

Conséquences pour l'ingénierie de la maîtrise des impacts des aménagements hydro-agricoles

Les chapitres précédents ont successivement montré les questions soulevées à l'origine de ce travail, les ressources expérimentales utilisées, et les résultats tirés de ces expérimentations pour préciser les caractéristiques et le rôle de l'interaction entre le réseau de drainage enterré et l'émissaire à ciel ouvert lors du transfert des crues.

Il s'agit dans ce chapitre de proposer une formulation de ces résultats d'une manière plus opérationnelle, directement associée à l'activité d'ingénierie. Pour cela nous donnerons dans une première partie un support informatique des modèles développés dans le chapitre 3. La deuxième partie replacera ces résultats associés à un élément très ponctuel du transfert des crues, dans une méthodologie plus générale d'aménagement et de prévention des inondations. La troisième partie synthétisera ces réflexions à l'attention d'ingénieurs de terrain.

4.1 Un outil d'aide à la conception et à la description des incidences

Afin que le projeteur dispose d'éléments concrets pour l'application directe de l'analyse effectuée plus haut, le support informatique de la modélisation de l'interaction réseau enterré / réseau à ciel ouvert est présenté. Ce support est accompagné des formules associées au processus et des hypothèses nécessaires à son application. Une mise en situation des résultats de l'étude dans un cadre plus global d'aménagement de petit bassin versant, permet de réfléchir aux conditions de mise en relation du scénario d'aménagement et du processus décrits, avec la problématique du terrain, selon les données disponibles, les objectifs visés.

Le chapitre 3 qui précède présente la formulation mathématique et la modélisation des phénomènes liés à l'interaction entre un rejet de collecteur enterré et un fossé à ciel ouvert. Ces phénomènes ont une action sur le niveau de l'eau à l'amont du fossé, modifié par la présence du rejet, et le niveau de l'eau dans le collecteur.

Pour une grande partie des cas rencontrés dans la réalité, les quantités d'eau rejetées sont faibles au regard de la capacité d'évacuation de l'émissaire, ou bien encore le débit de cet émissaire est largement prépondérant. Toutefois, l'interaction peut avoir des conséquences importantes dans des situations particulières. Ces situations se rencontrent si le niveau de l'eau dans le fossé est artificiellement rehaussé par rapport à sa capacité d'évacuation naturelle (voir le scénario d'aménagement décrit en 1.2 page 24), ou si le rejet du collecteur représente une part

non négligeable du débit total à évacuer (comme c'est le cas des données de terrain utilisées dans ce travail -voir 2.1 page 64-).

L'aménageur dont le souci est de maîtriser les écoulements à l'aval d'un réseau de fossés, ou de prendre en compte les impacts d'un rejet de réseau de drains enterrés, doit donc pour ce faire disposer d'un outil permettant d'identifier si ces situations sont susceptibles de concerner son projet, et permettant également de quantifier les conséquences de son aménagement dans ce contexte.

Nous proposons à partir des expérimentations et modélisations effectuées dans le cadre de ce travail, deux éléments d'un premier outil, supportés par le tableur *Microsoft EXCEL®* (Microsoft, 1999), pouvant être mis en oeuvre simplement. L'organigramme linéaire de ces éléments permet une transcription aisée dans des modèles plus complexes d'hydraulique à surface libre, ou de réseaux enterrés.

Etant donnée la grande multiplicité des cas pouvant être rencontrés dans les projets concrets, nous avons limité les éléments proposés aux configurations ayant été confrontées aux données expérimentales au cours de cette étude.

L'objectif de cet outil, que nous désignerons dans la suite par JOCOFOX (pour JOnction Collecteur Fossé sur EXcel) est d'évaluer les hauteurs d'eau ou pressions à l'amont de la jonction entre collecteur enterré et fossé à ciel ouvert, dans le cas d'un collecteur débouchant en fond de fossé. Le cas où le collecteur débouche à une cote différente de celle du fond du fossé sera envisagé plus loin, et de manière plus simple (4.1.2).

On suppose ici connu le comportement hydraulique du fossé (écoulement uniforme, ou influence d'un ouvrage à l'aval...). Lorsque ce comportement hydraulique est régi par une loi de Manning-Strickler, le tirant d'eau normal pourrait être directement tiré d'une résolution de la relation correspondante pour le débit imposé. Cette résolution n'est pas incorporée ici.

On suppose également connu le débit devant être rejeté par le réseau de drains enterrés. Cette connaissance peut s'appuyer sur des données mesurées, ou sur un modèle spécifique de calcul de débits de réseaux de drains (par exemple SIDRA (Lesaffre, 1988 ; Zimmer, 1988)).

Les entrées de l'outil sont d'une part les paramètres nécessaires à la description de la géométrie du point de rejet et de l'émissaire, les caractéristiques hydrauliques de cet émissaire, et enfin les trois conditions limites : débits amont du fossé et du collecteur, hauteur d'eau à l'aval du fossé.

Les sorties de JOCOFOX sont d'une part le niveau de l'eau dans l'émissaire en amont de la jonction, et d'autre part la pression et le niveau de l'eau dans le collecteur, au voisinage du débouché dans le fossé.

La notion de voisinage doit ici être précisée : la modélisation de la jonction présentée au chapitre 3 repose sur une longueur donnée de conduite, suffisamment longue pour que dans sa partie amont la section droite ne soit plus perturbée par la jonction. Cette longueur introduit une influence, sur la ligne piézométrique, de la pente de la conduite, et du frottement contre ses parois. Nous avons supposé cette ligne piézométrique horizontale, d'après des résultats expérimentaux obtenus pour des conditions limites données (voir l'exemple de la figure 43 page 125). Ces conditions limites ne seront pas dans tous les cas assimilables à celles rencontrées en réalité. En outre, la mesure de la position réelle de la surface de l'eau en amont de la conduite est très difficile. Enfin, l'obtention des conditions limites dépendent de la manière dont l'air peut s'échapper à l'amont ou à l'aval de la conduite. Au besoin un calcul de ligne d'eau ou de ligne piézométrique peut se révéler nécessaire, à partir de la pression donnée au strict débouché du collecteur (dans l'axe de la conduite). De ce calcul peut découler également une prise en compte du nouveau tirant d'eau dans le bilan de quantité de mouvement.

Au passage à pleine section, la hauteur d'eau réelle et la pression ramenée à une hauteur de colonne d'eau deviennent différentes, ce qui implique l'existence de deux variables de sortie.

L'utilisation de l'outil JOCOFOX revient à l'extrapolation à des systèmes réels de grandeurs adimensionnelles étudiées sur le modèle réduit FoCol. Il doit donc encore faire l'objet de validations sur des aménagements en vraie grandeur. Dans ce but, son utilisation doit, autant que possible, s'accompagner de dispositifs de mesure des débits et des hauteurs d'eau sur les ouvrages effectivement réalisés.

La partie de JOCOFOX relative au cas où le collecteur débouche à la cote du fond du fossé, comporte une caractérisation de l'interaction (4 cas décrits plus loin) et une résolution d'équation de bilan de quantité de mouvement par minimisation d'un critère. Cette résolution est effectuée au moyen du module "Solveur" intégré au tableur, par la méthode de Newton. L'obtention immédiate de la solution avec de bons critères de précision (objectif de 10^{-6} pour le bilan) et de convergence (précision de 10^{-4} pour le ratio trouvé comme solution) pour tous les calculs effectués, a conduit à ne pas étudier plus avant la pertinence de la méthode et des paramètres du solveur.

Les appels au solveur s'effectuent au moyen d'un petit nombre de lignes de code Visual Basic intégré aux feuilles de calcul. Ce code contient les paramètres du solveur.

La partie de JOCOFOX relative au cas où le collecteur débouche à une cote différente de celle du fond du fossé, ne tient pas compte d'une modification de la cote de la surface de l'eau du fait de la jonction. Elle ne permet sous la forme proposée que la traduction en courbe de rejet (relation hauteur relative / débit adimensionnel) des caractéristiques géométriques de la jonction, et de l'application au fossé d'une loi simple de Manning-Strickler.

L'association des deux parties de l'outil est possible, mais n'a pas fait l'objet ici de validations expérimentales. Elle ne sera donc pas présentée.

4.1.1 Cas d'un collecteur débouchant à la cote du fond de fossé

Le tableau suivant récapitule les cas traités par la partie de l'outil JOCOFOX relative au cas où le collecteur débouche à la cote du fond du fossé, et rappelle les différentes hypothèses attachées à ces cas. Ces hypothèses sont susceptibles dans certains cas de nécessiter une étude complémentaire afin de mieux relier le modèle à la réalité.

Cas	Caractéristiques de l'interaction	Hypothèses	Validité
Déversement à surface libre	Collecteur non influencé	(97) $p_0 / \rho g d = 0,8 q^{*0,46}$ au débouché du collecteur	Pente du collecteur faible $q^* < 0,5$ Horizontalité de la ligne d'eau du collecteur invalide, avec ligne d'eau ou ligne piézométrique à calculer à partir du débouché
Surface libre	Collecteur influencé, les deux écoulements amont sont à surface libre	(98) $0,8 q^{*0,46} < p_0 / \rho g d < 0,9$ au débouché du collecteur (99) $q^* < q_p^*$ ou (100) $\frac{(q^* - q_p^*)^2}{(0,5 - q_p^*)^2} + \frac{(p_0 / \rho g d - 0,6)^2}{(0,9 - 0,6)^2} < 1$ (101) $\delta = -3,35 \bar{Q} + 85$ (en °)	Horizontalité de la ligne d'eau du collecteur d'autant moins valide que le tirant d'eau est faible, ou que le coefficient de Manning-Strickler de la conduite est bas (ligne d'eau ou ligne piézométrique à calculer à partir du débouché) $q^* > 0,09$ $\bar{Q} > 2$ $0 < Q^* < 2,12$ (voir page 160)
Collecteur en charge faibles débits	Passage à pleine section par l'aval du collecteur	(102) $q^* < q_p^*$ (voir page 179) (103) $p_0 / \rho g d > 0,9$ au débouché du collecteur Collecteur sans entrée d'air dans sa partie aval (104) $\delta = -3,35 \bar{Q} + 85$ (en °)	$q_p^* < 0,5$ $q^* > 0,09$ $\bar{Q} > 2$ $0 < Q^* < 2,12$ (voir page 160)
Collecteur en charge forts débits	L'amont du collecteur est à pleine section	(105) $q^* > q_p^*$ et (106) $\frac{(q^* - q_p^*)^2}{(0,5 - q_p^*)^2} + \frac{(p_0 / \rho g d - 0,6)^2}{(0,9 - 0,6)^2} > 1$ au débouché du collecteur Collecteur sans entrée d'air dans sa partie aval (107) $\delta = -3,35 \bar{Q} + 85$ (en °)	$q_p^* < 0,5$ $q^* > 0,09$ $\bar{Q} > 2$ $0 < Q^* < 2,12$ (voir page 160) Extension vers l'amont de l'influence de la jonction sur le tirant d'eau de transition inconnue

Tableau 15 : tableau des cas traités par la partie de l'outil de modélisation de l'interaction JOCOFOX relative au cas où le collecteur débouche à la cote du fond du fossé

Les paragraphes qui suivent vont préciser les origines des hypothèses figurant dans ce tableaux. Elles sont tirées des observations présentées dans le tableau 9 page 154, sur la figure

57 page 156, pour ce qui concerne l'angle de déviation, et sur les figures 72 page 176, 75 page 181 pour la transition surface libre / pleine section.

Dans le cas du déversement à surface libre (correspondant à la courbe de type A sur la figure 23 page 83), la relation entre débit adimensionnel et pression relative est une approximation ($R^2=0,9999$) par une loi puissance de la courbe observée présentant les pressions relatives les plus basses pour un débit donné (courbe rouge sur la figure 62 page 165, avant le décrochement lié au passage de la conduite à pleine section).

Pour le rejet à gueule bée, Blaisdell et al. (1963) ont donné l'équation suivante :

$$(108) \quad p_0 / \rho g d = 0,78 q^{*0,51}$$

qui est une approximation de la courbe bleue de cette même figure, tirée des données de Smith (1962). Les deux formules, bien que de même nature, diffèrent sensiblement par leur exposant. Le rôle joué par le fond du fossé, qui peut varier en fonction de sa rugosité et de sa géométrie, n'est pas négligeable ici. L'équation (97) peut être considérée comme une approximation expérimentale, (108) restant une limite inférieure pour les lois qui seraient applicables réellement sur le terrain. Le tracé sur la figure 62 du tirant d'eau critique dans la conduite (pointillés magenta), montre que celui-ci reste encore supérieur à la pression relative observée.

Les mesures de terrain se révèlent cohérentes avec l'application de l'équation (97), comme le montrent les données relevées en "PZ1". Le chapitre 3 a montré que l'expérimentation en laboratoire en est un bon reflet (figure 45 page 139, figure 71 page 174 ou figure 76 page 181).

Au delà de $q^* = 0,5$, le déversement non influencé s'effectue à pleine section. Les apports de l'outil JOCOFOX sont alors d'un intérêt limité.

L'angle δ de déviation n'est pas utilisé dans le cas du déversement à surface libre. Dans les autres cas, la validité du bilan de quantité de mouvement a été établie pour $\bar{\bar{Q}} > 2$. Alors, le calcul de δ , donné par (101), (104) et (107), est tiré de la relation portée sur la figure 57 page 156. Si $\bar{\bar{Q}} < 2$, le modèle de bilan de quantité de mouvement n'est plus valide, mais δ est fixé à 90° pour un calcul éventuel en déversement.

Le cas de la surface libre est une application du modèle de bilan de quantité de mouvement présenté en 3.3, dans lequel l'estimation de δ est effectuée, à ce stade de proposition de l'outil, suivant la règle évoquée dans le paragraphe précédent. Ce bilan de quantité de mouvement suppose en outre la surface de l'eau horizontale dans les branches amont.

Les frontières qui délimitent le cas à surface libre sont au nombre de 2, selon que le débit est supérieur ou inférieur au débit à remplissage complet.

Si le débit est inférieur au débit à remplissage complet (q_p , donné par (88)), le passage à pleine section se produit lorsque la hauteur de colonne d'eau est légèrement inférieure au diamètre de la conduite. Les données expérimentales ne permettent pas de fixer avec précision la valeur exacte de la hauteur de séparation, elle apparaît proche de 0,9 en valeur relative. Nous avons retenu cette valeur bien que la limite de 0,96 soit donnée dans la littérature comme hauteur relative de transition (Chow, 1959 ; Chocat, 1978).

Si le débit est supérieur au débit à remplissage complet, l'expérimentation FoCol a montré l'existence d'une plage de transition, qui s'étend des conditions de transition depuis un rejet à gueule bée, au point de coordonnées (q_p^* , 0,9). Cette plage présente une certaine largeur pour les débits les plus élevés, c'est à dire que la transition n'est pas instantanée à la variation du débit. Nous l'avons cependant simplifiée en la restreignant à sa limite basse en débit. Pour traduire la diminution progressive observée pour le débit de transition, nous avons donné à la frontière une forme elliptique, séparant deux zones définies par les inéquations (100) et (106).

Le cas du collecteur en charge, pour les faibles débits, traduit un remplissage de la conduite par l'aval (aussi dénommé "cavité amont" dans le chapitre 3), sous l'influence du niveau de l'eau dans le fossé. Le débit doit être inférieur au débit à remplissage complet. La limite de ce cas est une hauteur d'eau relative de 0,9.

A partir de ce passage à pleine section, la hauteur d'eau réelle devient le diamètre de la conduite, pendant que la pression relative respecte l'équation du bilan de quantité de mouvement. ce bilan devrait normalement être réévalué en fonction du niveau réel de l'eau et du profil réel des pressions. Nous avons constaté dans la partie 3.3 que l'erreur commise par le modèle au passage à pleine section n'était pas affectée par la modification d'état. En l'absence d'une validation plus complète, la proposition d'outil à ce stade ne prend pas en compte la modification d'état dans l'évaluation du bilan de quantité de mouvement.

Le tirant d'eau effectif à l'amont ne peut être établi de manière valide, car sa mesure expérimentale est difficile, et il dépend des conditions d'évacuation de l'air vers l'amont ou l'aval de la conduite. Sa valeur relative obtenue en supposant la surface de l'eau horizontale est ici comparée à 0,9, et portée à 1 en cas de valeur supérieure.

Le cas du collecteur en charge, pour les forts débits, traduit un remplissage de la conduite par l'amont (aussi dénommé "cavité aval" dans le chapitre 3), et donc un passage à pleine section imposé par le réseau enterré. Le débit doit être supérieur au débit à remplissage complet. La

limite de ce cas est une hauteur d'eau relative intermédiaire entre 0,9, cas des faibles débits, et 0,6, cas du déversement. Cette hauteur d'eau relative est reliée au débit par (106).

L'expérimentation réalisée dans le cadre de ce travail ne permet pas de définir complètement une relation d'état à partir du point de jonction, car le passage à pleine section dépend fortement des caractéristiques du réseau enterré, notamment les points susceptibles d'empêcher le remplissage de la conduite (entrées d'air, aspérités de la surface interne).

En outre, l'écoulement dans le collecteur est manifestement influencé par l'écoulement dans le canal, même si le passage à pleine section est imposé depuis l'amont. La faible longueur de la conduite de l'expérimentation FoCol ne permet pas d'estimer jusqu'à quelle distance vers l'amont cette influence est susceptible d'intervenir. Or de cette distance dépend une éventuelle prise en compte du tirant d'eau de transition dans un modèle de réseau enterré, tirant d'eau considéré *a priori* comme fixe (Motiee, 1996).

A ce stade, et compte tenu de cette insuffisance de l'étude du comportement du collecteur en remontant vers l'amont, la sortie de JOCOFOX sera un tirant d'eau relatif uniformément égal à 1 dans la conduite au voisinage de la jonction.

L'annexe 9 donne les expressions des différentes cellules composant l'outil dans ce cas du rejet à la cote du fond du fossé, en supposant que le comportement hydraulique du fossé est connu par ailleurs (tirant d'eau aval intégré comme une donnée d'entrée). Certaines cellules comportent des calculs intermédiaires rendus nécessaires par la longueur des expressions. Elles sont essentiellement la traduction de l'équation (67), détaillée dans l'annexe 5.

Le cas du déversement est traité en imposant, une fois fait le bilan de quantité de mouvement où l'on suppose $\delta = 90^\circ$, à la pression relative au débouché du collecteur la valeur limite inférieure donnée par (97) pour un débit donné. Dans ce cas l'hypothèse d'horizontalité de la surface libre dans les deux branches amont ne correspond plus à la réalité. Le calcul du bilan de quantité de mouvement est modifié, et effectué à part.

L'équation de ce nouveau bilan est :

$$(109) \quad \frac{(Q+q)^2}{LY_v} - \frac{Q^2}{LY_m} = gL \left(\frac{Y_m^2}{2} - \frac{Y_v^2}{2} \right)$$

La solution de cette équation à retenir est celle la plus proche du tirant d'eau aval. Son expression est (voir annexe 8) :

$$(110) \quad Y_m = \frac{2(gL^2Y_v^3 + 2q^2 + 2Q^2 + 4qQ) \sin\left(\frac{1}{6}(\pi + 2 \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{-g^3L^6Y_v^3 - (gL^2Y_v^3 + 2(q+Q)^2)^3}}{3\sqrt{3}g^2L^4Q^2Y_v^3}\right))\right)}{\sqrt{3gL^2Y_v(gL^2Y_v^3 + 2(q+Q)^2)}}$$

Le choix du résultat à prendre en compte est effectué en fonction de la valeur d'un rapport de comparaison du tirant d'eau à sa limite inférieure déduite de (97). Si le ratio est strictement supérieur à 1, le résultat donné par la résolution de l'équation du bilan de quantité de mouvement est retenu. Si le ratio est inférieur ou égal à 1, c'est le résultat donné par (110) qui est retenu.

Les cellules peuvent être classées en quatre catégories : les données d'entrée, les cellules de calculs intermédiaires, les résultats, mais aussi des données réelles de comparaison. En effet, pour permettre l'exploitation de données de terrain, des cellules permettant l'entrée d'un tirant d'eau amont mesuré dans le fossé et sa comparaison à des résultats du modèle, ont été ajoutées en fin de liste. D'autre part, les résultats donnés ne se réduisent pas aux simples tirants d'eau ou pression en amont de la jonction, ils fournissent diverses grandeurs hydrodynamiques, dont notamment le coefficient de perte de charge.

Le détail du contenu et des expressions de chaque cellule figure en annexe 9, ainsi que la procédure Visual Basic déclenchant la résolution.

Cette première partie d'outil permet donc de calculer, pour une géométrie comparable à celle de l'expérimentation "FoCol", le niveau de l'eau dans l'émissaire en amont de la jonction, et d'autre part la pression et le niveau de l'eau dans le collecteur, au voisinage du débouché dans le fossé. S'agissant du niveau de l'eau plus vers l'amont dans le collecteur, l'outil propose des valeurs. Ces dernières demandent une validation complémentaire, et dépendent en tout état de cause de la façon dont les conditions limites ont été établies. Les valeurs données correspondent aux conditions expérimentales sans ouverture de l'orifice, c'est à dire à un collecteur sans apport d'air par l'amont.

A titre d'exemple nous avons recalculé les simulations de la figure 59 page 158, avec l'outil proposé, incluant donc ici essentiellement un calcul différent de l'angle δ et la prise en compte du déversement (ici sur deux séries de conditions limites).

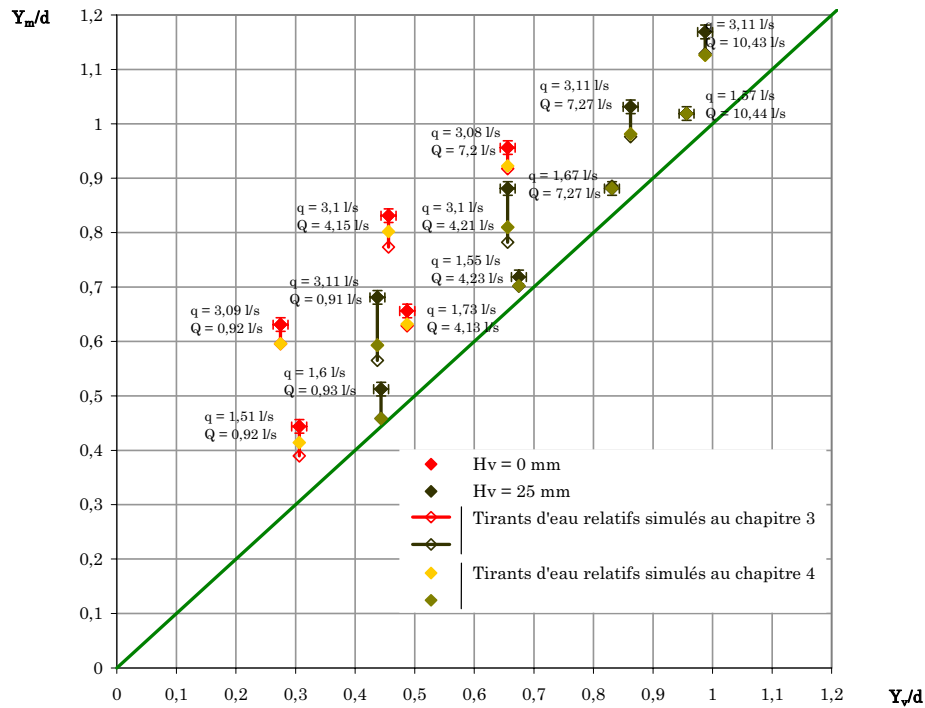


Figure 84 : représentation graphique de la comparaison des tirants d'eau relatifs mesurés et simulés à l'amont de la jonction, en écart relatif, pour différentes combinaisons de conditions limites. Les simulations sont d'une part tirées du chapitre 3 (voir tableau 10 page 157) et d'autre part l'application de JOCOFOX

On peut observer sur cette figure un maintien ou une légère amélioration de la simulation dans l'ensemble des cas, avec une amélioration non négligeable dans les deux cas de déversement ($q = 3,11 \text{ l/s}$, $Q = 0,91 \text{ l/s}$, et $q = 1,51 \text{ l/s}$, $Q = 0,92 \text{ l/s}$).

Le cas d'un collecteur débouchant à une cote différente de celle du fond du fossé a été étudié beaucoup plus simplement, car la partie 3.2 qui en traite n'inclut pas de prise en compte du bilan de quantité de mouvement, et suppose la surface de l'eau non affectée par la jonction.

4.1.2 Cas d'un collecteur débouchant à une cote différente de celle du fond de fossé

La partie de l'outil JOCOFOX relative au cas où le collecteur débouche à une cote différente de celle du fond du fossé ne reprend pas le bilan de quantité de mouvement intégré à l'autre partie.

Nous supposons ici la surface de l'eau non affectée par la jonction, donc à une altitude unique. Seul le cas du déversement à surface libre fait exception à cette hypothèse, car on sait que le collecteur n'est alors plus influencé.

Les cellules de cette partie d'outil ont été reprises sur celles de la partie précédente, mais en ne renseignant que celles apportant des résultats compatibles avec les hypothèses simplificatrices. Ces cellules sont décrites dans le deuxième tableau de l'annexe 9.

Afin de vérifier la cohérence de la prise en compte du cas de déversement non influencé, nous avons appliqué à nouveau le modèle JOCOFOX en supposant l'écoulement dans le fossé régi par une loi de Manning-Strickler (voir 3.2.2, dont les principaux paramètres et hypothèses ont été repris). Les données d'entrée du modèle respectent les hypothèses formulées antérieurement.

La comparaison entre les données de terrain et les résultats de la simulation a porté sur trois épisodes de crue survenus à des états différents de la morphologie du fossé. La figure 85 montre les trois courbes de rejet à comparer. On y constate une très bonne adéquation de la courbe de déversement non influencé, calée à partir des expérimentations en laboratoire. On y constate également la bonne concordance des deux débuts d'influence, pour la crue du 18 mars 2002. La crue du 20 décembre 2002 n'a pas pu faire apparaître d'influence, ni de passage à pleine section.

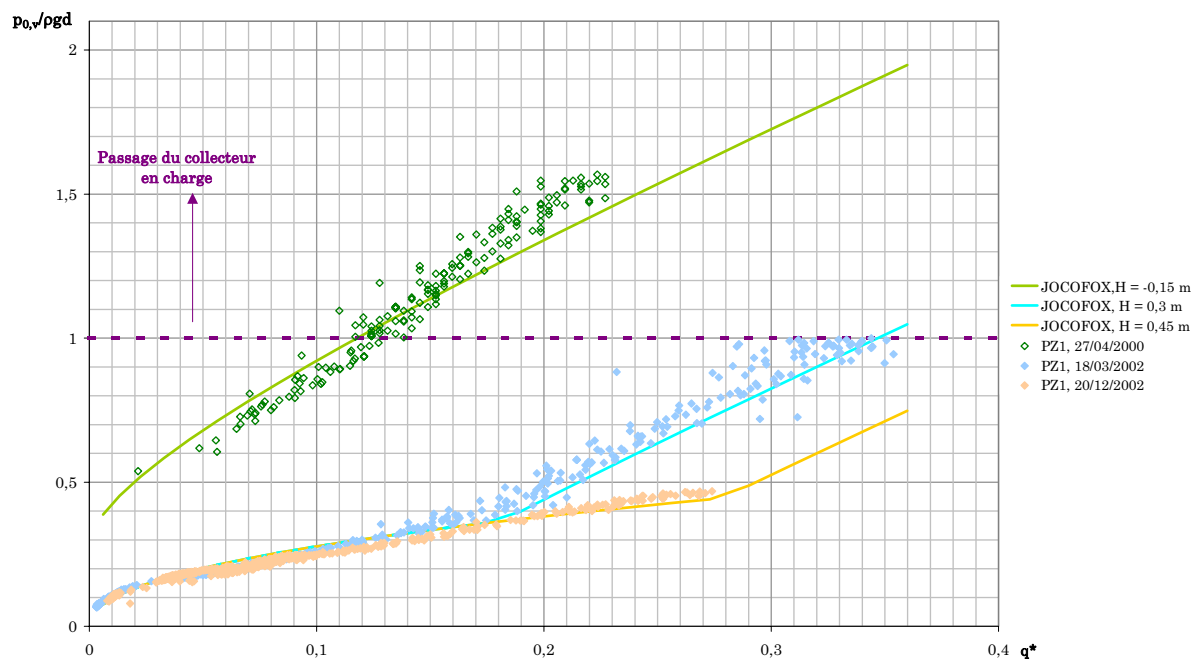


Figure 85 : Pression d'eau relative au débouché du collecteur, en fonction du débit adimensionnel, pour la simulation avec l'outil JOCOFOX de deux pics de crue en "PZ1" (tête de bassin), crues du 27/04/2000, du 18/03/2002, et du 20/12/2002

Les critères de passage à pleine section font que le modèle simule ce passage pour un débit adimensionnel de 0,32, inférieur au débit à remplissage complet. Calculé avec nos hypothèses, ce dernier vaut 0,344 (voir (90) page 181) mais il apparaît cependant très proche de la transition modélisée.

Compte tenu de l'absence d'observation de ce fait sur le lieu de l'expérimentation, ni d'éléments précis permettant de fixer exactement le débit à remplissage complet, nous ne pourrions exploiter cette donnée, hormis le constat qu'une plus grande dispersion des points expérimentaux à partir du débit de 0,28, laisser supposer le démarrage d'une phase de transition vers ce passage à pleine section, donc perceptible dès l'aval. La crue du 20 décembre 2002, pour laquelle le niveau du fossé était maintenu très bas, n'a pas atteint le débit à remplissage complet, et ne permet donc pas de caractériser le comportement du rejet non influencé au delà.

Les deux parties de l'outil JOCOFOX proposé sont donc, compte tenu des résultats expérimentaux disponibles pour en assurer la validation, de nature à permettre une première appréciation des conséquences hydrauliques possibles de l'interaction entre un collecteur enterré de dimensions importantes et son émissaire. Une réserve subsiste sur une possible intervention de la dynamique du collecteur enterré si le passage à pleine section se produit au voisinage du débit à remplissage complet.

4.2 Replacer l'étude de l'interaction rejet-émissaire dans une démarche d'aménagement

Les connaissances sur un processus donné, surtout s'il s'agit d'un fonctionnement d'interface entre deux composants bien distincts d'un ensemble hydrologique complexe, doivent être replacées dans l'imbrication des échelles d'étude (système local, parcelle, bassin versant) et des visions de l'aménagement (objectifs opérationnels, contraintes de sécurité, d'environnement, aléas hydrologiques). Pour cela, il est présenté une approche méthodologique de la démarche d'aménagement pour la maîtrise des crues, lorsque l'interaction entre collecteurs enterrés et émissaires à ciel ouvert est susceptible de jouer un rôle. Ce rôle peut être joué au titre de contrainte, mais aussi comme un élément actif de l'aménagement.

L'étude locale de l'interaction entre les réseaux de drainage par tuyaux enterrés et le fossé à ciel ouvert, a été introduite car elle découlait assez naturellement de la réflexion autour d'un scénario d'aménagement d'un petit bassin versant pour en atténuer les crues. D'une manière plus générale, il est important pour un aménageur de conserver à l'esprit le cadre global de son intervention, sans restreindre son approche à un problème trop ponctuel. Aussi nous proposons dans cette partie de replacer les résultats qui précèdent, tant du point de vue du ralentissement des écoulements par des obstacles dans le fossé, que de celui du fonctionnement du point de rejet d'eaux de drainage, dans une démarche de maîtrise des écoulements en milieu rural.

Le cadre de cette démarche s'appuie sur le canevas chronologique suivant, tiré du support méthodologique "OMER"¹ (Nédélec *et al.*, 2000) :

1/ Questions et éléments préalables

- Besoin à l'origine de l'aménagement
- Objectifs
- Solutions possibles
- Mesures/informations disponibles
- Contexte physique
- Contexte socio-économique
- Evolutions prévisibles

2/ Réflexions intermédiaires

- Principe(s) régisseur(s) de l'étude
- Étendue et densité des actions
- Portée/efficacité de l'aménagement

¹ pour "Ouvrages de Maîtrise des Écoulements en milieu Rural"

3/ Études et actions

- Dimensionnement
- Contenu du document de projet
- Suivi et évaluation

Nous allons développer ces points lorsqu'ils nous paraissent en lien avec les exposés des chapitres précédents, et revenir ainsi sur le scénario d'aménagement décrit en 1.2. Nous avons choisi dans cette partie de discuter d'éléments de méthode plus que de moyens techniques.

Il faut avant tout se remémorer la motivation à l'origine de ce scénario : le ralentissement des crues par un aménagement dans lequel des obstacles à l'écoulement sont répartis sur le cours de fossés d'assainissement agricole alimenté par des rejets de drainage. On souhaite également que cet aménagement maintienne la continuité hydraulique du lit de ces fossés.

4.2.1 Questions et éléments préalables

Les questions et éléments préalables constituent la première étape de réflexion visant à regrouper les informations nécessaires avant de s'engager dans un projet d'aménagement ou dans l'étude d'une situation existante (les problèmes à résoudre et les problèmes à prévoir, les contextes physique et socio-économique, les solutions envisageables, etc.). Il s'agit en particulier, et avant toute action, de préciser le besoin à l'origine de l'aménagement et d'identifier clairement ses objectifs.

Nous préciserons également les points relatifs aux solutions possibles et aux informations disponibles, importants pour la justification et l'élaboration de l'aménagement car d'autres types d'aménagements pourraient être choisis.

4.2.1.a Besoin à l'origine de l'aménagement

Les besoins à l'origine d'un aménagement ont été classés en trois grandes catégories : (1) le souhait d'une action curative suite à l'apparition d'un problème réel, (2) des exigences réglementaires, et enfin (3) l'engagement d'une action de modification du bassin versant, notamment dans un but de prévention des nuisances.

Les résultats présentés ici touchant directement aux quantités d'eau circulant en période de crue, et plus particulièrement pendant le fonctionnement du drainage enterré, ils peuvent répondre à chacun de ces besoins, notamment si les problèmes rencontrés sont des inondations à l'origine de dégâts importants. En revanche, ils concerneront moins directement des problèmes survenant en été, ou causés par des eaux qui ne sont pas majoritairement issus de réseaux de drainage par tuyaux enterrés.

La réponse à des exigences réglementaires peut correspondre à une procédure d'autorisation de drainage de parcelles agricoles, à la mise en œuvre de textes visant à réduire les

impacts d'activités humaines, ou à prévenir du risque d'inondations (pour voir le détail des textes à jour, consulter par exemple le Code Permanent de l'Environnement et des Nuisances, aux Editions Législatives).

Les actions de modification de bassin versant sont susceptibles d'intervenir à l'initiative de syndicats d'aménagement de rivière ou de bassin versant, de syndicats ou d'associations d'exploitants agricoles ou de propriétaires fonciers intervenant à l'échelle d'un aménagement hydro-agricole. Des collectivités en charge d'une ressource en eau destinée à la consommation humaine peuvent également envisager des mesures de protection de cette ressource sur son bassin d'alimentation. Dans tous ces cas c'est la présence d'un drainage intensif des parcelles agricoles qui pourra justifier l'application des résultats de ce travail.

4.2.1.b Objectifs

Une définition précise et explicite des objectifs de l'aménagement est indispensable à sa bonne conception, son acceptabilité, et au suivi de ses performances. Pas assez clairement exprimés, mal hiérarchisés, ou mal quantifiés, ces objectifs peuvent conduire à une action jugée inefficace, voire pénalisante ou dangereuse. C'est pour cette raison que nous passons en revue une liste aussi complète que possible d'objectifs concevables.

Dans le tableau ci-après nous avons indiqué, en le justifiant, la pertinence des éléments étudiés dans ce travail vis-à-vis de l'ensemble des objectifs envisageables pour une maîtrise générale des écoulements, en quantité et en qualité. Cet ensemble, non exhaustif mais adapté à un grand nombre de situations, a été défini dans le projet "OMER" (Nédélec *et al.*, 2000).

Nous avons considéré comme pertinents les objectifs propres aux ouvrages hydro-agricoles en interaction : le réseau de drains et de collecteurs enterrés d'un côté, le réseau de fossés de l'autre.

Objectif	Pertinence et indicateurs de niveau
Protection contre les inondations	Objectif pertinent au voisinage des zones de débordement du réseau d'assainissement agricole, où le risque d'inondation est effectif ; l'indicateur de niveau pour ce type de risque est classiquement une période de retour associée à une tolérance liée au type de zone à protéger (parcelle agricole, voirie, habitation...) (Gilard, 1998).
Laminage de crues	Objectif pertinent en tout point du réseau d'assainissement agricole, et à l'aval du petit bassin versant aménagé ; l'indicateur de niveau est un taux d'atténuation des crues, en fonction de leur durée et de leur période de retour.
Protection contre l'érosion des berges ou du lit	Objectif pertinent au voisinage des points de déversement des rejets d'eaux de drainage (Rice et Kadavy, 1994a), ainsi qu'au voisinage d'obstacles placés dans le lit de l'émissaire. L'objectif peut se révéler pertinent en d'autres points du fossé si des sédiments issus de l'érosion de certains tronçons du lit viennent le combler en amont des obstacles. L'indicateur de niveau est une vitesse d'écoulement en tout point compatible avec la tolérance des matériaux présents dans le lit.

Chapitre 4

Objectif	Pertinence et indicateurs de niveau
Protection contre l'érosion des sols	Objectif lié indirectement au type d'aménagement étudié, les écoulements étant souterrains (drainage) ou canalisés (fossé). Un écoulement superficiel en cas de crue intense, excédant les capacités d'évacuation du réseau de drainage, modifiées par l'aménagement, serait susceptible d'induire une prise en compte de ce type d'érosion.
Maintien d'un niveau d'étiage	Objectif sans rapport direct avec le type d'aménagement étudié, l'écoulement concerné se limitant à la période hivernale. Toutefois, le maintien de la continuité hydraulique du lit prévient d'une rétention inopinée et d'une stagnation nuisible des faibles écoulements d'étiage.
Réduction des écoulements en surface	Comme pour la protection contre l'érosion des sols, cet objectif est lié indirectement au type d'aménagement étudié, les écoulements étant souterrains (drainage) ou canalisés (fossé). Un écoulement superficiel en cas de crue intense, excédant les capacités d'évacuation du réseau de drainage, modifiées par l'aménagement, serait susceptible d'induire une prise en compte de ce type d'érosion.
Collecte et évacuation des eaux	Cet objectif est par nature celui du réseau de collecteurs enterrés et du réseau de fossés d'assainissement. Il est donc nécessairement lié à l'aménagement étudié ; l'indicateur de niveau est classiquement un débit de projet pour lequel les ouvrages d'évacuation doivent présenter une pleine capacité d'écoulement (Cemagref, 1993a).
Concentration d'un écoulement	Cet objectif est celui du réseau de drains à proprement parler. Il peut à ce titre être en opposition avec ceux qui nous intéressent au titre de l'atténuation des crues ; l'indicateur de niveau est classiquement une durée de rabattement de nappe perchée temporaire, entre deux niveaux fixés (Cemagref, 1993a).
Diffusion d'un écoulement	Cet objectif est sans rapport avec l'aménagement étudié, les écoulements restant concentrés au cours de leur cheminement.
Amélioration de la qualité de l'eau (Nitrate et polluants solubles)	Cet objectif est peu pertinent. L'échelle de temps des processus étudiés ici est telle (quelques heures) que la seule interaction entre l'eau, le sol et le substrat, et les polluants dissous, se réduit au transport de ces derniers par advection. Une amélioration de la qualité de l'eau est donc difficilement envisageable (Arlot, 1999 ; Kao <i>et al.</i> , 2002).
Amélioration de la qualité de l'eau (Phosphore)	Cet objectif peu pertinent, pour les mêmes raisons que ci-dessus.
Amélioration de la qualité de l'eau (phytosanitaires, polluants peu solubles)	Cet objectif peu pertinent, pour les mêmes raisons que ci-dessus.
Réduction des matières en suspension	Cet objectif est peu pertinent, la dynamique des écoulements ne permettant pas une décantation sensible des particules en suspension. Il faut toutefois rester attentif au risque de dépôt local dans les zones de ralentissement de l'écoulement.
Restauration de milieu naturel, amélioration paysagère	Objectif peu en rapport avec l'aménagement étudié, sauf à modifier la nature des obstacles à l'écoulement : réimplantation de méandres, plantation de végétation jouant le rôle de frein (Van Zeijts, 1998).
Stockage (pour une utilisation spécifique)	Objectif sans rapport avec l'aménagement étudié, le stockage créé par l'aménagement devant par nature être temporaire.

Tableau 16 : pertinence des objectifs pour le type d'actions et le processus hydraulique étudiés dans ce travail

Pour résumer ce passage en revue des objectifs envisageables, ceux que nous mettrons principalement en avant sont d'un côté les objectifs de concentration, de collecte et d'évacuation des eaux initialement retenus pour les réseaux de drainage et d'assainissement, et d'un autre côté, en balance, le laminage de crues à l'échelle du bassin versant, et plus localement la protection contre les inondations, et la protection contre l'érosion du lit et des berges de l'émissaire.

4.2.1.c Solutions possibles

Le scénario d'aménagement décrit en 1.2 est une solution parmi d'autres pour atténuer l'intensité des crues hivernales à l'aval du bassin versant. Cette solution est caractérisée par une intervention sur le réseau de fossés à ciel ouvert. Nous indiquons ci-après 6 exemples d'autres solutions possibles. Notre scénario est en lui même l'alternative à (1) un stockage des eaux de drainage, stockage temporaire également, mais dans une retenue construite en un point unique du réseau à ciel ouvert.

Dans les faits d'autres solutions tournées vers la protection contre l'inondation à l'aval du bassin versant peuvent être envisagées : (2) endiguement ou (3) dérivation au voisinage des zones vulnérables, (4) restrictions d'usages en parcelles riveraines, entre autres possibilités.

A l'inverse des mesures plus proches des parcelles drainées sont également possibles : (5) pratique du drainage contrôlé (Parsons *et al.*, 1990 ; Konyha *et al.*, 1992 ; Evans *et al.*, 1995) par une limitation temporaire de son fonctionnement une partie de l'hiver¹, (6) stockage des eaux pour recyclage l'été en irrigation...

C'est au niveau des réflexions intermédiaires et de la détermination du principe régisseur de l'étude que seront choisies les solutions effectivement projetées, et les zones prioritaires pour la mise en œuvre des actions.

4.2.1.d Mesures/informations disponibles

Notre scénario d'aménagement réclame une bonne connaissance des ouvrages hydro-agricoles en place, car c'est la dynamique de l'ensemble des réseaux de collecte et d'évacuation qui est concernée.

En ce qui concerne le drainage, l'accent doit ainsi être mis sur le recensement des périmètres drainés, leurs points de rejet, et si possible sur les caractéristiques des réseaux (diamètres, pentes). En outre les caractéristiques hydrodynamiques des sols drainés et les données de dimensionnement des panneaux de drains permettront, en l'absence d'informations sur les débits de drainage, une simulation de la transformation des intensités de pluie à l'échelle de la parcelle. Dans la plupart des cas ces informations ne sont que très partiellement disponibles.

¹ Cette interruption peut s'effectuer de deux manières : par la mise en place de coudes pivotants au débouché des collecteurs, ou par l'implantation de batardeaux dans le réseau de fossé. La fermeture des batardeaux maintient le niveau de l'eau au voisinage de la cote du terrain naturel, et interrompt le fonctionnement des drains et le rabattement de la nappe. Le relèvement de l'extrémité des coudes pivotants à une cote également proche de celle du terrain naturel, permet d'obtenir le même résultat.

Outre les caractéristiques hydrodynamiques des sols et les données de dimensionnement des panneaux de drains, deux informations sont apparues indispensables pour permettre l'étude : la localisation des points de rejet et la superficie des périmètres drainés.

En complément de ces deux informations, les pentes et positions des collecteurs principaux sont utiles à l'étude du comportement des réseaux enterrés lors de leur passage à pleine section et en charge.

Il apparaît également, après la mise en œuvre de l'expérimentation "FoCol", que la connaissance des conditions de circulation de l'air à l'intérieur des réseaux enterrés (joints étanches ou non, présence d'événements...) est importante. Cependant, en dehors des équipements spécifiques (regards, événements), peu d'éléments pourront effectivement être recensés.

En ce qui concerne l'assainissement, l'étude que nous avons menée s'est appuyée sur une connaissance assez détaillée de la géométrie du lit du fossé. Cette connaissance est là encore fréquemment difficile à obtenir, même si *a priori* rien ne s'oppose à un levé topographique de l'ensemble du réseau.

Le minimum de connaissances dont il faut disposer pour préparer le projet concerne une largeur et une profondeur indicatives sur l'ensemble du cours du réseau de fossés, complétée sur l'ensemble du cours également, par une estimation de la vulnérabilité des parcelles riveraines, et par la recherche de sites potentiels de ralentissement (ouvrages de franchissement existants, zones de faible vulnérabilité, passages plus encaissés...).

C'est au voisinage des points de rejet qu'une connaissance plus fine et exacte de la géométrie et de la rugosité du lit apparaît nécessaire. Car c'est dans ce voisinage que se produit le processus d'interaction étudié au chapitre 3, et de ces paramètres dépendront le comportement hydraulique des réseaux de collecteurs enterrés. Cette connaissance concernera en priorités les rejets de collecteurs de gros diamètre.

Pour les fossés de petites dimensions (d'une largeur de 1 à 2 mètres), un instrument de mesure par triangulation de la géométrie des sections en travers a été mis au point. Cet instrument est présenté en annexe 10.

Si le choix est fait d'une mise en place de multiples obstacles à l'écoulement, la connaissance précise de la géométrie et de la rugosité du lit au voisinage de ces obstacles sera également nécessaire.

4.2.2 *Réflexions intermédiaires*

Cette deuxième étape est la plus complexe et peut se trouver dans les situations réelles occultée ou franchie implicitement. Or elle permet la transition de la définition d'un

aménagement global aux objectifs clairement exprimés, vers un ensemble d'ouvrages ponctuels, au fonctionnement et aux conséquences plus localisées. En fait, il s'agit de justifier la stratégie d'aménagement : établir les priorités, et la façon de les atteindre afin de répondre au mieux aux objectifs. C'est l'organisation spatiale de l'aménagement qui est conçue à ce stade, et les choix retenus visent à limiter au maximum les nuisances pouvant être subies, en restant dans un ensemble raisonnable de contraintes humaines, foncières, et de coûts.

4.2.2.a Principe(s) régisseur(s) de l'étude

Nous cherchons à situer la démarche d'aménagement par rapport à trois grands points de vue qui peuvent guider les choix : l'application d'un principe de précaution, la prévention des risques, ou la limitation des impacts.

Nous définirons le principe de précaution ainsi : face à une nuisance prévisible, il n'est pas fait d'évaluation précise du niveau atteint par le risque après l'aménagement (soit parce que l'on manque de données objectives ou de connaissances scientifiques, soit parce que des facteurs autres que scientifiques sont prépondérants dans la prise de décision). On décide alors d'agir dans le sens de la sécurité en excluant du projet toute possibilité d'engendrer cette nuisance (abandon total ou partiel, choix de projets alternatifs).

La prévention des risques consiste à affecter à des zones géographiques susceptibles d'être exposées à une nuisance ou des dégâts (inondation, pollution...) un aléa hydrologique (hauteur et fréquence de l'inondation...) et un niveau de vulnérabilité (un site industriel chimique aura une vulnérabilité supérieure à une zone habitée, qui aura elle-même une vulnérabilité supérieure à celle d'une prairie...). Le risque résulte du croisement de l'aléa et de la vulnérabilité. La zone de définition du risque se trouve donc en aval d'un ensemble de zones ou d'activités génératrices de nuisance, qui peuvent être nombreuses (bassin concerné en grande partie) mais également éloignées.

A l'opposé du risque, qui porte sur les zones soumises à un problème, la limitation d'impact s'intéresse aux zones de départ du problème en question. Une fois le problème apparu localement (ruissellement par exemple), celui-ci peut se déplacer avec plus ou moins de facilité vers l'aval. On peut agir pour empêcher ce déplacement (par exemple par des digues en plein champs) et limiter l'étendue ou le nombre des zones susceptibles d'être touchées (parcelles pouvant être ravинées immédiatement à l'aval, habitations pouvant recevoir des dépôts de terre...).

Nous attirons l'attention du lecteur sur un point important : nous nous intéressons dans la discussion qui suit au strict aspect quantitatif des rejets de drainage. L'existence de nuisances potentielles liées à la qualité de l'eau changerait totalement les éléments de discussion et s'appuierait sur des connaissances non présentées ici.

L'application du principe de précaution ne serait ici pertinent qu'en l'absence réelle de toute connaissance objective du terrain, ce qui n'est très certainement pas le cas dans tout projet concret. Il nous paraît préférable de se tourner vers une approche en termes de risques. En effet, une approche en termes d'impact est *a priori* bien plus difficile.

Les connaissances sur les conséquences hydrologiques du drainage et de l'assainissement agricoles, exposées en 1.1.1 et 1.1.2 respectivement, montrent qu'une traduction en termes d'impact quantitatif, ne serait-ce qu'à l'échelle de la parcelle, est dépendante des caractéristiques initiales du sol et de l'intensité de la pluie. Sauf à interdire tout rejet vers l'émissaire, par exemple par un stockage des eaux dans une retenue en bordure de parcelle ou d'îlot drainé, l'influence peut se révéler négative et positive simultanément, pour un même aménagement.

Si l'on se place à l'échelle du réseau de fossés, c'est l'apport du reste du bassin versant qui se trouve modifié par le dimensionnement des émissaires. L'influence d'un réseau de drainage en un point du bassin versant se trouve donc intimement liée au reste de celui-ci.

Ainsi, c'est une approche en termes de risques d'inondations qui sera à notre sens à privilégier, en ayant identifié les secteurs où le niveau de ce risque peut se trouver dépendant des aménagements hydro-agricoles, en s'inspirant du concept de "méthode inondabilité", développé pour lutter contre les inondations en bordure des grands cours d'eau (Gilard, 1998). Toutes les mesures prises sur ces aménagements visant à modifier l'aléa (débit de pointe ou durée de crue) pourront réduire ce niveau de risque.

Il en résulte que d'autres solutions possibles permettant une réduction du risque, parmi celles proposées en 4.2.1.c, peuvent être examinées : endiguement ou dérivation au voisinage des zones vulnérables, restrictions d'usages en parcelles riveraines. Nous nous limiterons par la suite à la discussion sur le choix entre des mesures de ralentissement par des obstacles et une retenue unique.

4.2.2.b Étendue et densité des actions

L'étendue des actions représente la taille du territoire qui doit s'impliquer dans la lutte contre les effets indésirables des nuisances (pollution ou crue) : elle correspond pour la plus grande taille à une intervention généralisée à l'échelle du bassin versant, ou pour la plus petite taille, à une action ponctuelle sur le bassin, ou limitée à une de ses parties sensibles.

L'approche retenue dans notre scénario d'aménagement privilégie clairement la taille la plus grande vis-à-vis du réseau d'assainissement agricole, avant que celui-ci ne rejoigne le réseau hydrographique naturel. La taille du territoire concernée par un projet réel serait donc fixée par la délimitation du bassin d'alimentation de ce réseau, et serait de l'ordre de quelques centaines d'hectares.

La densité des actions traduit le nombre et la variété des ouvrages implantés pour aboutir à l'aménagement souhaité : elle correspond soit à un grand nombre de petits ouvrages répartis stratégiquement, soit à un faible nombre d'ouvrages, souvent plus imposants.

Les éléments qui nous sont apparus favorables à un grand nombre d'obstacles par rapport à une retenue unique sont :

- leur relative facilité de mise en œuvre, par rapport à un ouvrage de stockage de grandes dimensions,
- le maintien possible de la continuité du lit, dans la mesure où les obstacles concernent la partie supérieure de la section du fossé, ce qui ne modifie pas le fonctionnement du fossé pour les faibles débits,
- la plus faible accumulation potentielle de sédiments en amont des obstacles, que dans le fond d'une grande retenue, entraînant un entretien plus aisé
- le plus faible risque de dégâts en cas de dysfonctionnement ou de rupture de l'ouvrage,
- le plus faible volume de stockage nécessaire par la succession dynamique des points de stockage au cours de la progression de la crue.

La première approche de notre scénario d'aménagement (1.2.1) a montré que la multiplication des lieux de ralentissement présente des limites en termes de volume de stockage à mobiliser pour un niveau donné de laminage des crues à l'aval du réseau de fossé. Nous ne pouvons mettre en avant un critère déterminant pour fixer la limite dans un cas quelconque. De même nous ne pouvons proposer de règle pour fixer une répartition des obstacles. En revanche il paraît clair qu'une étude de plusieurs combinaisons doit être faite parmi les plus réalistes. Cette étude permettra de choisir celle qui répond le mieux à l'ensemble des objectifs, laminage des crues à l'aval, mais aussi collecte et évacuation de eaux, et protection contre les inondations au voisinage des obstacles. Ces obstacles auront par ailleurs été dimensionnés individuellement avant la mise en œuvre de cette étude.

4.2.2.c Efficacité/portée de l'aménagement

L'efficacité de l'aménagement est sa capacité à modifier un(des) paramètre(s) hydrologique(s) dans des conditions données (événement courant ou extrême) afin de limiter au maximum la gravité d'une nuisance (ici une crue).

Des éléments de cette efficacité ont été présentés dans la partie 1.2.3, à travers l'évaluation du taux de laminage des débits de pointe obtenus entre l'absence et la présence d'obstacle. Il est important de noter que ce taux dépend bien évidemment des caractéristiques de l'obstacle fixées à partir des règles de dimensionnement, mais aussi de la période de retour de la crue étudiée.

La même attention devra être apportée, à l'échelle de l'aménagement, en s'intéressant à plusieurs gammes d'épisodes de crue. L'étude menée devra en outre intégrer autant que faire se peut l'interaction entre les réseaux enterré et à ciel ouvert, occasionnée par la mise en place des ouvrages.

Les résultats donnés en 1.2.3 montrent également que si le choix porte sur des dimensions d'obstacles modestes, le laminage induit n'est que de quelques % du débit maximal de la crue. Pour que ce faible laminage puisse se traduire en un effet sensible à l'aval, il faut envisager un nombre d'obstacles suffisamment conséquent.

La portée est quant à elle la limite géographique au-delà de laquelle l'efficacité de l'aménagement peut être considérée comme nulle. Nous ne disposons pas d'éléments quantitatifs pour estimer la portée du ralentissement des crues sur un unique réseau d'assainissement. On peut raisonnablement s'attendre à ce qu'elle ne se situe pas très loin de l'extrémité aval du réseau d'assainissement, surtout si celui-ci rejoint rapidement un cours d'eau plus important.

4.2.3 *Études et actions*

Cette dernière phase est celle de l'élaboration du document de projet, avec tous les calculs nécessaires (dimensionnement, coûts...) et les outils de conduite des travaux (carte de l'aménagement, plan de masse des ouvrages, échancier ...). Elle est également tournée vers l'avenir du territoire aménagé, ainsi que vers celui des ouvrages réellement mis en place.

4.2.3.a Dimensionnement

Le tableau qui suit est un résumé des paramètres de dimensionnement, tels qu'ils ont pu apparaître comme importants pour la mise en place du scénario d'aménagement, au vu des pratiques usuelles, des modélisations et des résultats expérimentaux qui précèdent. Les méthodes classiques de dimensionnement se retrouvent dans les cahiers de clauses techniques générales des travaux de drainage (Cemagref, 1993a).

Paramètre	Objectif associé	Condition ou critère(s)
Ecartement des drains	Concentration d'un écoulement	Critère classique de tarissement non influencé d'une nappe entre deux profondeurs et pendant une durée données
Diamètre des collecteurs	Collecte et évacuation des eaux	Critère classique d'égalité entre le débit à remplissage complet -équation (90) page 181- et une pluie annuelle de durée 3 jours

Paramètre	Objectif associé	Condition ou critère(s)
Section d'écoulement du fossé au dessous du rejet	Collecte et évacuation des eaux	Critère classique d'égalité entre le débit donné par l'application de la formule de Manning-Strickler -équation (1) page 50- au tirant d'eau disponible sous le rejet, pour le débit moyen journalier de période de retour 1 ou 2 ans
Section d'écoulement du fossé au passage du rejet à pleine section	Laminage de crues	Pour une limitation du rejet de drainage, correspondance entre cette section d'écoulement et le rejet du débit à remplissage complet - théoriquement le débit de projet- dans le collecteur
Section(s) d'écoulement de l' (des) obstacle(s) hydraulique(s)	Laminage de crues	Début du débordement en lit majeur du fossé pour le débit moyen journalier de période de retour 1 ou 2 ans
Hauteur de surverse de l'obstacle hydraulique	Protection contre les inondations	Pour une protection de l'ouvrage : surverse pour un débit instantané maximal décennal Pour une protection des parcelles riveraines : surverse pour une superficie inondée maximale donnée

Tableau 17 : résumé des paramètres de dimensionnement pour l'aménagement d'ensemble intégrant drainage par tuyaux enterrés, assainissement agricole, obstacles hydrauliques

Des règles pour fixer les moins classiques de ces paramètres seront proposés dans la partie 4.3.

4.2.3.b Suivi et évaluation

Les résultats présentés dans le chapitre 3 ont montré la quasi nécessité de disposer de données expérimentales pour valider la modélisation du comportement complexe des réseaux en interaction. En outre la géométrie du système a été réduite à quelques dimensions caractéristiques, qui peuvent n'être qu'insuffisamment représentatives de la géométrie réelle.

Par ailleurs, si l'on souhaite s'assurer du respect des objectifs, sur une base chiffrée établie lors de l'étape de dimensionnement, une observation quantitative du fonctionnement des ouvrage s'impose.

Enfin, l'idéal serait de disposer de données permettant l'évaluation quantitative de l'efficacité d'aménagement.

Il n'est pas raisonnable d'envisager pour chaque projet un suivi en continu des débits et pressions des rejets, et des débits et niveaux dans le ou les fossés. Cela est d'autant plus vrai que nous avons vu que la complexité du comportement de la jonction collecteur-fossé imposerait un nombre important de points de mesures pour un seul rejet. Cependant, toutes les initiatives

prises pour mettre en place, à l'occasion d'un projet de cette nature, un dispositif de suivi expérimental, permettront d'améliorer la justesse des outils de dimensionnement des ouvrages. Elles apporteront également des éléments aidant au choix du nombre et des emplacements de ces ouvrages.

Dans cette optique mais dans un tout autre domaine d'intervention, une telle initiative a été prise dans le département de l'Eure, dans le cadre de l'aménagements de lutte contre l'érosion des ravines de l'Andelle. Plus généralement la mise en œuvre d'un réseau de mesures, soutenu et maintenu opérationnel par l'Etat et les Collectivités Locales, serait un outil précieux d'amélioration des techniques de maîtrise des écoulements par des aménagements à l'échelle du bassin versant, y compris pour les plus petits d'entre eux.

Nous proposons, si les moyens de suivi restent très limités, de mettre en place un dispositif minimum permettant de connaître les niveaux des plus hautes eaux au voisinage des obstacles et des rejets importants. L'exploitation de ces informations permet d'une part de situer les amplitudes extrêmes inter-annuelles, et d'autre part de connaître, en cas d'inondation des rives, ou de surverse d'un obstacle hydraulique, les contraintes subies par les parcelles riveraines ou l'ouvrage de ralentissement.

Pour mettre en œuvre le suivi de niveaux maximaux, il existe des rubans marqués qui se décolorent au contact de l'eau . Associés à une échelle de niveau, et remplacés chaque année, ils permettent assez simplement, et avec une maintenance réduite, de disposer de ces informations.



Photographie 16 : exemple de dispositif de relevé des niveaux maximaux atteints implanté sur un ouvrage anti-érosif de l'aménagement des ravines de l'Andelle. La couleur rouge indique que le niveau de l'eau n'a pas atteint cette partie de la règle.

4.3 Conclusions, recommandations et perspectives

L'ensemble des résultats présentés dans ce travail montre un rôle clé joué par une composante essentiellement anthropique du chemin de l'eau sur le bassin versant. Cette composante ne doit pas être ignorée, ni être vue comme un facteur limitant pour des objectifs d'évacuation d'eaux en excès. Son rôle peut au contraire se concevoir en terme de gestion des rejets, du transfert des crues ou des polluants. Des pistes de techniques complémentaires visant de tels objectifs de gestion et reposant sur le fonctionnement particulier de l'interface réseau enterré - réseau à ciel ouvert sont proposées.

Dans cette dernière partie nous concluons ce chapitre 4 en proposant un ensemble de recommandations et de perspectives, pour une bonne prise en compte de l'interaction entre le réseau de collecteurs enterrés et les émissaires à ciel ouvert. Ces recommandations sont tournées vers la mise en œuvre de trois types d'ouvrages (suivant la nomenclature définie dans le projet "OMER", éventuellement associés dans un aménagement conçu suivant la méthodologie discutée dans la partie précédente : le réseau de drainage agricole, le fossé d'assainissement dans sa partie localisée au point de rejet de ce réseau de drainage, la combinaison d'un busage du fossé qui joue le rôle d'obstacle hydraulique, et d'une diguette perpendiculaire à l'axe du fossé favorisant la rétention dans le lit majeur du fossé en amont de l'obstacle.

Nous pouvons considérer que l'ingénieur peut aborder la question de l'interaction entre le réseau de collecteurs enterrés et les émissaires à ciel ouvert suivant trois points de vue : celui d'un hydraulicien intéressé par un processus naturel qu'il cherche à maîtriser, celui d'un aménageur pour qui assurer le fonctionnement du drainage agricole tout en prévenant des inondations à l'aval d'un petit bassin versant est la première préoccupation, et enfin celui d'un ingénieur de bureau d'études qui doit dimensionner et concevoir plus spécialement un ouvrage au sein de l'aménagement évoqué dans le point de vue précédent.

4.3.1 *Le point de vue de l'hydraulicien*

4.3.1.a Son souci

Le premier point de vue est celui d'un hydraulicien qui doit modéliser au mieux un processus de jonction de deux écoulements. Ce processus n'est plus neutre pour chacun des apports lorsque les débits de l'émissaire à ciel ouvert ne sont pas très différents de ceux du rejet des collecteurs. L'incidence affecte d'une part les niveaux d'eau de l'amont, et d'autre part

l'influence du niveau du fossé sur le déversement depuis le collecteur, pouvant amener celui-ci à s'écouler à pleine section.

Lorsque les débits du collecteur et de l'émissaire croissent simultanément, les niveaux d'eau de l'amont sont d'autant plus affectés par la jonction que ces débits sont importants et les niveaux d'eau élevés. En revanche, lorsqu'un obstacle augmente artificiellement le tirant d'eau du fossé, l'influence décroît avec la rehausse de l'ouvrage, et donc lorsque les niveaux d'eau sont de plus en plus élevés.

Lorsque le tirant d'eau dans le collecteur devient proche du diamètre de celui-ci, un phénomène de passage à pleine section vient créer une discontinuité dans le comportement du rejet. Cette discontinuité complexe dépend de la pente du collecteur, de la circulation de l'air dans les conduites, et enfin du débit du rejet au moment de ce passage à pleine section.

Nous avons apporté quelques éléments d'étude de ce processus hydraulique, dans le cas d'une géométrie simple, caractérisée par quelques paramètres principaux. Ces éléments permettent une première approche du phénomène, avec des outils proposés d'utilisation simple. Pour pousser plus loin l'étude, notamment si l'on doit tenir compte d'une géométrie plus complexe, ou si l'on cherche plus de précision sur les variables hydrodynamiques du système, il sera nécessaire de s'engager dans une démarche d'expérimentation plus précise, ou de modélisation du volume fluide au moyen de codes numériques adaptés. Cette modélisation peut être validée par des confrontations aux résultats des expérimentations qui ont été effectuées pour ce travail.

4.3.1.b Recommandations

Ces recommandations concernent des systèmes de géométrie et de type comparables à ceux décrits dans ce travail. Elles ne concernent pas directement (1) les rejets qui ne sont pas perpendiculaires à l'axe de l'émissaire, (2) qui s'avancent sensiblement vers l'intérieur du fossé, (3) les fossés aux talus très évasés, ni (4) les obstacles de grande longueur dans le sens de l'écoulement du fossé. Dans chacun de ces cas l'utilisation des résultats de cette étude devra être faite avec prudence, et des études complémentaires (expérimentation, modélisation) devront être réalisées.

- Définir à partir de la géométrie réelle sept paramètres caractéristiques pour décrire le fossé qui recevra l'obstacle ou le rejet : (1) la largeur indicative du fossé, (2) la pente du fossé, (3) la profondeur du fossé, (4) la hauteur du rejet au dessus du fond du fossé, (5) le diamètre du collecteur, (6) la pente du collecteur au niveau du rejet, (7) la pente du lit majeur perpendiculairement à l'axe du fossé
- Caractériser les coefficients de Manning-Strickler du fossé et du collecteur enterré

- Identifier les tirants d'eau caractéristiques (normal et critique) du fossé et du collecteur pour différentes gammes de débit
- Utiliser pour une première approche un bilan simple, par exemple au moyen de l'outil JoCoFox proposé, pour identifier l'ampleur de l'interaction, et situer d'éventuelles influence réciproques

4.3.1.c Perspectives

Une perspective directe découlant du traitement partiel du problème posé dans cette étude, et qui en constitue une poursuite directe à court terme, est la modélisation par bilan de quantité de mouvement de la jonction dans le cas où la cote du fil d'eau du collecteur est différente de celle du fond du fossé. Les principes de modélisation restent les mêmes que pour la partie 3.3 et le dispositif expérimental "FoCol" a été conçu pour simuler ce cas.

Les perspectives plus larges d'étude du processus hydraulique à proprement parler peuvent être orientées dans trois voies principales : une voie d'approfondissement des cas où la géométrie du fossé ne peut être approchée par une géométrie rectangulaire (talus évasés), car ces cas peuvent être fréquemment rencontrés. Les cas de collecteur s'avancant suivant un angle différent de 90 °, ou en empiétant sur une grande longueur vers l'intérieur du fossé est moins fréquent, et leur étude est moins indispensable.

Une deuxième voie concernent les écoulements torrentiels qui n'ont pas du tout été abordés ici. Des problèmes liés à une pente forte dans le collecteur, qui se sont traduits dans notre étude par des difficultés d'exploitation des données expérimentales, peuvent être rencontrés sur le terrain.

Enfin une troisième voie importante possible est la modélisation de l'ensemble du volume fluide en mouvement, par des techniques numériques tri-dimensionnelles. Cette modélisation peut être envisagée au moyen de codes numériques classiques, si la prise en compte des écoulements diphasiques se révèle suffisamment performante pour ce type de système, ou encore au moyen de méthodes de type Lattice-Boltzmann si les caractéristiques de l'écoulement sont compatibles avec ce type d'approche (voir 3.1.1).

Plus largement, ce processus local doit être intégré dans des modèles de réseau plus complet, associant des parties enterrées complètes, et des parties à surface libre permettant d'appréhender les problèmes généraux des cours d'eau et des bassins versants. Cette intégration peut se faire au même titre qu'une jonction habituelle, en intégrant des règles d'influence de l'interaction sur la pression et le tirant d'eau dans la conduite. Le cas particulier du passage à pleine section en lien avec la pente de la conduite est à étudier plus spécialement et à valider, en relation avec ce qui est déjà connu dans le domaine des écoulements urbains.

4.3.2 *Le point de vue de l'aménageur*

4.3.2.a Son souci

Le deuxième point de vue est celui d'un aménageur qui doit intégrer à l'échelle d'un petit bassin versant, les objectifs souvent antagonistes d'évacuation des eaux d'une part par des réseaux de drainage et d'assainissement agricole, et de rétention des crues d'autre part, pour lutter contre les inondations.

Une solution parmi d'autres peut être de répartir dans le réseau de fossés un ensemble d'obstacles à l'écoulement, de conception légère, mais donc d'effet limité. Pour les crues de faible intensité, ces obstacles laissent relativement libre l'écoulement dans le fossé. Pour les crues plus intenses, ils assurent un stockage temporaire des eaux, éventuellement par débordement localisé sur les parcelles riveraines. Dans ce cas, les rejets des périmètre drainés les plus étendus contribuent par leur apport d'eau, mais peuvent être affectés par un niveau d'eau élevé dans le fossé. Une réflexion d'ensemble sur la dynamique du réseau de fossé et des réseaux de drainage qui l'alimentent est essentielle, car l'efficacité de l'aménagement réside dans sa dynamique et non dans des critères hydrauliques qui isoleraient chacun des éléments de la production et du transfert de la crue. Pour les réseaux enterrés de grande longueur, l'étape du passage à pleine section imposée par le niveau de l'émissaire doit être examinée plus particulièrement, car celle-ci est susceptible de donner au réseau enterré un rôle de ralentissement prépondérant.

4.3.2.b Recommandations

Ces recommandations concernent l'aménagement de petits bassins versants à dominante agricole, alimentant un fossé d'assainissement, majoritairement par des eaux de drainage

- En cas de drainage nouveau, caractériser dans la mesure du possible l'aptitude du sol au ruissellement avant l'implantation du drainage, éventuellement sous forme d'indices visuels (dépôts, ravines, ou au contraire absence totale de traces d'écoulements de surface)
- Elaborer le projet d'aménagement en suivant les étapes de la démarche proposée en 4.2, qui permet un support convenable à la discussion sur le terrain (nécessaire compte tenu des contraintes foncières susceptibles d'être engendrées) puis à la mise en œuvre concrète du projet. Mener de préférence la démarche en termes de diminution du risque
- Rassembler un maximum de données sur les réseaux de drainage en place ou à implanter (au moins leur périmètre et le lieu du rejet pour tous les réseaux), recenser et décrire avec précision les sites aux points de rejet

- Rassembler des informations sur l'ensemble du réseau de fossés d'assainissement, en ce qui concerne au minimum : sa largeur indicative, sa pente, les singularités hydrauliques (obstacles, franchissements, autres ouvrages), sa rugosité, la pente du lit majeur perpendiculairement à l'axe, l'usage des rives
- Hiérarchiser les rejets de drainage à partir du rapport des superficies collectées à la superficie d'alimentation du fossé au point de rejet
- Concevoir une étude de la dynamique du ralentissement des crues comprenant une étude de ligne d'eau en régime transitoire, au minimum aux sites suivants : (1) points de rejet, (2) obstacles hydrauliques dans le fossé, (3) tronçons de fossé entre les obstacles et les points de rejet si le premier est susceptible d'influencer le second. Sur les autres parties du fossé, une étude par simulation de la propagation d'une onde de crue pourra être suffisante

4.3.2.c Perspectives

La démarche d'aménagement proposée s'appuie sur l'expérience de réalisations qui ne sont pas de la même nature que le scénario d'aménagement discuté en 1.2. C'est la richesse des données expérimentales du ru de Melarchez qui ont rendu possible la réflexion autour des phénomènes hydrauliques, l'évolution du ru lui-même ne correspond pas dans les faits à ce qui pourrait être la concrétisation de ce scénario.

Aussi, la perspective majeure de développement à partir de ce travail est l'étude, dès sa conception, d'un projet réel qui suivrait les principes de notre scénario d'aménagement. Il est nécessaire, pour trouver ce projet et en tirer des validations expérimentales concluantes, de combiner une bonne connaissance du milieu antérieurement au projet, et un engagement fort de lutte contre les inondations, qui garantirait la mise en œuvre effective du projet.

4.3.3 *Le point de vue du concepteur d'ouvrages de rejet et de ralentissement des crues*

4.3.3.a Son souci

Le troisième point de vue est celui de l'ingénieur du bureau d'études qui doit concevoir et mettre en place un ouvrage de rejet d'eaux de drainage, ou un obstacle hydraulique destiné à ralentir les crues dans le fossé d'assainissement agricole. Guidé par un projet d'aménagement global, il doit à son niveau intégrer des détails du terrain, des contraintes techniques, ou socio-économiques, qui n'ont pas obligatoirement été prises en compte à l'échelle de ce projet global.

Pour cela il doit appliquer les mêmes règles de dimensionnement que le projet global, auxquelles s'ajoutent les contraintes locales. Ainsi, les règles de dimensionnement ne doivent pas

dépendre des autres ouvrages, qui pourraient être modifiés par leurs propres contraintes, voire être abandonnés du fait de contraintes trop fortes.

4.3.3.b Recommandations

- le drainage doit être dimensionné et conçu suivant les prescriptions générales applicables en la matière (Cemagref, 1993a). Le cahier des clauses techniques générales cité ici prévoit l'installation de regards d'équilibre lors de passages en conduite forcée (discontinuités topographiques conduisant à des pentes fortes). Les résultats précédents montrent que le passage d'air à travers la conduite en amont des points de rejet peut favoriser le maintien de l'écoulement à surface libre pour les forts débits, ou au contraire accélérer l'évacuation de l'air pour un passage à pleine section depuis l'aval. Pour les grands périmètres drainés susceptibles de faire l'objet d'une mesure de débits à l'aval, prévoir ou implanter des cheminées de circulation d'air afin de gérer et vérifier le mode d'écoulement envisagé (l'ouverture devrait favoriser l'évacuation, la fermeture devrait favoriser la rétention dans le réseau enterré)
- les obstacles hydrauliques à l'écoulement dans le fossé pourront être dimensionnés individuellement en prévoyant un début de rétention pour un débit moyen journalier de période de retour 1 ou 2 ans, et un débit de surverse instantané décennal.
- dédoubler si possible les obstacles avec des sections différentes, pour élargir la plage d'efficacité
- pour favoriser un ralentissement de la crue au niveau du réseau enterré, contrôler le débit de passage à pleine section au débouché du collecteur, par un aménagement particulier sur la section du collecteur (seuil) en l'absence d'influence du fossé, ou de la section du fossé (écran) en cas d'influence.

Un écran en amont du rejet retarde le passage à pleine section, un écran en aval la favorise. Le schéma de principe en figure 86 montre ce que pourrait être ce type d'intervention.

On trouvera en annexe 12 des photographies du modèle réduit "FoCol" sur lequel une simulation simple de l'application de ce procédé a été effectuée.

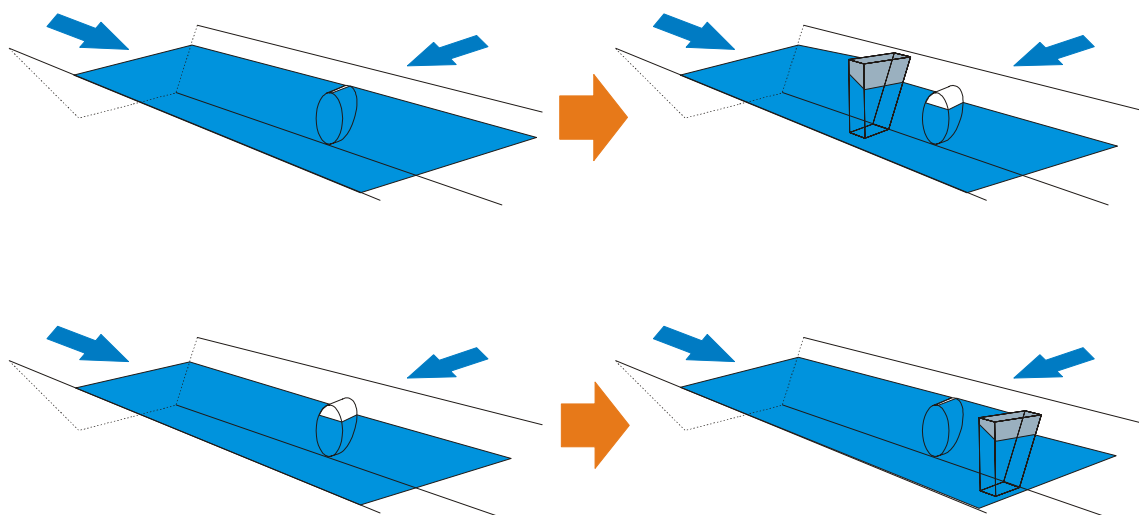


Figure 86 : Schéma de principe d'un contrôle du passage à pleine section par la pose d'un écran en travers du fossé. Les dessins représentent des apports identiques, sans écran pour ceux de gauche, et avec écran pour ceux de droite. Sur la première ligne, on montre un passage à surface libre favorisé par l'écran, disposé en amont. Sur la deuxième ligne c'est le passage à pleine section qui est favorisé par l'écran disposé à l'aval.

Le ralentissement dans le réseau enterré ne devra concerner que les crues de forte intensité, pour lesquelles la prévention des inondations justifie une pénalisation temporaire des performances du drainage. Les premiers éléments d'analyse laissent penser qu'un passage à pleine section exactement au débit à remplissage complet est susceptible de limiter temporairement le débit à l'aval du réseau. Au besoin, le seuil ou l'écran peuvent être étudiés pour ne jouer leur rôle qu'au delà de certains débits (en les plaçant en position haute, à l'image des cunettes présentées sur la photographie 17, barrées pour ralentir les écoulements trop intenses -commune de Gaillardbois-Cressenville, Eure-).



Photographie 17 : exemple de cunette en bordure de route, barrée par des seuils surélevés pour ralentir les écoulements les plus intenses (commune de Gaillardbois-Cressenville, Eure)

4.3.3.c Perspectives

Les formes et dimensions d'ouvrages de ralentissement se montrent multiples. Il s'agit à l'avenir de valider sur des expérimentations physiques ou de terrain les ouvrages proposés dans ce travail sous forme de modèles de calcul, et d'en affiner le dimensionnement. Là encore c'est la mise en œuvre d'un projet réel qui permettra à l'ingénieur de disposer de données de référence et de retours d'expériences en matière de dimensionnement et de dispositions constructives.