont. Leur entretien, s'il est laissé aux exploitants ou aux communes, doit faire l'objet d'un cahier technique. Nous recommandons au SMBOS de réaliser un suivi de cet entretien, afin de mesurer les volumes curés et donc l'utilité effective du dispositif.

1.4.7. Drainage

Le premier système de drainage est le fossé dont nous venons de discuter. Quand c'est nécessaire, une raie à la charrue permet de drainer et canaliser d'avantage les eaux en direction d'une bande herbeuse d'une prairie ou d'un fossé aménagé. Néanmoins, il faut être prudent avec cette mesure qui nécessite une absence de pente notable et un déversoir apte, car ce chemin préférentiel augmente la vitesse d'écoulement, si bien que les particules fines peuvent sortir de la bande ou de la prairie.

Le second système de drainage sont les drains agricoles qui collectent les eaux d'infiltration afin d'éviter la saturation des sols en eau. Les implantations, dimensionnements et principes constructifs font appel à des raisonnements spécifiques. Leur impact sur le ruissellement dans les parcelles agricoles est plus ou moins notable en fonction notamment de l'existence d'une saturation à faible profondeur du sol, d'une réserve utile insuffisante pour tamponner les évènements pluvieux, de leur capacité d'infiltration, du régime hydrique du versant… Il ne faut pas oublier que tout passage préférentiel d'eau entraîne des particules solides, le drain agricole n'y échappe pas : encore une fois, de nombreux facteurs influencent l'intensité du phénomène, mais le réseau de drainage contribue forcément à l'apport de sédiments dans les collecteurs, fossés puis cours d'eau. Des décanteurs existent mais leur installation est très couteuse et techniquement non systématiquement réalisable.

Finalement, sans une étude spécifique à la parcelle, il n'est pas possible de savoir si le drainage est un frein ou un accélérateur de l'envasement des cours d'eau.

Figure 18. Sur cette photographie aérienne infrarouge couleur prise au sein du Bassin Versant, le réseau de drainage est parfaitement visible grâce à la différence d'humidité du sol.

*Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, le drainage par drains collecteurs complété par les fossés est omniprésent (*Figure 18*). L'aménagement des fossés pour curage au niveau des collecteurs peut être envisager, ou plus en aval avec les remarques précédemment formulées.*

1.4.8. Zones d'expansion et sédimentation du cours d'eau

Il ne s'agit pas ici à proprement parler de réservoirs aux eaux de crues, même si le rôle de temporisateur de crues existe. L'idée ici est plutôt de supprimer le chenal du cours d'eau pour le diviser et le reméandrer une sorte de zone marécageuse à débit ralenti avec un fort espace de mobilité qui permet de piéger les sédiments (Figure 19). Ce n'est donc pas un dispositif de lutte contre l'érosion du bassin versant, faible car il s'agit uniquement de contenir les éléments érodés et non de les éviter, mais un aménagement contre l'envasement de son chenal aval.

Les prérequis et contraintes à la réalisation de ces aménagements sont nombreux. Il est nécessaire de disposer par maîtrise foncière ou conventionnement de superficies généralement notables, situées le long du cours d'eau, qui seront rendues non-cultivables, difficilement voire non pâturables, exploitables en sylviculture avec les contraintes inhérentes à ce type de milieu créé. Le contexte topographique des surfaces adjacentes doit s'y prêter, ainsi que les contextes hydrologique et hydraulique relatif à l'encaissement du chenal, aux arrivées de tributaires, aux vitesses d'écoulement, etc. Les coûts sont très élevés, car des moyens lourds sont engagés pour mener des terrassements qui bouleversent aussi le milieu écologique impacté.

Figure 19. Zone de sédimentation et d'expansion d'un cours d'eau sans chenal (source : Solenvie).

Au sein du Bassin Versant de la Gandelée, de prime abord, une voire deux zones pourraient convenir à ce type d'aménagement au niveau de la confluence du Ruisseau de la Georgette et du Ruisseau de la Gandelée : il s'agit de boisements, dans un contexte topographique et pédologique qui semble permettre l'aménagement, avec un fil d'eau peu pentu, un encaissement limité du chenal, de sols peu perméables.

L'aménagement permettrait de favoriser la sédimentation de plus du tiers de la surface du Bassins Versant de la Gandelée (~1 500 ha à la confluence sur les 4415 ha du Bassin Versant), sur un secteur plus érosif que la moyenne (3,86 t/ha/an contre 2,91 t/ha/an sur la totalité du Bassin Versant d'après la modélisation RUSLE), et notamment en aval de secteurs érosifs comme les coteaux de Dangeul. Le tonnage total d'érosion à la confluence représente ainsi 6 000 t à comparer au total de 12 000 t en sortie du Bassin versant de la Gandelée, soit la moitié. Évidemment, sur ces 6 000 t, seule une infime partie est transférée jusqu'au cours d'eau, l'essentiel demeurant dans les parcelles et fossés, et peut donc potentiellement circuler via cette confluence. De plus, les cours d'eau à l'amont de cette confluence ne nous ont pas semblé être les plus envasés du Bassin Versant.

Avant d'entreprendre ces coûteux aménagements, nous recommandons donc de réaliser au maximum les aménagements doux précédemment présentés, puis de réaliser un suivi des matières en suspension qui est la seule méthode pour quantifier précisément le tonnage des sédiments ainsi captable.

2. EXEMPLES DE PRECONISATIONS SPECIFIQUES A DIFFERENTS SECTEURS MODELISES COMME LES PLUS EROSIFS

43 secteurs les plus érosifs ont été identifiés sur la base des modélisations couplées IRIP, RUSLE et STREAM (Figure 20).

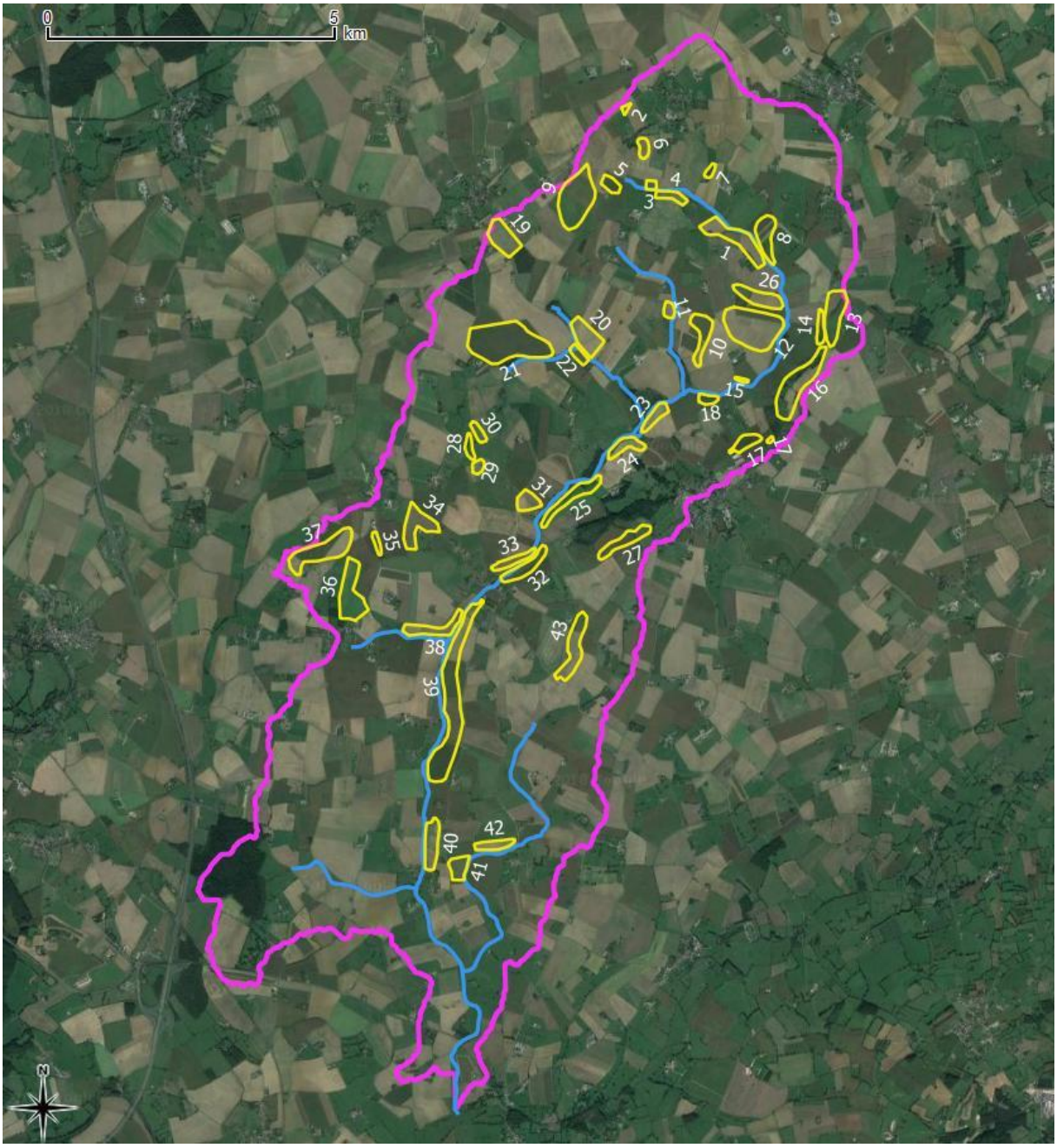

Figure 20. Localisation des 43 secteurs les plus érosifs au sein du Bassin Versant de la Gandelée selon les modélisations.

Les préconisations propres à chaque secteur sont présentées dans le Tableau 1. Elles peuvent être complémentaires, priorisées ou interchangeables selon les possibilités qui seront laissées par les exploitants. La localisation des préconisations amenant à des aménagements sont localisées dans une couche SIG shapefile fournie au SMBOS.

Les préconisations reposent sur l'identification des paramètres qui influent sur la sortie des différentes modélisations des différents modèles (par exemple topographie, type de sol et ses caractéristiques, rotation culturales, longueurs de pente…)

Tableau 1. Préconisations pour les différents secteurs érosifs selon les modélisations.

Secteur	Préconisations
1	Eviter les cultures ruisselantes Renforcer l'apport de MO Pratique des TCS et implantation rapide des cultures intermédiaires Elargir la bande de travail perpendiculaire ou la bande enherbée, car le transfert est important en bord de ruisseau
2	Il s'agit d'une zone de départ de flux : éviter les cultures trop ruisselantes, privilégier celles bien couvrantes en foin d'été Renforcer l'apport de MO Pratique des TCS Elargir la bande de travail perpendiculaire
3	Changer l'orientation du travail du sol pour favoriser le travail perpendiculaire à la pente, sinon éviter les cultures ruisselantes Renforcer l'apport de MO Pratique des TCS Casser la continuité hydraulique avec l'amont par une haie ou une bande enherbée A défaut, envisager un fossé à déversoir
4	Le transfert relatif est important vers le bord du ruisseau : idéalement, remettre en prairie la partie en pente forte, à défaut, élargir la bande de travail perpendiculaire ou la bande enherbée Conserver le travail du sol perpendiculaire à la pente Renforcer l'apport de MO Pratique des TCS Implanter une couverture à croissance rapide après la récolte d'été des cultures d'hiver
5	C'est une zone de départ de matière importante Conserver le travail du sol perpendiculaire à la pente Renforcer l'apport de MO Pratique des TCS Continuer d'éviter les cultures ruisselantes Implanter une couverture à croissance rapide après la récolte d'été des cultures d'hiver, avec maintien d'un paillage/non déchaumage
6	Implanter une couverture à croissance rapide après la récolte d'été des cultures d'hiver Maintenir ce sens de travail nord/sud Préserver une rupture hydraulique de la culture avec l'amont Renforcer l'apport de MO Pratique des TCS Si besoin, tasser le fond de talweg et semi double Eventuellement, création d'une bande enherbée et/ou ripisylve en bordure du fossé ouest sur 3-5 m
7	Le secteur est en bordure d'une tête de vallon Maintenir un sens de travail du sol perpendiculaire à la plus grande pente, essayer de créer plus de rugosité lors du travail Ne pas créer de fossé dans le fond du vallon, mais y implanter une haie ou une bande enherbée pour bloquer les transferts vers aval
8	Forte concentration du flux en bas de secteur, avec incision de la rive de la Gandelée. Casser le flux amont par une haie entre les 3 parcelles (propriétaires tous différents) et

	une culture couvrante, surtout en automne Bande de tassement avec semi double en fond vers SE Réparation de l'incision et remodelage de berge pour disperser le flux dans la bande enherbée qui est à élargir en sortie de talweg. Stabiliser avec une ripisylve. Renforcer l'apport de MO Pratique des TCS Elargir la bande de travail du sol perpendiculaire à la pente
9	Zone complexe en contrebas d'interfluve Le sens de travail du sol n'est pas toujours optimal selon les années : favoriser le travail perpendiculaire à la pente Implanter une couverture à croissance rapide après la récolte d'été des cultures d'hiver, avec maintien d'un paillage/non déchaumage Renforcer l'apport de MO. Soutenir l'état calcique après vérification du besoin Pratique des TCS Séparer les 2 parcelles ouest par une haie au niveau du léger talweg jusqu'au recoupage du talweg plus en aval Si besoin, fossé à déversoir relié à Gandelée
10	Modifier le sens de travail du sol pour un axe est/ouest perpendiculaire à la pente Renforcer l'apport de MO Implanter une couverture à croissance rapide après la récolte d'été des cultures d'hiver Séparer cette parcelle des autres avec une haie au sud et la prolongation de la haie existante vers le nord. Ne pas faire de fossé dans le fond du vallon qui doit rester enherbé et arbustif
11	Zone à forte érosion potentielle en bordure du ruisseau de la Vaujoinnerie Limiter la connexion parcelle/ruisseau soit en implantant une prairie (idéalement permanente ou au moins temporaire et régulière), soit avec une bande enherbée élargie en bordure de ruisseau Renforcer l'apport de MO. Soutenir l'état calcique après vérification du besoin Pratique des TCS Eviter les cultures sensibles Maintenir ce sens de travail du sol
12	Il existe un petit talweg étroit à flux concentré en milieu de parcelle. La configuration est complexe vis-à-vis de la Gandelée à l'est Conserver le sens de travail nord/sud au détriment du talweg Créer un maximum de rugosité perpendiculaire à la pente sous cultures ruisselantes en rang Reparcelliser avec des haies ou bandes enherbées séparatives Tasser avec semi double, voire réenherber le fond de talweg Elargir la bande enherbée en bordure de Gandelée avec une strate arbustive pour éviter cisaillement de bordure au niveau de la sortie de talweg
13	Limiter les flux en : i. conservant et densifiant le réseau de haies (quinconce et transversales), notamment planter une haie en amont de la route ii. favorisant les prairies ou cultures couvrantes, aussi pour les sols battants du plateau pour éviter transfert vers les zones pentues érosives iii. conservant ce sens de travail du sol Renforcer l'apport de MO Utiliser une charrue réversible lors d'éventuels labours pour remonter la terre
14	Début du glacis et de la zone d'accumulation potentielle dans le vallon Juste adapter le sens du travail perpendiculaire à la pente, au moins sur une bande à élargir plus que l'actuelle

15	Modifier l'orientation du travail du sol pour l'axe perpendiculaire à la plus grande pente ou au moins élargir la bande de travail perpendiculaire de bas de parcelle en évitant les cultures ruisselantes en rang Vérifier les besoins de chaulage dans le bas de parcelle plus hydromorphe
16	Parcelle en zone de départ et en pente Casser les flux en conservant, restaurant et densifiant le réseau de haies existant, de manière à avoir des haies transversales en quinconce sur le versant Idéalement, parcelles à conserver sous prairie temporaire régulièrement ou à remettre en permanente (n° 21 et 24) : EARL de la grande touche prête à remettre en prairie la parcelle cultivée au nord Sinon, conserver ce sens de travail du sol, et si labour, utiliser une charrue réversible. Absolument éviter les cultures en rang, pratiquer le semi-direct ou sous culture"
17	Parcelle sous maïs en 2017 : éviter les cultures ruisselantes en rang sans créer une forte rugosité Conserver ce sens de travail Utiliser une charrue réversible si labour Maintenir, voire densifier, la haie centrale, et la prolonger sur toute la largeur de parcelle pour couper les flux
18	Changer le sens de travail du sol sur la totalité de la parcelle, ou au moins sur une plus grande largeur Elargir la bande enherbée Apport renforcé en MO Maintenir et renforcer la petite ripisylve en place
19	Il s'agit d'une tête de vallon en contrebas de la limite de BV Modifier le sens de travail du sol pour un axe est/ouest, sinon absolument éviter les cultures en rang Apport renforcé en MO. Soutenir l'état calcique après vérification du besoin Favoriser les cultures couvrantes de fin d'été/automne Casser la continuité hydraulique vers l'aval dans le talweg en prolongeant le bois au sud-est par une haie jusqu'à la route
20	Maintenir le travail du sol perpendiculaire à la pente Elargir la bande enherbée en bordure de ruisseau Privilégier les cultures couvrantes en été Casser la continuité hydraulique avec l'amont (petite bande enherbée/haie séparative) pour éviter trop de flux d'eau sur ce secteur Renforcer l'apport de MO. Soutenir l'état calcique après vérification du besoin
21	Zone potentiellement érosive avec deux talwegs pouvant concentrer les flux Maintenir les sens de travail du sol est/ouest et continuer le semi-direct Implanter une couverture à croissance rapide après la récolte d'été des cultures d'hiver Maintenir le boisement au sud et créer une zone de sédimentation (prolongement du boisement, élargissement de la bande enherbée) en sortie de talweg et bordure de ruisseau Renforcer l'apport de MO. Soutenir l'état calcique après vérification du besoin
22	Zone potentiellement érosive en situation de confluence Préserver le sens de travail du sol et maximiser la rugosité pour les cultures en rang. Eviter betterave dans tous les cas. Idéalement, mettre en prairie au moins temporairement et régulièrement Renforcer l'apport de MO Difficile d'élargir la bande enherbée étant donnée la taille de la parcelle
23	Zone à forte pente et à érosion potentielle Préférez la prairie permanente, favoriser une ripisylve en bordure de Gandelée,

	préserver/développer strates basses dans le sous-bois Si culture : apport renforcé en MO, changement du sens de travail majoritaire de la parcelle, a minima élargir la bande de travail perpendiculaire et préserver la bande enherbée Il s'agit d'une des seules zones où la création d'une zone de méandre/sédimentation de la Gandelée est techniquement et foncièrement réalisable"
24	Zone à forte pente et à érosion potentielle Renforcer l'apport en MO Préserver la prairie permanente, y éviter le surpâturage et favoriser la ripisylve en bordure de Gandelée Dans les parcelles en culture, toujours travailler perpendiculairement à la pente Efficacité des haies à vérifier et densification éventuelle Aménagement d'un fossé à déversoir à curer le long de la route sur le bas de versant avant déversement dans Gandelée
25	Zone à forte pente et à érosion potentielle Préserver la prairie permanente, y éviter le surpâturage et favoriser la ripisylve en bordure de Gandelée Dans les parcelles en culture, toujours travailler perpendiculairement à la pente Renforcement des haies en amont des pâtures Vérifier si les chemins constituent un passage préférentiel d'eau chargée, si oui à résoudre par enherbement ou grille de captation avec rejets dans les pâtures ou dans un fossé à déversoir C'est une autre zone possible d'aménagement de sédimentation/méandre de la Gandelée
26	Changer le sens de travail du sol pour un axe est/ouest Elargir la bande enherbée à proximité du fossé, notamment en tête de son initiation
27	Zone de départ de flux Modifier sens de travail du sol pour l'axe perpendiculaire à la plus grande pente, ou a minima élargir la bande de travail perpendiculaire Favoriser les cultures couvrantes de fin d'été, éviter les cultures en rang dans le sens de la pente et pailler Conserver le fossé en bas bien enherbé pour ralentir les flux vers la Gandelée
28	Zone de départ de flux Conserver la prairie permanente Haie à planter en bas de zone érosive pour minimiser les transferts
29	Zone de départ de flux Idéalement, remettre en prairie permanente, ou temporaire régulièrement Sinon, modifier l'orientation du travail (ce qui semble toutefois compliqué) et élargir la bande enherbée en bas de parcelle Sinon, éviter absolument les cultures ruisselantes en rang En complément et selon les modifications qui ont pu être apportées, aménager le fossé avec un déversoir à curer
30	Zone de départ de flux Idéalement, remettre en prairie permanente, ou temporaire régulièrement a minima, jusqu'à la rupture de pente Pour les cultures, modifier l'orientation du travail du sol et éviter absolument les cultures ruisselantes en rang dans le sens de la pente Supprimer le fossé en bas de parcelle pour favoriser une zone de dépôt dans la prairie ou une bande enherbée créée En complément et selon les modifications qui ont pu être apportées, aménager le fossé en aval avec un déversoir à curer

31	Eviter les cultures en rang, favoriser les couvrantes, pailler et conserver ce sens de travail avec une maximisation de la rugosité Pratiquer les TCS Le fossé central concentre les flux : en bas, atténuer les transferts vers Gandelée par de l'enherbement, pour ralentir et favoriser les dépôts venant du fossé central de la parcelle amont
32	Il s'agit d'une zone de pente érosive en bordure de Gandelée Idéalement, remettre en prairie permanente les bords de Gandelée Préserver le sens de travail du sol actuel Favoriser les cultures couvrantes ou maximiser la rugosité pour les cultures en rang dans ce sens de travail Apport renforcé en MO Renforcer les berges et l'interception par une ripisylve basse en bordure de ruisseau, où les berges sont peu stables des 2 côtés et adoucir les pentes de berges à enherber sur les 10 m avec des espèces plus hygrophiles (fétuque élevée par ex)
33	Idem Secteur 32
34	Zone de transit Conserver ce sens de travail Renforcer l'apport en MO et soutenir l'état calcique après vérification du besoin Maintenir une couverture au maximum, soit par paillage/non déchaumage, soit en favorisant les cultures les plus couvrantes (sarclées à bannir) Receinturer de haies pour éviter le transfert vers l'aval et limiter le ruissellement depuis l'amont
35	Secteur érosif situé sur une légère rupture de pente Changer l'orientation du sens de travail du sol Conserver une culture couvrante comme le blé, sinon maximiser la rugosité Idéalement, reparcelliser en bocage avec une haie/bande enherbée au niveau de la zone la plus érosive
36	Secteur en bordure d'un important vallon Renforce l'apport en MO et vérifier les besoins de chaulage dans les unités de sol hydromorphes Préserver le travail du sol nord-nord-est/sud-sud-ouest Favoriser des cultures couvrantes que le maïs et le semi-direct Casser le ruissellement amont avec une haie Elargir la bande enherbée au niveau des sorties de talwegs Eventuellement aménager un déversoir avant la route si permis par la hauteur de sorties des collecteurs de drains
37	En limite d'interfluve, il s'agit d'une zone de départ potentiel mais peu connectée aux vallons et axe de transfert Renforcer l'apport en MO Privilégier le semi-direct et les TCS, ainsi que les cultures couvrantes Modifier le sens de travail du sol pour la parcelle au sud Efficacité des haies à vérifier (non recensées, donc non prises en compte dans le modèle) Si besoin, aménager le fossé avec des déversoirs, surtout au sud, sauf si fait au niveau du Secteur 35
38	Ces parcelles sont potentiellement érosives et directement connectées au système hydrologique Renforcer l'apport de MO Privilégier le semi-direct et les TCS Suivre courbes de niveau lors du travail sur parcelle centrale, ce qui minimise aussi le nombre de retournements

	Eviter la culture du maïs (voir la différence avec les parcelles à l'ouest sous blé lors des modélisations), sinon maximiser la rugosité perpendiculaire Elargir la bande enherbée en bordure des ruisseaux Renforcer les berges et l'interception par une ripisylve basse en bordure de Gandelée, où les berges sont peu stables des 2 côtés et adoucir les pentes de berges à enherber sur les 10 m avec des espèces plus hygrophiles (fétuque élevée par ex)
39	Il s'agit d'une zone de pente érosive en bordure de Gandelée Idéalement, remettre en prairie permanente les bords de Gandelée Renforcer l'apport en MO Favoriser le semi-direct, le semi sous culture et les TCS Sens de travail du sol non optimal au sud et sur une parcelle du centre : travail perpendiculaire à la pente à favoriser Elargir la bande enherbée en bordure de Gandelée, en particulier en sortie de talweg La bande enherbée est mal entretenue en 2016 et 2017 en partie centrale, un accompagnement de l'exploitant est peut-être nécessaire Renforcer les berges et l'interception par une ripisylve basse en bordure de ruisseau, où les berges sont peu stables des 2 côtés et adoucir les pentes de berges à enherber sur les 10 m avec des espèces plus hygrophiles (fétuque élevée par ex)
40	Il s'agit d'une zone de pente érosive en bordure de Gandelée Idéalement, mettre en prairie permanente ou introduire une temporaire dans les rotations Renforcer l'apport en MO Privilégier le semi-direct et les TCS Eviter les cultures peu couvrantes Conserver ce sens de travail du sol Elargir la bande enherbée, voire implanter une ripisylve basse en bordure de Gandelée
41	C'est une zone potentiellement érosive en extrados du ruisseau de la Mare Changer l'orientation du travail du sol Implanter une couverture à croissance rapide après la récolte d'été des cultures d'hiver Elargir la bande enherbée en sortie de talweg et bordure de ruisseau
42	Renforcer l'apport en MO et vérifier les besoins de chaulage dans le bas de parcelle plus hydromorphe Privilégier le semi-direct et les TCS Favoriser les cultures couvrantes Conserver ce sens de travail du sol et maximiser la rugosité pour les cultures en rang Casser le flux amont par une haie Elargir un peu la bande enherbée de bord de ruisseau à l'est
43	C'est une zone potentiellement érosive en bordure de vallon Conserver le sens de travail du sol nord-nord-est/sud-sud-est Créer une vraie bande enherbée, surtout au niveau des sorties de fonds de talweg A défaut ou en complément, aménager le fossé avec des déversoirs à curer Passer la jachère en prairie permanente

Par rapport à l'intensité de l'érosion, à la connectivité directe avec les cours d'eau et nos observations, les 11 secteurs prioritaires sont : 1, 4, 8, 12, 22, 23, 24, 25, 32, 39 et 40.
Cette priorisation ne tient pas compte d'un relevé exhaustif de l'envasement réel des cours d'eau, ni de l'inclinaison des propriétaires ou exploitants à accepter des aménagements ou une modification de leurs pratiques.

L'idée par la suite n'est pas d'aborder chaque secteur identifié et ses aménagements contre l'érosion ou l'envasement, mais plutôt de présenter sur quelques exemples variés la logique sous-jacente aux aménagements et leur impact quantitatif à l'aide d'une nouvelle modélisation qui en tient compte.

2.1. Exemple d'un secteur à reparcelliser et rebocager avec une haie

Cet exemple est illustré par le secteur 10, au sud de la Pignardière (Figure 21).

Sur la parcelle située à l'ouest (à gauche), l'implantation de haie perpendiculairement à l'axe du vallon permet de couper les flux majeurs du vallon, d'éviter une surconcentration du ruissellement et diminue en théorie les flux hydrosédimentaires de près de 2/3, ce qui est très significatif. Cet aménagement est simple et en adéquation avec les pratiques agricoles, sans être trop contraignant sur l'exploitation.

Sur la parcelle située entre le Grand Chevré et la Pignardière, le modèle initial calcul un axe important de concentration de flux qui débouche directement dans la Gandelée. L'ajout, à mi-pente, d'une haie dense permet de bloquer l'essentiel de ces flux, réduisant de plus de 80% les apports solides théoriques dans la Gandelée. Cet aménagement peut être considéré comme un peu contraignant car il se situe en milieu de parcelle, mais son effet reste très significatif sur les apports solides théoriques.

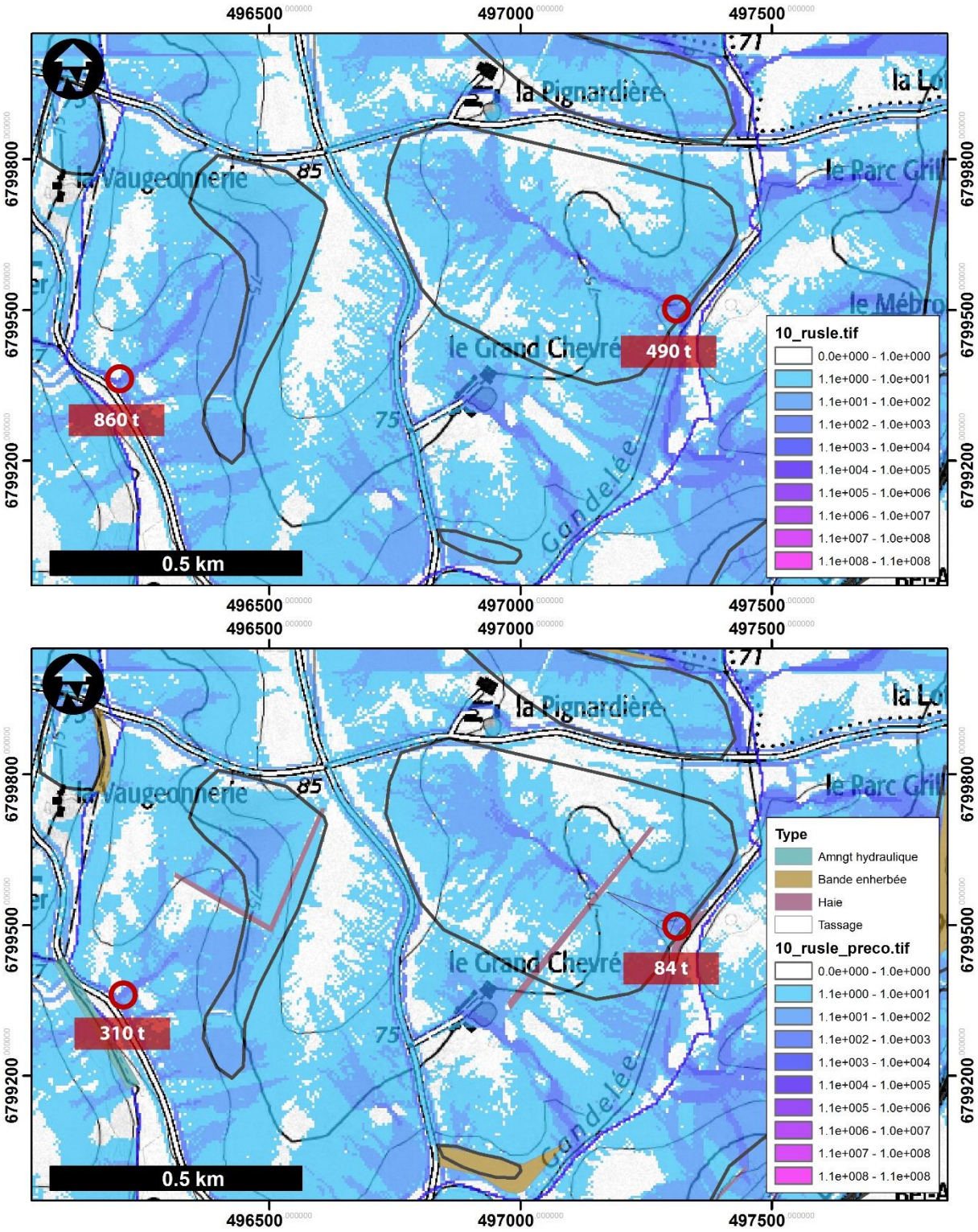

Figure 21. Exemple de restauration de haies. En haut, l'état actuel. En bas, l'état après implantation de haies. Modélisation sur la base de RUSLE annuel moyen.

2.2. Exemple d'un secteur de coteau avec haies restaurées

Au nord de Dangeul, le rebord de cuesta est à l'origine d'un talus fortement penté favorable à l'érosion. On y retrouve des relictes d'un ancien réseau de haies, aujourd'hui en grande partie détruit.

Nous avons réalisé un essai d'implantation de haies transverses sur le coteau en lui-même, dans un secteur d'initiation de flux hydro-sédimentaires (Secteur 17 ; Figure 22). On le voit, le résultat en sortie de vallon n'est ici pas convaincant de prime abord, car le gain théorique n'atteint même pas 6% de l'érosion actuelle (1590 à 1499 t). Si ces 6% de gain ne changent rien sur l'envasement au terme du transfert hydro-sédimentaire, ce sont tout de même 91 t/an de terre de cette parcelle de 11 ha qui seront retenus en amont de la haie, qui est justement l'endroit le plus érosif.

On observe par contre la présence d'un vallon transversal à la pente qui joue lui le rôle de collecteur hydro-sédimentaire pour tout ce versant et permet de transférer une partie de ces flux vers la ferme du Petit Chevré. Ce vallon joue naturellement un rôle de collecteur et permet un ralentissement des flux ainsi qu'un stockage temporaire des sédiments. Il faut donc surtout veiller ici à ce que ce vallon ne soit pas "ouvert" par des travaux de drainage superficiel qui augmenterait les flux et induirait un déstockage partiel des sédiments stockés.

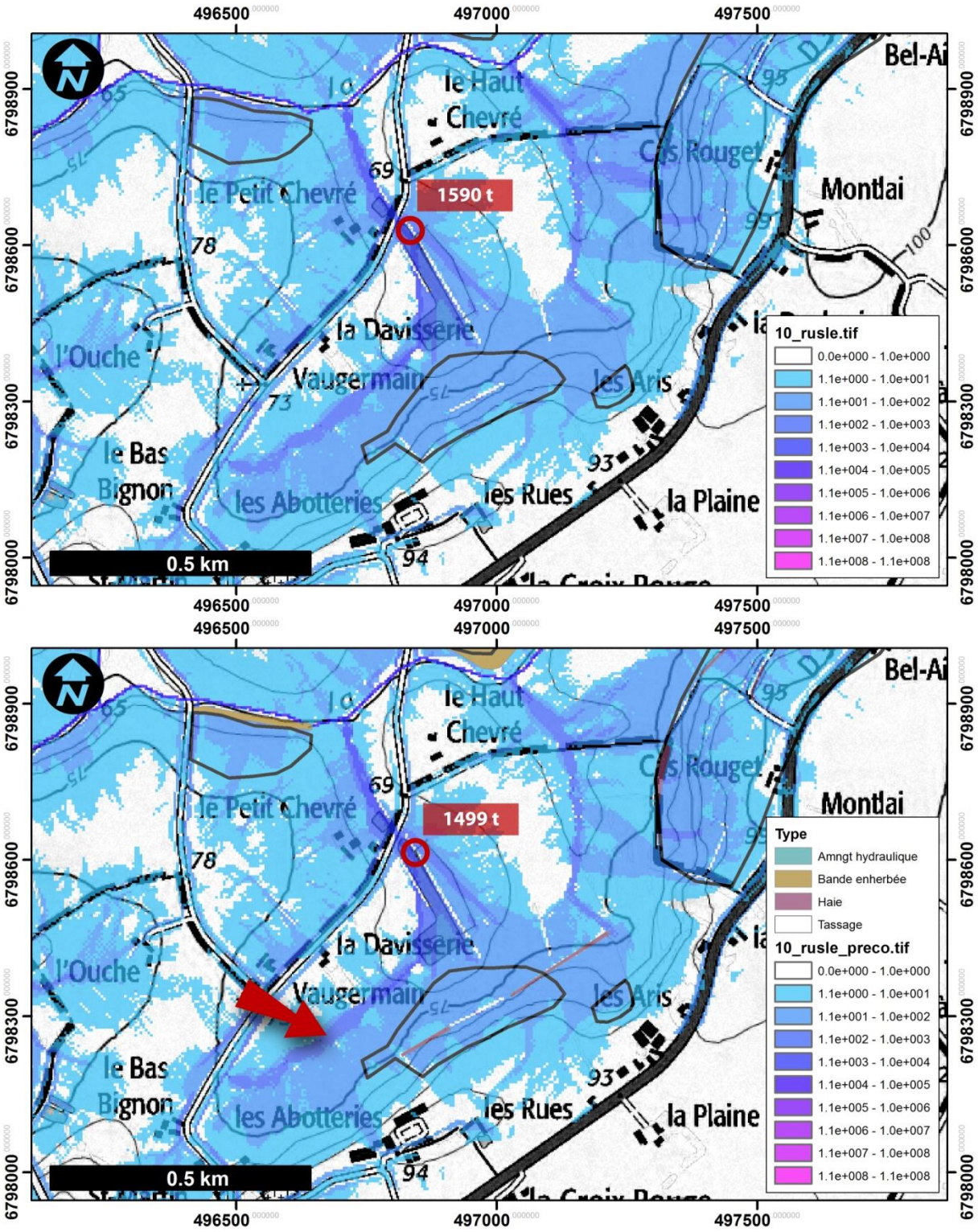

Figure 22. Exemple de restauration de haies sur les coteaux de Dangeul. En haut, état actuel. En bas, avec les restaurations de linéaires de haies. Modélisation sur la base de RUSLE annuel moyen.

2.3. Exemple de changement de sens de travail et d'un fort apport de MO

L'apport de MO permet de refaire des ponts cationiques apportant une stabilité structurale au sol. Dans cette simulation sur un secteur situé juste au sud-est de René, sous une culture (lin), l'apport de MO permet d'abaisser d'une classe le faciès de fermeture, passant ainsi de F12 à F11. L'effet sur la perte en terre est sensible puisque l'on passe d'une perte en terre maximale de 0.0025t/25m² à une perte en terre maximale de 0.0015 t/25m². Par contre, situé en limite de bassin versant topographique, les flux n'ont guère le temps de concentrer la matière solide de par la surface drainée limitée (Figure 23).

Au niveau du vallon principal de la parcelle, les flux ne changent guère avec l'apport de MO, passant de 140 t à 122 t, soit un gain d'érosion de près de 13%. Par contre, la mise en place d'une haie au niveau d'un flux concentré au sud de la parcelle fait baisser drastiquement les flux (98% de gain sur les matières solides transférées théoriquement). Dans ce cas, le modèle surestime quand même l'effet de la haie, mais il est indéniable que si celle-ci est suffisamment serrée, le flux sera fortement contraint.

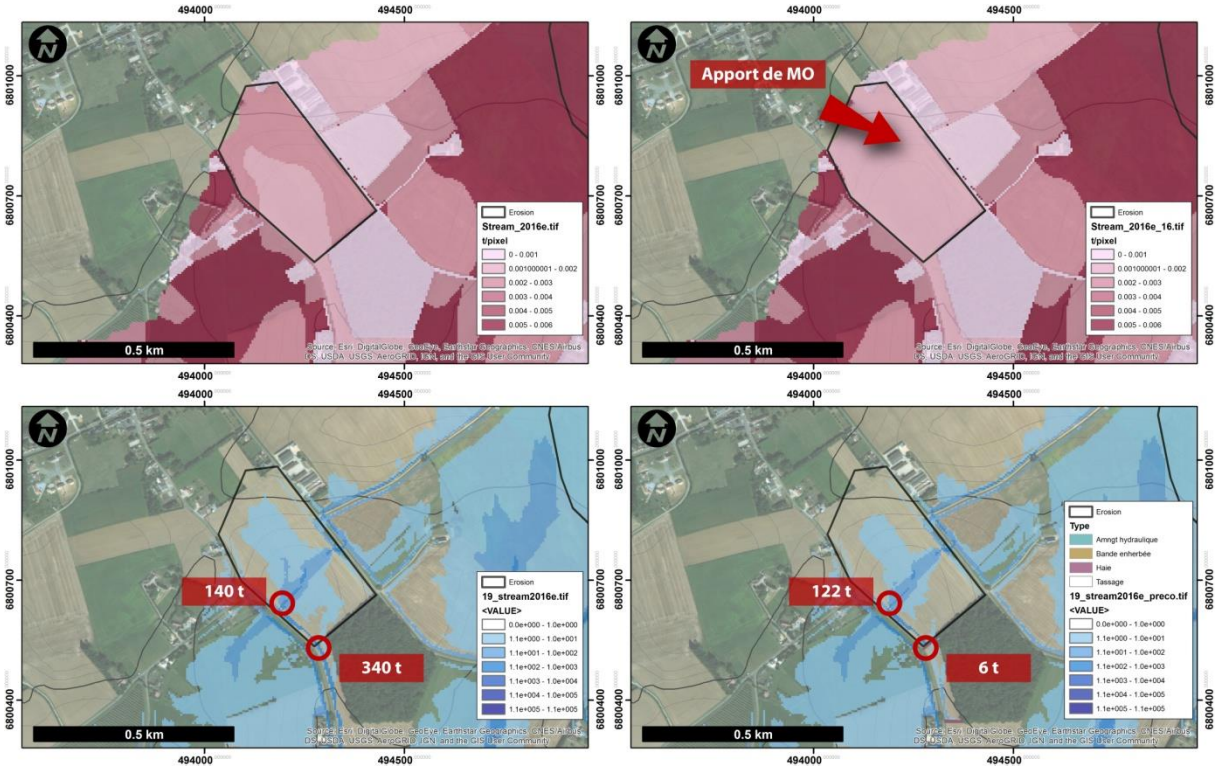

Figure 23. Exemple d'apport de MO sur les pertes en terre. En haut à gauche, situation actuelle modélisée avec STREAM pour l'été 2016. En bas à gauche, flux hydro-sédimentaires théoriques correspondants. En haut à droite, situation après apport de MO, modélisée avec STREAM pour l'été 2016. En bas à droite, flux hydro-sédimentaires théoriques correspondants.

Cet exemple montre que le changement d'une pratique culturale ne permet pas une modification majeure des volumes érodés, même si elle reste significative. C'est donc bien le cumul de changements qui les rend notables. Les aménagements, ici la haie, montrent eux, qu'à défaut d'empêcher l'érosion, ils stoppent efficacement les volumes érodés.

2.4. Exemple de réaménagement horizontal d'occupation d'un versant

Au nord de Nouans, dans le secteur des Vignes, un relief offre des pentes importantes dans un contexte pédologique qui favorise l'érosion. Les taux d'érosion obtenus avec le modèle RUSLE atteignent les 10 t/ha/an en moyenne. L'ensemble des préconisations vise à convertir la parcelle en prairie permanente et à créer une bande enherbée ou un fossé déversoir en bas de parcelle (Figure 24).

La mise en place d'une prairie permanente fait passer l'érosion théorique de 10 à 2 t/ha/an avec un gain de quasiment 50% sur les flux solides sortant de la parcelle. Couplé au fossé déversoir, la réduction du flux hydro-sédimentaire en sortie de système (au sud de la ferme du Fretay) atteint plus de 70%. Les travaux d'infrastructure ne sont pas très contraignants. Le changement de culture peut lui être accompagné pour éventuellement compenser les pertes de production directe.

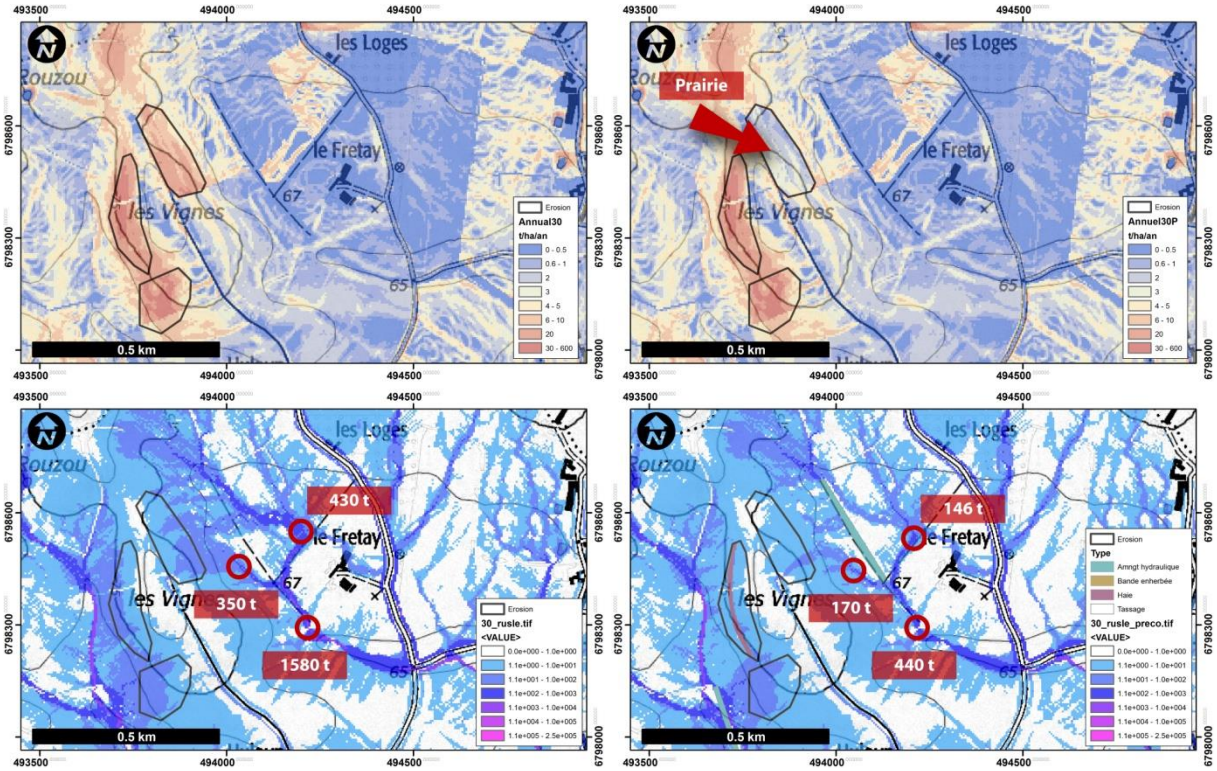

Figure 24. Secteur des Vignes. En haut à gauche, modélisation de l'érosion actuelle. En bas à gauche, modélisation de l'érosion après mise en prairie de la parcelle fléchée. En haut à droite, flux de matière théorique en situation actuelle. En bas à droite, flux modélisé après passage en prairie de la parcelle fléchée et mise en place d'un fossé déversoir. Modélisation avec RUSLE annuel et des valeurs moyennes de K et R, pour 2016.

3. CONCLUSIONS PARTIELLES

Nous avons présenté ici un ensemble de préconisations générales au bassin versant qui peuvent également être appliquées sur l'ensemble des parcelles agricoles du Bassin Versant de la Gandelée, même hors secteurs érosifs identifiés, toutes étant soumises naturellement à l'érosion qu'il est toujours préférable de limiter pour préserver la ressource sol de manière durable.

Ces préconisations sont de deux natures : principalement préventives pour celles qui touchent les pratiques agricoles en général et qui permettent de réduire l'érosion *in situ*, plutôt palliatives pour bon nombre d'aménagements qui vont se borner à diminuer les transferts vers les secteurs d'envasement sans agir directement sur l'érosion. La logique qui sous-tend les deux approches est donc différente, seule la prévention permettant une protection efficace du patrimoine sol. On l'a aussi vu, les aménagements ou les changements d'occupation du sol sont plus efficaces contre l'envasement que la modification des pratiques agricoles, mais les contraintes de l'un ou l'autre ne sont pas les mêmes et, selon les cas, peuvent être plus ou moins faciles à mettre en œuvre.

Sur les 43 secteurs les plus érosifs identifiés, la mise en place des préconisations doit être priorisée et reposera bien sûr sur leur acceptabilité par les exploitants. Sur la base des réponses aux enquêtes et de nos discussions avec les exploitants, le fichier des observations fourni au SMBOS indique non exhaustivement les secteurs où au moins un exploitant semble ouvert à des adaptations anti-érosives. L'intensité de l'érosion et la proximité des zones érosives avec les cours d'eau, et notamment avec les secteurs les plus envasés, guideront aussi logiquement l'ordre d'intervention final.

Un suivi des matières en suspension en quelques points clés sur une année culturale (les permutations d'occupation du sol ne modifiant les taux d'érosion que localement et non globalement) permettrait d'encore mieux cibler les portions prioritaires. L'étude historique des accumulations derrière les haies existantes ou l'installation de petits murets ponctuels dans certaines parcelles permettrait aussi une quantification plus précise des volumes érodés et de leur transfert. Quant aux zones érosives un peu plus éloignées des cours d'eau, une étude plus fine (rapide et pas forcément couteuse) de leur connectivité au cours d'eau peut être ponctuellement nécessaire : le secteur 13 en est un exemple. Le fossé en bord de D300 à son aval reçoit certainement la terre érodée ; s'il est connecté via un busage sous la route au fossé de la route en face qui rejoint directement la Gandelée, le transfert hydro-sédimentaire peut être bien plus rapide que supposé de prime abord malgré une distance de 700 m environ.

Au-delà du cadre de cette étude, **il est indéniable que l'érosion des versants ne justifie pas l'entièreté de l'envasement de la Gandelée**, si bien que d'autres préconisations peuvent être émises.

Le profil en travers de la Gandelée et de ses tributaires favorise les glissements de berges car il est trop raide. Accepter d'élargir le chenal d'écoulement de la Gandelée, avec son espace de liberté, permettre le reméandrage sur certaines portions surtout en aval du bassin versant, et la laisser retrouver son profil d'équilibre résoudrait une partie de ces problèmes. Cet aménagement requiert toutefois l'autorisation la Direction des territoires et implique des démarches longues et compliquées. Cela implique très probablement en contrepartie un abandon du drainage sur ces secteurs, dont les collecteurs seraient sans doute régulièrement ennoyés, ce qui est malheureusement antagoniste avec les demandes de curage qui visent justement au fonctionnement du réseau de drainage.

L'impact du ragondin est ponctuellement important, mais, à l'échelle du Bassin Versant, son rôle reste limité, sans être négligeable, quant à l'envasement de la Gandelée et ses tributaires. C'est une cause d'érosion reconnue par les exploitants et donc un levier d'action important facile à faire accepter. Par ailleurs, la poursuite de l'envasement suite à son éradication permettrait alors une prise de conscience et une meilleure acceptation des préconisations liées aux pratiques agricoles.

Enfin, l'impact du drainage n'est pas négligeable puisque les eaux de drainage sont chargées en argiles. L'impact est très dépendant du contexte et du réseau de drainage en lui-même selon les études disponibles et, sans équivalent proche, difficile à extrapoler avec précision au cas du Bassin Versant de la Gandelée. Une gamme moyenne raisonnable pourrait avoisiner 50 kg/ha/an pour le Bassin Versant., voire 100 kg/ha/an pour les secteurs les plus argileux. Comparer au tonnage érodé sur l'ensemble du Bassin Versant, cela fait peu, mais, contrairement aux matières érodées qui n'atteignent pas forcément les cours d'eau, ces eaux de drainage chargées sont, elles, généralement directement rejetées dans les cours et impactent donc celui-ci directement.

4. BIBLIOGRAPHIE

Agence de Développement Rural Europe et Territoires. 1987. Maîtrise du ruissellement et de l'érosion hydrique des sols dans les coteaux du Sud-Ouest. Rapport du Ministère de l'Environnement et du Ministère de l'Agriculture. 36 pp.

AREAS. 1986. Opération régionale de lutte contre les inondation et l'érosion des sols. Volet 1 : Ruissellement et érosion des terres agricoles. Synthèse des travaux et éléments de réflexion, campagne 1985-1986. 74 pp.

AREAS. 1994. Plan de Développement durable en Pays de Caux. Diagnostic de territoire. 23 pp.

AREAS. 2012. Expérimentations sur les pratiques culturales 2001-2010. Synthèse des résultats de ruissellement et d'érosion. Maîtrise du ruissellement et de l'érosion des sols en Haute-Normandie. 36 pp.

Armand R. 2009. Etude des états de surface et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol. Mise au point d'un indicateur de ruissellement. Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg. 208 pp.

Augeard B. 2006. Mécanismes de genèse du ruissellement sur sol agricole drainé sensible à la battance. Etudes expérimentales et modélisation. Thèse de doctorat de l'ENGREF. 236 pp.

Auzet AV. 1987. L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques. Centre d'études et recherches éco-géographiques, Ministère de l'Environnement et Ministère de l'Agriculture. 60 pp.

Auzet AV. 1990. L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects aménagements. Centre d'études et recherches éco-géographiques, Ministère de l'Environnement et Ministère de l'Agriculture. 39 pp.

Boiffin J. 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de docteur-Ingénieur de l'INA-PG. 320 pp.

Borrelli P, Robinson DA, Fleisher LR, Lugato E, Ballabio C, Alewell C, Meusbruger K, Modugno S, Schütt B, Ferro V, Bagarello V, OOST, Kristof Van, Montanarella L, Panagos P. 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications* [en ligne]. Décembre 2017. Vol. 8, n° 1. [Consulté le 16 novembre 2018]. DOI 10.1038/s41467-017-02142-7. Disponible à l'adresse : http://www.nature.com/articles/s41467-017-02142-7

Bussières M. 1996. L'érosion des sols cultivés en France : manifestation, coûts, remèdes. Mémoire de D.E.S.S. de l'Université de Picardie Jules Verne. 136 pp.

Cariolle M. 2002. Efficacité des bandes enherbées pour limiter le transfert par ruissellement de substances actives utilisées pour le désherbage de la betterave. Compte-rendu du 65th IIRB Congress, p 261-276

Centre d'Etudes et de Recherches sur l'Environnement et les Sols pour l'Aménagement. 1987. L'érosion des terres agricoles dans le Massif Armoricain. Risques à l'échelle régionale et maîtrise du ruissellement lors d'opérations d'aménagement. 33 pp.

Chambres d'Agriculture des Pays de la Loire. 2018. Ruissellement et érosion : tous concernés ! SOLAG n°2. 3 pp.

Chambre d'agriculture de région du Nord-Pas de Calais. 2013. Guide de l'érosion des sols. 31 pp.

Chartin C. 2011. Effet de l'évolution du parcellaire agricole sur la redistribution des sols et la morphologie des versants cultivés – Exemple du sud-ouest du Bassin Parisien. Thèse de doctorat de l'Université François Rabelais de Tours. 322 pp.

Citeau L. 2008. In : Gestion durable des sols, Editions Quae. 336 pp.

Collaud G, Ryser JP. 1991. Le chaulage. Revue suisse d'agriculture, p. 41-47

COMIFER. 2009. Le chaulage : des bases pour le raisonner. Editions Book émissaire.

Delabays N. 1988. Les haies et l'agriculture. Rapport n°12 du Programme national de recherche sol, 113pp.

Derancourt F. 1995. Erosion des terres agricoles, méthodologies proposées à l'étude de bassins versants agricoles. Rapport de la Chambre d'Agriculture du Pas-de-Calais.

Druais J. 2009. Caractérisation de l'érosion et du ruissellement des territoires aval de la Chalaronne. Propositions de mesures de gestion. Mémoire de Diplôme d'Ingénieur Agronome de Montpellier SupAgro. 73 pp.

Fiches techniques Nature et agriculture – réseau agro-écologique, AGRIDEA

Fiches techniques ADCF – Bande herbeuse

Fiches techniques érosion AREAS / CHAMBRE D'AGRICULTURE DE SEINE MARITIME

Fiches techniques EROSOL

Fressard M, Cossart E, Alami C, Brun G., Potot A, Lejot J, Boulet R, Christol A. 2017. Casser la connectivité hydrosédimentaire pour gérer la ressource en sol : cas du vignoble de Mercurey (Bourgogne). Géomorphologie : relief, processus, environnement, 23 (4) : 309-325

Gallien E, Le Bissonnais Y, Eimberck M, Benkhadra H, Ligneau L, Ouvry JF, Martin P. 1995. Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol cultivé. Cahier de l'Agriculture, 4 : 171-183

Gauvin D. 2000. Inventaire des zones sensibles à l'érosion des sols en vallée d'Authie dans une perspective d'application des mesures agri-environnementales. Mémoire de D.U.E.S.S. "Eau et Environnement", D.E.P., de l'Université de Picardie Jules Verne. 105 pp.

Gumiere SJ, Le Bissonnais Y, Raclot D, Cheviron B. 2011. Vegetated filter effects on sedimentological connectivity of agricultural catchments in erosion modelling: A review. Earth Surface Processes and Landforms, 36 : 3-19

INRA. 2009. L'érosion, un acteur majeur de la dégradation des sols et de l'environnement dans "Le sol", dossier : 128-131

ITCF, Agences de l'Eau. 1998. Etude de l'efficacité des dispositifs enherbés – Les Etudes de l'Agence de l'eau n°63

Jayet H. 1992. La maîtrise foncière dans les projets de lutte contre l'érosion. Mémoire de l'Université de Rouen. 40 pp.

Le Bissonnais Y, Benkhadra H, Gallien E, Eimberck M, Fox D, Martin P, Douyer C, Ligneau L, Ouvry JF. 1996. Genèse du ruissellement et de l'érosion diffuse sur sols limoneux. Analyse du transfert d'échelle du m2 au bassin versant élémentaire agricole. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 3 : 51-64

Le Bissonnais Y, Thorette J, Bardet C et Daroussin J. 2002. L'érosion hydrique des sols en France. Rapport IFEN et INRA. 106 pp.

Le Bissonnais Y, Lecomte V, Cerdan O. 2004. Grass strip effects on runoff and soil loss. Agronomie, 24 : 129-136

Lecomte V. 2006. Bandes enherbées – Mettez-les aux bons endroits ! Fertil info n° 124

Lelong F, Roose E, Darthout R, Trevisan D, Boudjemline D, Boureghda S, Raheliarisoa MA. 1993. Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion en nappe de divers types texturaux de sols cultivés ou non cultivés. Science du Sol, 31 (4) : 251-279

Ludwig B. 1992. L'érosion par ruissellement concentrée des terres cultivées du Nord du Bassin Parisien. Thèse de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg. 200 pp.

Mage R, Maier H. 1991. Erosion du sol en Suisse, Etude bibliographique et enquête, Cahier de l'environnement, 152

Maillard A. 1988. Les engrais verts en grandes cultures. Revue suisse d'agriculture : 161-163

Maillard A. et al. 1990. Les semis sous litière : étude d'une mesure culturale de lutte contre l'érosion du sol en grande culture. Programme national de recherche.

Mailet-Mézeray J. 2007. Bandes enherbées. Enjeux, implantation et entretien. Editions ARVALIS – Institut du Végétal. 40 pp.

Mosimann T. 1990. Lutte contre l'érosion des sols cultivés. Guide pour la conservation des sols. Rapport de synthèse du programme national de recherche « Utilisation du sol en Suisse ».

Nahal I. 1975 Principe de conservation des sols. Collection de géographie applicable. 143pp.

Naulin H. et al. 2003. Guide technique de la lutte contre l'érosion des sols, PNR des Caps et Maris d'Opale. 43 pp.

OFEV, 2007. Protection du sol en Suisse : concept directeur, Office fédéral de l'environnement.

Ouvry JF, Le Bissonnais Y, Martin P, Bricard O, Souchère V. 2010. Les couverts herbacés comme outils de réduction des pertes en terre par érosion hydrique (synthèse des connaissances et expérience de la Haute-Normandie). Fourrages, 202 : 103-110

Pidoux C. 2002. Lutte contre l'érosion. Lutte anti-érosive à l'échelon de l'exploitation agricole : mesures agronomiques, Prométerre

Thomas F. 2001. L'érosion des sols n'est pas une fatalité, Techniques culturales simplifiées, 111 : 8-16

Thomas F. et al. 2005. Techniques de conservation des sols. Sulky Burel SAS. 88 pp.

Walter C, Follain S, Michot D, Salvador S, Viaud V, Bakyono JF, Bourrennane H, Chartin C, Ciampalini R, Coulouma G, Couturier A, Daroussin J, Fouad Y, Macaire JJ, Hinschberger F, Le Bissonnais Y. 2014. Peut-on protéger les sols en raisonnant l'organisation des paysages ? Journées d'Etudes du Sol 2014, Le Bourget-du-Lac.