

**Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris
& École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts**

**Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie**

**Modélisation du comportement en crue d'un réseau
de drainage enterré : étude hydraulique d'un réseau
réel complet pouvant jouer un rôle de rétention**

EDITH GRAVELINE

Directeur de recherche : YVES NEDELEC

 **CEMAGREF**
Groupement d'Antony
Parc de Tourvoie
92163 Antony

Septembre 2007



Remerciements

Je remercie tout particulièrement mon maître de stage, Yves Nédélec, pour tout ce qu'il m'a appris, sa disponibilité et son soutien.

Je remercie également Michel Poirson pour sa grande aide et ses conseils avisés qui m'ont permis d'avancer tout au long de ce stage, ainsi que Hocine Henine pour ses remarques pertinentes.

Merci au reste de l'équipe, Bénédicte Augeard, Bernard Vincent, Cédric Chaumont, Cyril Kao et Julien Tournebize pour leur disponibilité et la bonne humeur qu'ils instaurent dans l'équipe.

Je salue enfin l'ensemble du personnel du Cemagref, stagiaires, thésards, chercheurs, ... , qui contribuent à la bonne ambiance régnant au sein du Cemagref.

Résumé

Actuellement, en France près de 10 % de la S.A.U. (Surface Agricole Utile) ont un drainage artificiel par tuyaux enterrés. Ces parcelles agricoles drainées peuvent représenter une surface non négligeable d'un bassin versant. C'est le cas, notamment, du bassin versant de Goins, situé en Seine-et-Marne (77), d'une superficie de 1,3 km². Il est essentiellement agricole et 90 % de ces parcelles sont drainées. Les réseaux de drainage peuvent parfois avoir des répercussions sur les écoulements. En effet, en période de crue, le rejet d'écoulements, issus de parcelles agricoles drainées par réseau enterré, peut engendrer des inondations à l'aval par circulation directe d'eau dans les fossés d'évacuation. A l'inverse, il est possible que la capacité d'évacuation du réseau enterré soit parfois limitée, en raison d'une influence aval due au niveau d'eau dans le fossé d'évacuation qui met le réseau en charge, ou à cause d'un dimensionnement du réseau inadapté. Ces phénomènes surviennent généralement lors des plus fortes crues.

C'est ainsi qu'à partir de deux modèles, Xirene, un modèle hydraulique à surface libre, et Hydrowin, un modèle de nappe perchée drainée, on cherche à caractériser le comportement hydraulique du réseau réel de drainage agricole considéré pouvant jouer un rôle de rétention lors de période de crue. On se limite à un périmètre agricole drainé d'une superficie de 18000 m². Depuis quelques années, il existe sur ce site de nombreuses données : de pluviométrie, de débit et de tirant d'eau à l'aval du réseau, des données piézométriques au niveau de la parcelle, et de débits au sein d'un des collecteurs, à l'aval de cette dernière. Les données de terrain montrent que, pendant certains épisodes de crue, sont observées durant le mois de février et jusqu'à début mars 2007 des phases de débits négatifs au sein du collecteur instrumenté correspondant alors à des écoulements allant du drain vers la nappe environnante.

Au vu de tels échanges encore peu étudiés, ces périodes sont plus particulièrement regardées. Le fait qu'un réseau de drainage agricole soit constitué de conduites enterrées rend son étude complexe car on ne peut pas avoir une observation directe de ce qui se passe. Ainsi, un des intérêts de cette étude est de reconstituer ce réseau réel de drainage enterré en tenant compte de l'espacement des drains, de leur orientation et de la localisation des collecteurs. En revanche certains paramètres restent à déterminer tels que la pente, le diamètre, la profondeur, et le coefficient de Manning-Strickler des conduites. Ce réseau théorique assimilé au réseau réel de drainage enterré est intégré dans un SIG, QGIS. Couplé à celui-ci, le modèle hydraulique à surface libre, Xirene est choisi afin d'évaluer le transfert et la rétention de crues au niveau de la parcelle étudiée sur la période considérée. Un modèle de nappe perchée drainée, Hydrowin, a été couplé à Xirene sous la forme d'hydrogrammes d'apports aux drains de la parcelle. En théorie, ces apports dépendent eux-mêmes de la charge hydraulique de chaque drain. Le couplage doit donc intégrer cette interaction à double sens. En sortie de Xirene, sont calculés des débits et des tirants d'eau au niveau des drains et des collecteurs constituant le réseau modélisé. Associés aux données de terrain, ces résultats de modélisation ont pour but de mieux comprendre les conditions hydrauliques lors de rétention de crues à l'échelle d'un périmètre drainé lors du passage en charge du réseau considéré.

TABLE DES MATIERES

PREAMBULE : Présentation du Cemagref.....	p.5
INTRODUCTION.....	p.6
I) LE BASSIN VERSANT DE GOINS : CARACTERISTIQUES DE LA PARCELLE ETUDIEE.....	p.7
1) Contexte général de l'étude.....	p.7
a. localisation du site d'étude.....	p.7
b. contexte géologique, pédologique et hydrogéologique.....	p.8
c. but et nécessité du drainage dans nos régions.....	p.10
2) Données de terrain et caractéristiques du réseau de drainage enterré.....	p.12
a. données de terrain utiles à l'étude et commentaires.....	p.12
b. caractéristiques du réseau de drainage enterré.....	p.18
c. création du réseau de drainage sur un SIG : QGIS.....	p.19
II) MODELISATION.....	p.20
1) Modèles nécessaires à l'étude.....	p.20
a. Xirene : un modèle hydraulique à surface libre.....	p.20
b. Hydrowin : un modèle de nappe perchée drainée.....	p.21
2) Aspects pratiques de la modélisation.....	p.22
a. organisation des entrées des données dans Xirene.....	p.22
b. modélisation d'un débit de nappe rentrant dans les drains : choix des données d'entrée du modèle Hydrowin.....	p.23
III) RESULTATS ET INTERPRETATION.....	p.27
1) Résultats.....	p.27
a. trois itérations successives.....	p.27
b. évolution et comparaison des itérations.....	p.30
2) Interprétation et fonctionnement hydraulique du réseau.....	p.33
a. interprétation.....	p.33
b. fonctionnement hydraulique du réseau de drainage enterré.....	p.38
3) Limites des modèles et discussion.....	p.39
a. limites des modèles.....	p.39
b. discussion.....	p.41
CONCLUSION.....	p.42
BIBLIOGRAPHIE.....	p.44
ANNEXE 1 discrétisation des équations de Barré de Saint-Venant.....	p.45
ANNEXE 2 visualisation sur le SIG QGIS de la répartition des hauteurs d'eau au sein des conduites à 1 jour de simulation lors de la phase d'initialisation.....	p.50

PREAMBULE : Présentation du Cemagref

Le Cemagref est un organisme public de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement. Il est tourné vers l'étude de la gestion durable des eaux et des territoires. Il est régi à la fois par le ministère en charge de la recherche et par celui en charge de l'agriculture. Il emploie près de 1350 personnes. Ses recherches sont orientées vers des innovations techniques et vers l'apport de connaissances nouvelles utilisables par des gestionnaires, des décideurs et des entreprises afin de répondre à des problèmes de société concrets dans les domaines de la gestion des ressources, de l'aménagement et de l'utilisation de l'espace.

Le Cemagref axe principalement ses recherches sur les ressources en eau de surface, les systèmes écologiques aussi bien aquatiques que terrestres, les espaces à dominante rurale, les technologies pour l'eau, les agro-systèmes et la sûreté des aliments.

Au sein de cet organisme, il existe vingt et une unités de recherche propres, six unités mixtes de recherche et une équipe de recherche technologique répartis dans dix centres en France métropolitaine et en Martinique.

Le département qui m'a accueilli durant ce stage est le département de ressources en eau, usages et risques à Antony (92). L'équipe d'accueil fait parti de l'unité HBAN (Hydrosystèmes et bioprocédés). Elle étudie à partir de modèles le comportement hydraulique et hydrologique de réseaux de drainage agricole et des aspects de pollution les concernant.

INTRODUCTION

Le drainage agricole dans nos régions tempérées a pour but de lutter contre les excès d'eau et l'engorgement des sols en saison humide par rabattement de la nappe via un réseau de drainage enterré et de fossés. Le réseau enterré est constitué de conduites perforées, les drains, connectés à des collecteurs. Ces aménagements se font à l'échelle de la parcelle. Les eaux qui y transitent se déversent à l'exutoire au niveau d'un fossé d'évacuation à ciel ouvert.

L'étude du drainage agricole est indispensable dans la mesure où près de trois millions d'hectares de terres agricoles en France, soit 10 % de la S.A.U. (Surface Agricole Utile), ont un drainage artificiel par conduites enterrées. Ces réseaux de drainage peuvent avoir des répercussions sur les écoulements. En effet, en période de crue, le rejet d'écoulement issu de parcelles agricoles drainées par réseau enterré peut engendrer des inondations à l'aval par circulation directe d'eau dans des fossés et des rivières en opposition à une circulation naturelle plus diffuse par infiltration et/ou ruissellement. Mais la capacité d'évacuation de l'eau du réseau peut parfois être limitée. Ceci peut être dû, lors de période de crue, à la mise en charge du fossé d'évacuation ou encore à un dimensionnement du réseau inadapté. Le réseau, ainsi mis en charge, peut jouer un rôle de rétention de crue.

Etudier un réseau réel de drainage agricole n'est pas trivial car s'il est constitué de conduites enterrées, on ne peut pas avoir une observation directe de ce qui se passe. Cette étude est réalisée sur le bassin versant de Goins, situé en Seine-et-Marne (77), d'une superficie de 1,3 km². Il est emboîté dans un plus grand bassin versant, le bassin versant de l'Orgeval, étudié depuis 1962 par le Cemagref. Le bassin versant de Goins est essentiellement agricole et 90 % de ces parcelles sont drainées. De nombreuses mesures météorologiques et hydrologiques existent. Le débit en conduite enterrée a été plus récemment mesuré au sein d'un collecteur. Lors de période de crue, il est possible de noter la présence de débits négatifs, c'est-à-dire un écoulement allant du drain vers la nappe environnante, à l'inverse des écoulements habituels.

Ainsi, sur un cas réel de réseau de drainage agricole enterré pouvant jouer un rôle de rétention, on cherche à caractériser son comportement hydraulique lors de période de crue et cette présence de débits négatifs mesurés au sein des conduites par modélisation à partir de deux modèles, Xirene un modèle hydraulique à surface libre et Hydrowin un modèle de nappe perchée drainée. Cette étude se limite ici à un périmètre de drainage agricole de 18000 m², inclus dans un réseau plus vaste de 52000 m². Pour ce faire, on s'attarde dans un premier temps sur les caractéristiques de la parcelle étudiée avec les données de terrain correspondantes et une réflexion sur l'organisation du réseau de drainage agricole enterré et de sa mise en place sur un SIG QGIS. Puis, on s'intéresse à la modélisation proprement dite avec l'utilisation des deux modèles, Xirene et Hydrowin et une réflexion sur les aspects pratiques, c'est-à-dire le choix du jeu de données en entrée de chaque modèle. Enfin, on regarde les résultats en sortie des modèles par rapport à ce qui est mesuré sur le terrain afin d'établir un fonctionnement hydraulique de la parcelle drainée considérée.

I) LE BASSIN VERSANT DE GOINS : CARACTERISTIQUES DE LA PARCELLE ETUDIEE

1) contexte général de l'étude

a. localisation du site d'étude

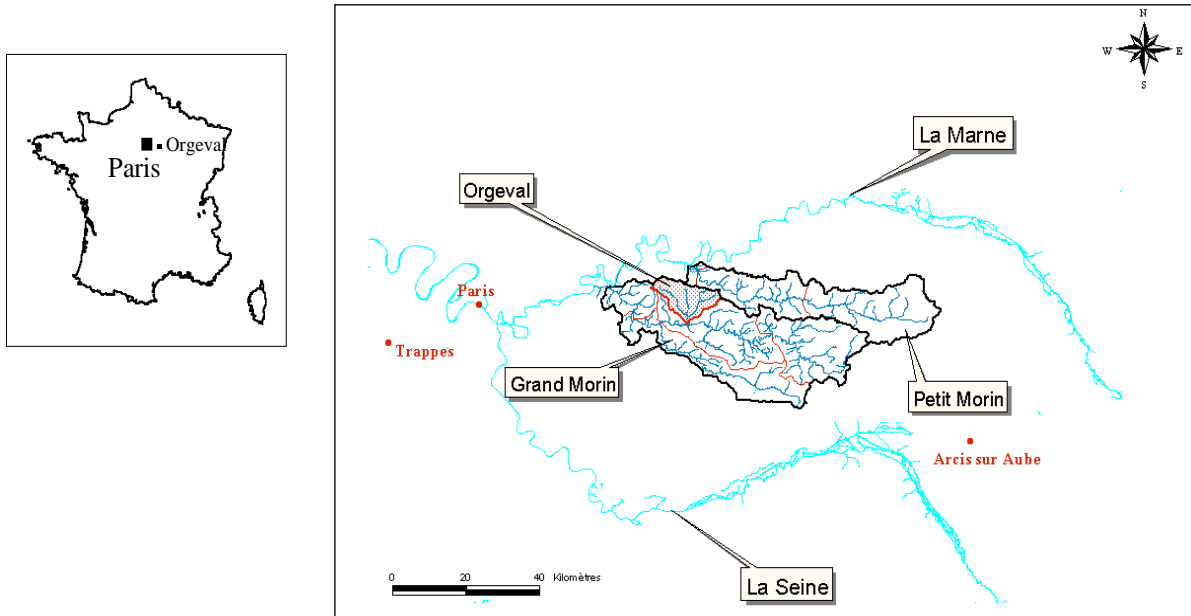


Fig.1 Localisation du bassin versant de l'Orgeval
(source Cemagref)

Le bassin versant dans lequel se fait l'étude est celui de l'Orgeval. Il est situé en Seine-et-Marne (77) à 70 km environ à l'est de Paris. Ce Bassin versant a une superficie de l'ordre de 104 km² et est constitué de sous-bassins versants emboîtés. Le périmètre de drainage étudié se trouve dans un de ces sous-bassins versants, le bassin versant de Goins. Il se situe au nord du bassin de l'Orgeval et a une superficie de l'ordre de 1,3 km².

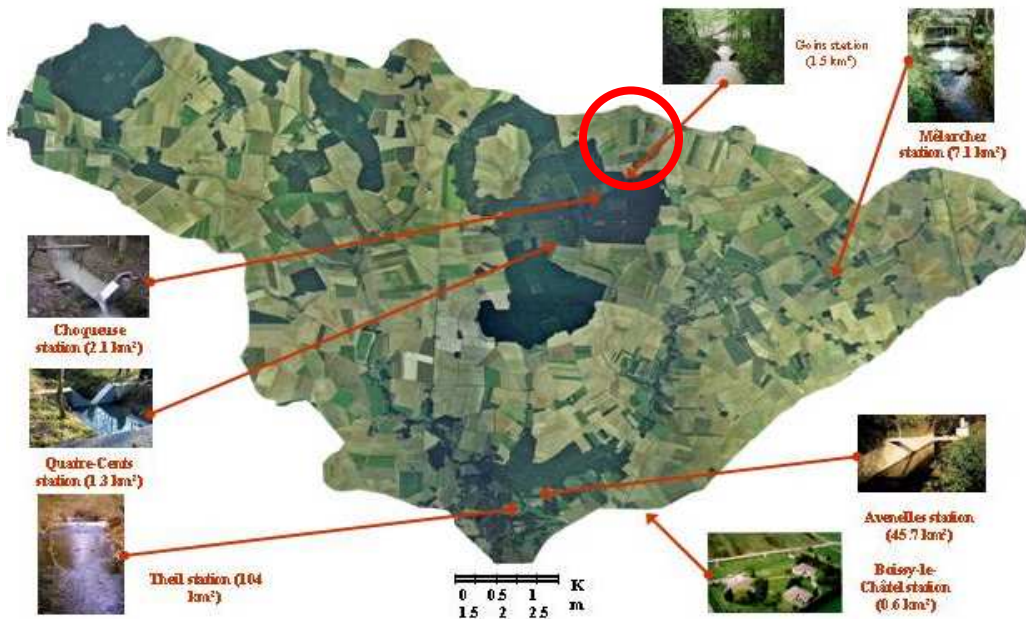


Fig.2 Bassin versant de l'Orgeval et localisation du bassin versant de Goins
(source Cemagref)

La région correspondant à un plateau à pentes faibles, le bassin versant de l'Orgeval a un relief relativement plat. Il est entaillé par endroit de petites vallées encaissant le réseau hydrographique (cf fig.1). La région est essentiellement rurale. 81 % du sol est consacré à la culture céréalière (blé, maïs, ...), au colza, au lin, au féveroles ou à la luzerne, ... On trouve également des prairies temporaires ou permanentes. Les bois et les forêts représentent 18 % du sol. Le reste de la surface correspond aux zones urbaines et aux infrastructures routières.

b. contexte géologique, pédologique et hydrogéologique

- Contexte géologique

La zone d'étude se situe dans le Bassin Parisien. Les formations géologiques sont sédimentaires et d'âge tertiaire. A l'aval du bassin versant de l'Orgeval, il affleure des marnes supragypseuses de 10 à 15 m d'épaisseur et des calcaires de St-Ouen de 2 m d'épaisseur environ datés du Bartonien (Eocène). Au dessus, des calcaires siliceux ou marneux, des argiles et des meulière du Stampien inférieur (Oligocène) constitue la formation de Brie (plateau de Brie) d'une épaisseur pouvant aller de 5 à 10 m. Puis, on peut trouver des sables de Fontainebleau du Stampien supérieur (Oligocène) surmontés d'une fine couche de calcaires de Beauce de l'Aquitainien (Miocène). Les couches des sables de Fontainebleau et des calcaires de Beauce, étant soumis à l'érosion, n'apparaissent qu'à certains endroits, au niveau de buttes témoins. Au dessus des formations géologiques, se trouvent des limons et un sol relativement bien développé estimé à 2 m d'épaisseur.

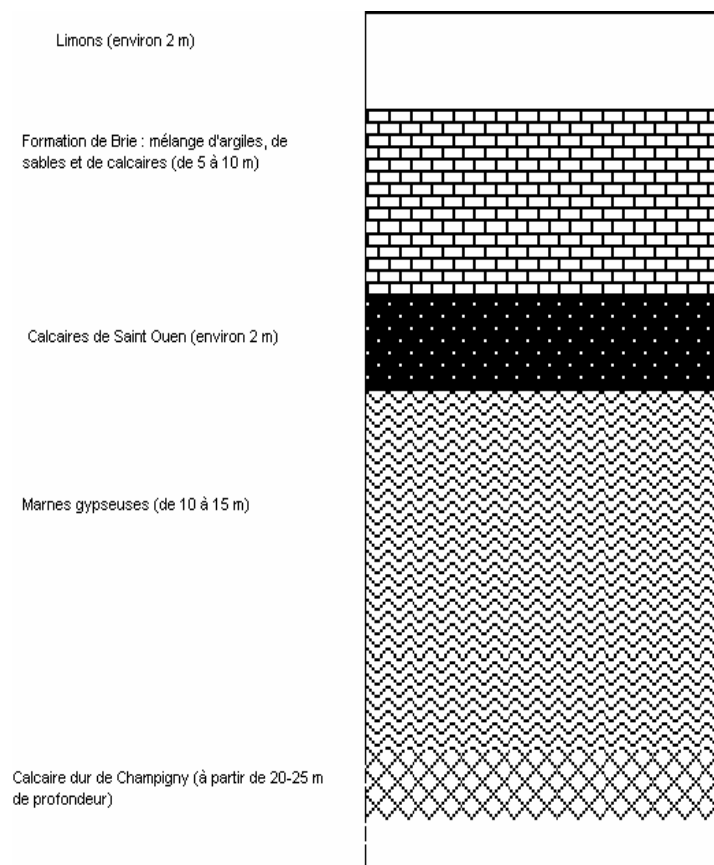


Fig.3 Profil schématique de l'organisation géologique du sous-sol de la région étudiée (source Cemagref)

- Pédologie

Ainsi, le bassin est essentiellement recouvert de limons de plateau d'origine loessique de l'ordre de 2 m d'épaisseur (mais pouvant atteindre 10 m d'épaisseur, par endroit). D'après des études internes au Cemagref (Augeard et al., 2005-2006), on a une première approximation des paramètres de sol (perméabilité, porosité de drainage, ...) au niveau du bassin versant de Goins. On considère que le sol a une relativement faible perméabilité pouvant potentiellement entraîner la formation de nappes perchées temporaires en hiver. La texture du sol est limono-sableuse à limono-argileuse avec présence d'hydromorphie temporaire. Ces sols lessivés peuvent être divisés en trois sous-unités suivant des textures de leurs horizons de surface et de leur taux d'argile différents. On considère ces évolutions de sol comme étant issues de l'érosion, dû fait de leur répartition le long de topo-séquences à relativement faible pente. Ainsi, (cf fig.4) de l'amont vers l'aval, il se présente des sols lessivés typiques (« limons blancs » de plateau), des sols lessivés tronqués par l'érosion (« rougettes ») et des sols lessivés épaissis par des apports colluviaux (« limons blancs » colluviaux).

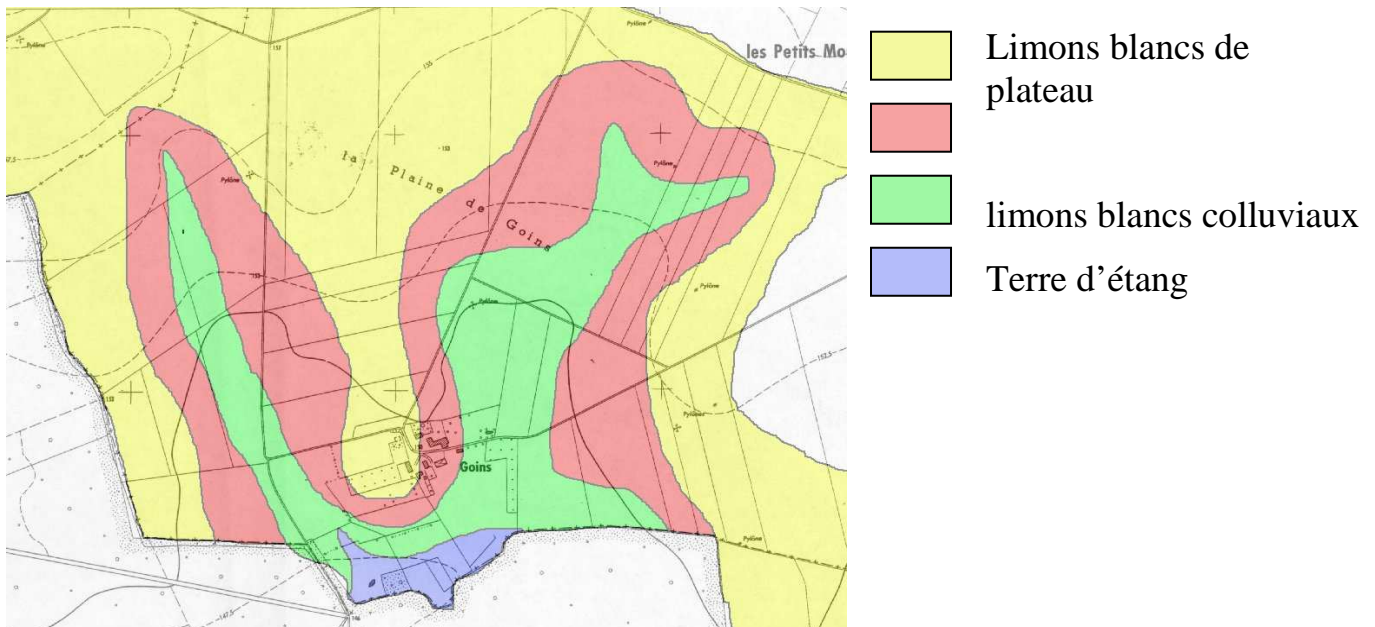


Fig. 4 Carte pédologique du site de Goins (1/25000) (source Cemagref)

- Hydrogéologie

Dans le bassin versant de l'Orgeval, il existe deux types d'aquifère. Une nappe relativement profonde (vers 5 à 10 m de profondeur) de la formation de Brie à faciès calcaire et/ou meulière et une nappe superficielle et temporaire des limons (située à moins de 2 m de profondeur). En effet, des aquifères sont présents au niveau de la formation de Brie et sont utilisés pour des captages en eau. C'est le cas notamment aux alentours de Goins. Par contre, la présence de limons, impliquant des horizons parfois plus imperméables par endroit, permet la formation localement de nappes superficielles qui peuvent émerger en certains points. C'est au niveau de cette nappe perchée que se trouvent des drains utilisés pour son rabattement. Il est à noter qu'en période humide (période hivernale), cette nappe peut atteindre temporairement la surface du sol. En outre, il est possible que des connexions existent entre la nappe de Brie et la nappe perchée dues, par endroit, à l'absence d'une limite imperméable entre les deux. En effet, les couches, spatialement, sont hétérogènes et permettent une

interaction entre les deux. Ainsi, il est alors possible que la nappe de Brie puisse remonter pendant l'hiver. Enfin, il est à noter la présence possible par endroit d'un aquifère encore plus profond que la nappe de Brie, l'aquifère de Champigny, séparé d'elle par une limite imperméable, les marnes supragypseuses.

- Le site d'étude : le bassin versant de Goins

Le bassin versant de Goins, entièrement agricole et fortement anthropisé, a un pourcentage de parcelles drainées supérieur à 90 %. Nous allons étudier, ici, plus particulièrement une de ces parcelles (cf Fig.5). Elle a une superficie de l'ordre de 18000 m². Elle correspond à 1,5 % de la superficie totale du bassin versant.



Fig.5 Photos aériennes des parcelles agricoles de Goins
(source Cemagref)

c. objectifs du drainage dans les zones d'excès d'eau temporaire

Dans les régions tempérées le drainage a pour but de lutter contre les excès d'eau et l'engorgement des sols en saison humide par un rabattement de la nappe (cf Fig.6, une plus grande zone non saturée permet un développement plus important des racines et ainsi un meilleur rendement agricole). Le drainage est constitué d'un réseau enterré, des drains connectés aux collecteurs, et de fossés à ciel ouvert. Le réseau de drain est conçu à l'échelle de la parcelle. L'écoulement va des drains jusqu'à un exutoire du réseau, la rivière ou un fossé d'évacuation à ciel ouvert. Lors d'un excès d'eau temporaire, le drainage se décompose en trois périodes :

- une « saison d'amorce », de l'automne jusqu'au début de l'hiver, correspondant à une réhumectation des sols, à la constitution de la nappe et à une amorce d'écoulements dans le réseau
- une « saison de drainage intense », de mi-décembre à fin février, avec une réponse rapide de l'écoulement à chaque épisode pluvieux
- une « saison de drainage de printemps », de la fin de l'hiver jusqu'à l'automne, caractérisé par un tarissement de la nappe.

Concernant plus précisément la « saison de drainage intense », lors d'un événement pluvieux il se produit deux phases distinctes. Il apparaît un « débit de pointe » où pour une séquence pluvieuse la réponse du réseau se fait rapidement et de façon brève. Le débit est influencé. Il est alors pendant quelques heures de l'ordre du mm/h. Puis, il se succède la phase de « débit de tarissement ». Elle correspond à la fin de la pluie. L'infiltration s'arrête, le débit est non influencé. Il devient relativement plus faible et ceci pendant plusieurs jours.

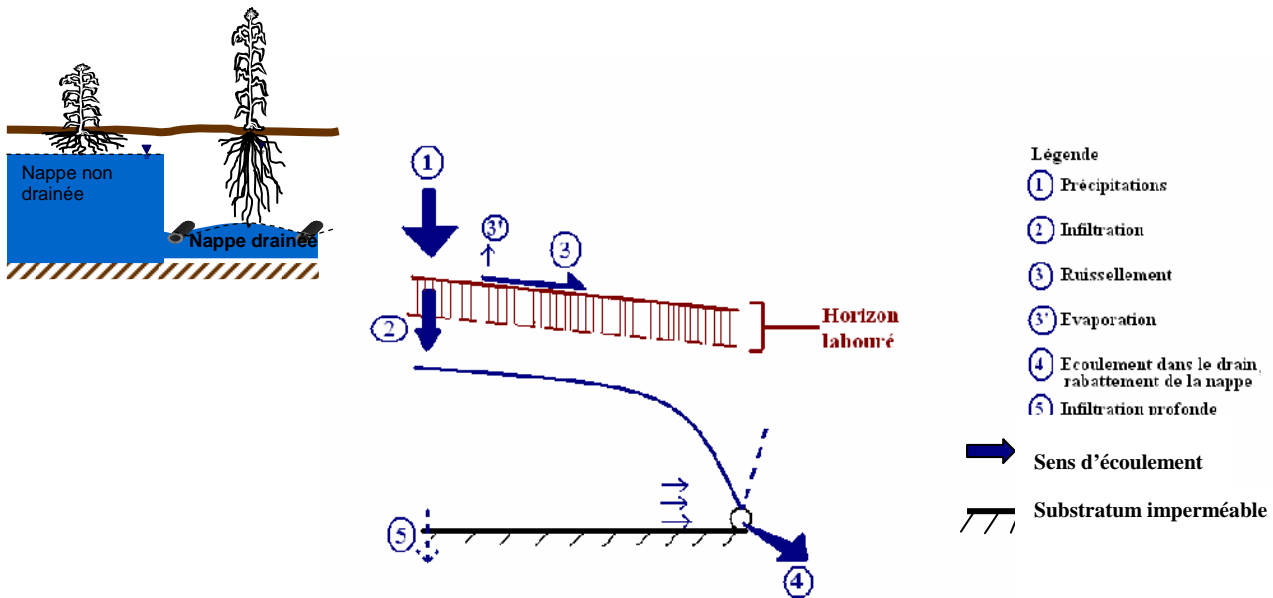


Fig.6 Schéma du rabattement de la nappe

La présence de conduites enterrées induit un rabattement de la nappe (cf Fig.6). La pluie arrive sur la parcelle agricole. Elle s'infiltré dans le sol et forme une nappe perchée due à la présence d'un substratum imperméable plus en profondeur. Ce qui n'est pas infiltré ruisselle à la surface du sol. Il est possible de noter parfois de l'évaporation, ainsi que dans certains cas une infiltration vers une nappe située plus en profondeur (infiltration profonde). Puis l'écoulement se fait de la nappe vers les conduites enterrées ou vers les fossées à ciel ouvert. Cet abaissement de la nappe ainsi formée est favorable aux cultures agricoles car la zone non saturée augmente (Wiskow et al., 2003). Mais parfois le dimensionnement du réseau de drainage n'est pas bien adapté aux conditions environnementales et hydrologiques et le fonctionnement de ce dernier en devient particulier.

Voici un exemple de problème de drainage sur la parcelle de Goins étudiée.



Fig.7 Photo de l'aval de la parcelle de Goins étudiée, mois de février
(source Cemagref)

D'après des observations de terrain réalisées durant la période hivernale, au mois de février, on remarque que l'eau s'accumule au niveau de points bas. Il est à noter que la topographie joue un rôle important sur le drainage (Ritzema, 1994). En effet, l'eau a tendance à s'accumuler au niveau de points bas même si le sens théorique de l'écoulement de la nappe et des drains est inverse à la pente. Ainsi, une parcelle mal ou non drainée peut engendrer une accumulation d'eau en surface. Ceci entraîne la formation de flaques à la surface du sol. On observe, par exemple, ce phénomène en lisière de forêt sur le site de Goins à proximité du collecteur instrumenté (cf Fig.7). Ceci se produit principalement en hiver, mais aussi après des épisodes pluvieux prolongés ou relativement intenses. En plus de l'infiltration, il se crée alors du ruissellement. Ce dernier se voit notamment au niveau des dérayures des champs gorgés d'eau qui laissent apparaître des flaques (Fig.7).

Ainsi, le bassin versant de Goins peut se présenter comme une relativement bonne zone d'étude du drainage agricole enterré.

2) Données de terrain et caractéristiques du réseau de drainage enterré

a. Données de terrain utiles à l'étude et commentaires

- Mesures existantes sur la zone d'étude

Au niveau du bassin versant de Goins et plus particulièrement au niveau de la parcelle étudiée, il existe de nombreuses mesures (cf fig.8). On dispose de mesures de débits au niveau du collecteur à l'aval de la parcelle étudiée, des hauteurs de nappe au niveau de la parcelle, ainsi que des mesures de débits et de hauteur d'eau à l'aval du réseau au niveau du fossé d'évacuation. De plus, il existe également des mesures pluviométriques sur le site d'étude.

Légende

- limite du bassin versant de Goins
- collecteur instrumenté

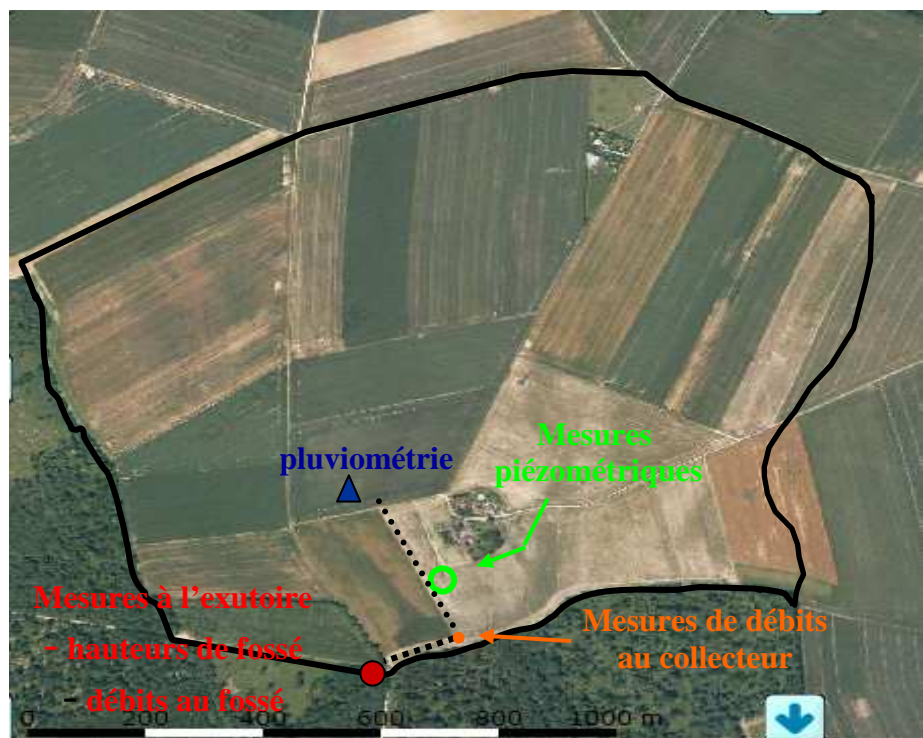


Fig.8 Photo aérienne du bassin versant de Goins avec l'emplacement des différentes mesures sur le terrain
(Source Cemagref)

- Des données relativement récentes



A l'aval du collecteur de la parcelle considérée se trouve une station de mesures de débits en fonction du temps. Les mesures s'effectuent au moyen d'un débitmètre électromagnétique. Ce collecteur est instrumenté depuis le 10 novembre 2006 (Fig.9).

Fig.9 Suivi du collecteur (parcelle étudiée)
(source Cemagref)

Depuis le 13 décembre 2006, six piézomètres, notés PZ1 à PZ6 ont été installés au niveau de cette parcelle (Fig.10). Ils sont espacés de 1,5 m et ont une longueur totale de 1,5 m avec 0,6 m de crépine. La profondeur utile est de l'ordre de 1,2 m. Nous avons pu exploiter les variations de hauteurs piézométriques de PZ1, PZ2, PZ3 et PZ5.



Fig.10 Suivi piézométrique de la nappe superficielle
(source Cemagref)

Au niveau de l'exutoire du bassin versant de Goins, une station limnimétrique est en place depuis novembre 1998. Elle recueille les données de hauteur d'eau dans le fossé en fonction du temps par un système de flotteurs. Le débit est mesuré à l'aide d'un déversoir en «V» (Fig.11).



Fig.11 Station de mesures au fossé d'évacuation,
exutoire du bassin versant de Goins (source Cemagref)

Les données pluviométriques disponibles commencent en septembre 2006 et correspondent à un échantillonnage à pas fixe de 60 min.

- Commentaires sur les données de terrain

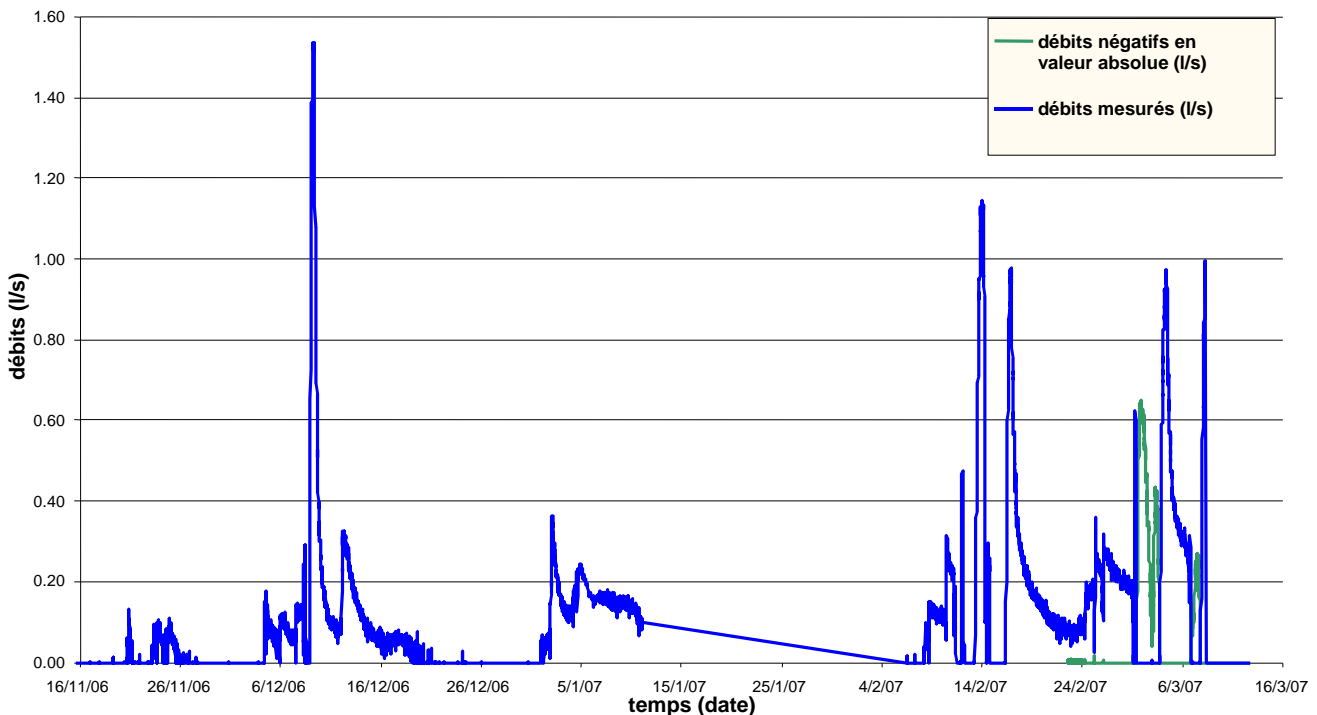


Fig.12 Evolution du débit au collecteur en fonction du temps

Les données de débit à l'aval du collecteur sont relativement récentes (cf. Fig.12). Du 16 novembre 2006 au 8 février 2007, on remarque une succession de pics de crue entre coupés de périodes sans données. Du 6 décembre jusqu'au 20 décembre 2006, notamment, on remarque une période de crue composée d'une succession de pics plus ou moins importants avec des pointes de débits de l'ordre de 0,2-0,3 l/s mais pouvant aller jusqu'à plus de 1,55 l/s (observé le 10 décembre). On dénote l'absence de mesures par exemple entre le 22 décembre et le 31 décembre 2006 ou encore du 15 janvier au 4 février 2007. Bien que durant ces périodes il n'y ait pas d'enregistrement de mesures, on suppose qu'il se produit toujours des écoulements dans les conduites. En effet, étant en période de drainage intense (Ritzema, 1994), de l'eau circule en permanence dans les conduites. C'est ainsi que l'hypothèse de débits négatifs au sein des drains lors de telles périodes est posée. Il est probable que des conduites en charge recevant un trop grand apport d'eau refluent cette dernière dans la nappe environnante ; ceci produit alors un écoulement inverse et ainsi un débit négatif. En effet, initialement, les écoulements se font de la nappe aux drains et d'amont en aval. A partir du 8 février 2007, le dispositif est modifié afin de mesurer ces débits négatifs. C'est ainsi qu'on en observe du 1 au 8 mars 2007. Comme on peut le voir au 1 mars 2007, ces débits négatifs peuvent atteindre, en valeur absolue, plus de 0,6 l/s. Ils semblent faire partie d'une relativement longue période (du 10 février au 8 mars 2007) à fort débits au sein du collecteur avec une succession de pics de crue de l'ordre de 1 l/s et pouvant aller jusqu'à 1,15 l/s, observé vers le 14 février. Ce sont ces phénomènes de débits négatifs que l'on va chercher à caractériser afin de voir la capacité de rétention de la nappe et du réseau de drains lors de périodes de crue. On s'attarde donc sur cette période de février-mars 2007 (Fig.13).

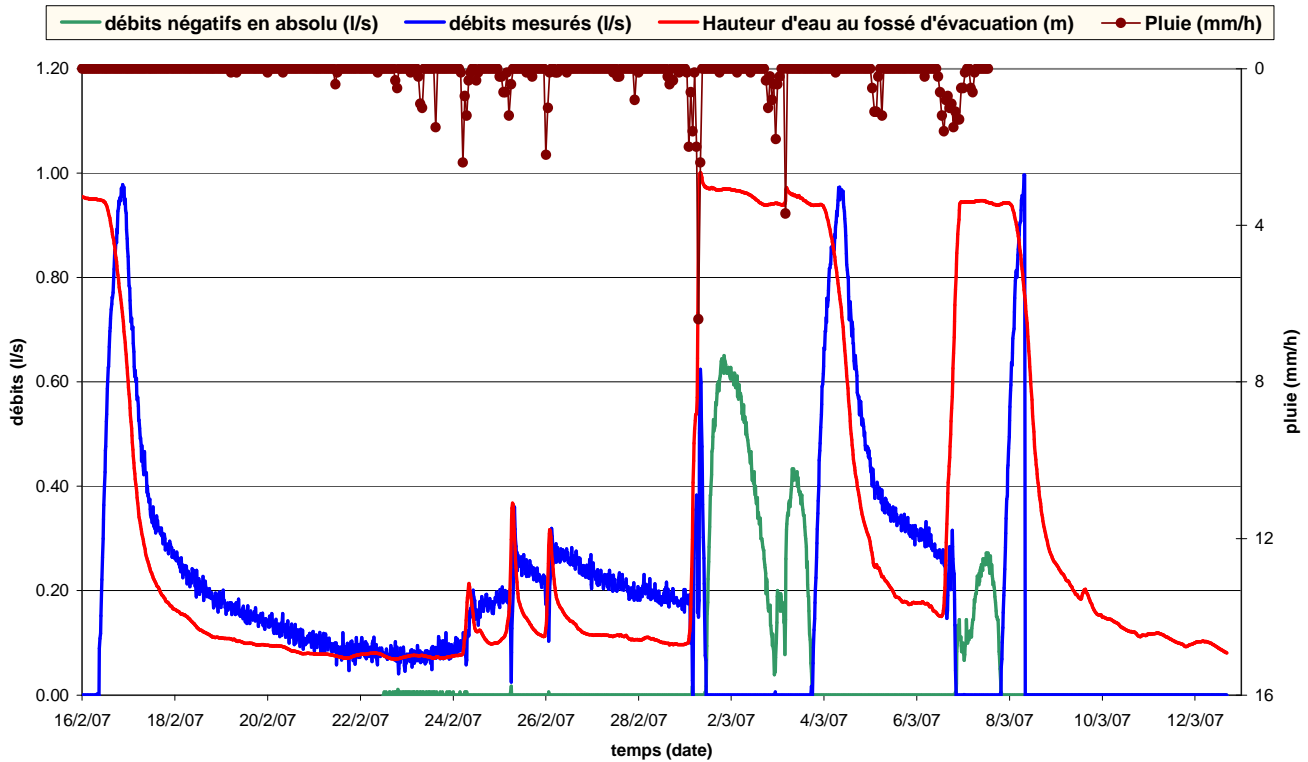


Fig.13 Evolution du débit au collecteur du 16/02/07 au 13/03/07, limnigramme à l'exutoire du réseau et données pluviométriques

En regardant plus précisément l'évolution des débits au collecteur en fonction du temps du 16 février au 13 mars 2007 (cf. Fig.13), on observe bien une succession de pics de crue allant de 0,3 l/s vers le 26 février à près de 1 l/s le 17 février, le 6 et le 8 mars 2007. Ces pics sont en général suivis de périodes de tarissement, telles qu'on peut le voir du 17 au 23 février 2007. Pendant cette période, on dénote également deux épisodes de débits négatifs, l'un du 1 au 4 mars et un deuxième du 7 au 8 mars. Ils se présentent sous forme de trois pics, deux lors de la première phase avec des débits pouvant aller jusqu'à plus de $-0,6$ l/s le 1 mars et $-0,4$ l/s le 4 mars ainsi qu'un pic le 7 mars de l'ordre de $-0,3$ l/s.

Sur ce graphique, se trouvent également les précipitations. Elles peuvent atteindre près de 6 mm/h, observé le 1 mars. On remarque que, de manière générale, lorsqu'il se produit des précipitations, les débits au collecteur augmentent instantanément. En effet, pour les trois pics de crue observés vers le 26 février, on dénote des pics de précipitations associés de l'ordre de 2 mm/h. De même, lors de la première phase de débits négatifs, on remarque deux pics de précipitation relativement brefs et intenses. Le premier est de l'ordre de 6 mm/h et le second de 4 mm/h. Lors de la deuxième phase de débits négatifs, on remarque la présence de précipitations de relativement faible valeur (de l'ordre de 1,5 mm/h) mais qui dure dans le temps (du 7 au 8 mars). Il est à noter qu'on observe également une succession de pics de précipitation le 5 mars de relativement faible intensité (de l'ordre de 1 mm/h). Or, durant cette période, on remarque une phase de tarissement. Il est probable que ces précipitations puissent avoir des répercussions sur cette dernière en ayant comme conséquence de la retarder.

Ainsi, il semble exister une relation entre les précipitations et l'évolution des débits au collecteur par une réponse instantanée de l'écoulement dans les conduites suivant l'apport d'eau issu de ces précipitations. Il se pourrait que les débits négatifs se produisent lors de précipitations brèves mais intenses, mais aussi qu'ils se produisent lorsqu'elles sont de relativement moins forte intensité mais continues dans le temps.

Des mesures de hauteur d'eau au fossé d'évacuation du réseau et ainsi à l'exutoire sont également observables du 16 février au 13 mars. Ces hauteurs sont comprises entre 0,10 et 0,95 m. On remarque que lorsqu'il apparaît des pics de crue, les hauteurs d'eau au fossé augmentent de façon relativement importante. C'est le cas notamment aux environs du 26 février où trois pics de crue de l'ordre de 0,2-0,3 l/s sont observés. En phase avec ces trois pointes de débit, on remarque que les pics de hauteur d'eau sont respectivement de 0,21, 0,38 et 0,32 m. De même, on note que lors des phases de tarissement les hauteurs d'eau du fossé d'évacuation diminuent également très sensiblement. En outre, pendant les périodes de débits négatifs, le niveau de l'eau à l'exutoire reste proche d'un seuil très élevé. Durant quelques jours, du 1 au 4 mars et du 7 au 8 mars 2007, les hauteurs d'eau du fossé d'évacuation sont de l'ordre de 0,95 m avec quelques variations lors de la première phase de débits négatifs à mettre probablement en relation avec les variations remarquables de débits durant cette période, divisée en deux phases distinctes de pics de débits négatifs. Ainsi, il semble exister une corrélation entre l'évolution des débits au collecteur et les hauteurs d'eau à l'aval. En effet, on considère qu'il existe une capacité limitée d'évacuation de l'eau du réseau sous certaines conditions et notamment sous une influence aval du niveau d'eau du fossé d'évacuation (Nédélec, 2005).

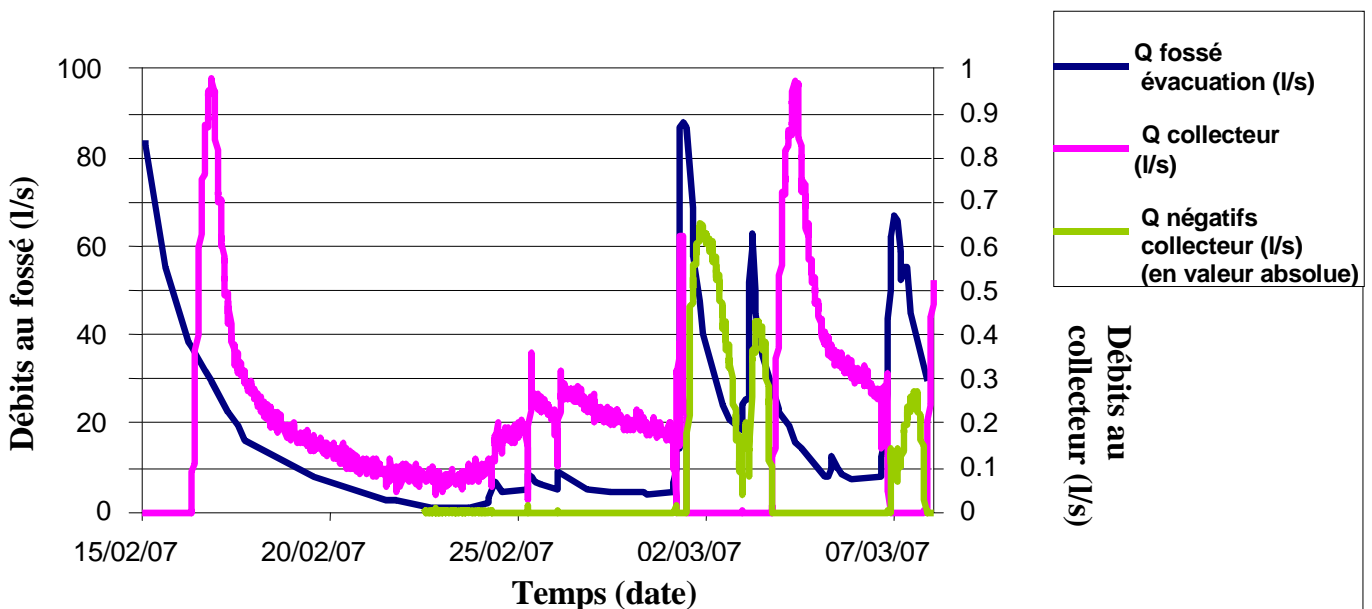


Fig.14 Evolution des débits à l'aval du réseau en fonction du temps

Toujours à l'aval du réseau de drainage, on peut voir l'évolution dans le temps des débits au niveau du fossé d'évacuation (cf Fig.14). On remarque que ces derniers sont 100 fois plus importants que les débits mesurés au collecteur. La chronique présentée commence par une phase de tarissement du 15 au 24 février suivie vers le 25 et 26 février d'une succession de trois pics de crue de l'ordre de 10 l/s. Le 1 et le 4 mars, on observe deux pics de crue de l'ordre de 90 l/s et de 60 l/s respectivement. Le 6 mars, on remarque un pic de crue de relativement faible intensité (de 13 l/s environ), puis un dernier pic de crue le 7 mars de 67 l/s environ. En comparaison avec les débits au collecteur, il semblerait que ce dernier soit parfois déconnecté du reste du réseau. En effet, on mesure des pics de débit au collecteur qu'on ne retrouve pas à l'aval au niveau du fossé d'évacuation. C'est le cas notamment du pic de crue du 17 février de près de 1 l/s ou encore celui du 5 mars de même valeur. Il se produit également un léger pic de débit à l'aval du réseau le 6 mars, de 13 l/s environ, alors qu'on se trouve en phase de tarissement au collecteur. En ce sens, le collecteur ne semble pas réagir tout le temps de la même manière que le reste du réseau. Il est à savoir qu'il arrive au fossé d'évacuation d'autres apports d'eau que celui issu du collecteur instrumenté. Ainsi, il est

probable que les débits observés dans le fossé ne correspondent pas forcément à une seule et unique réponse, celle du collecteur étudié. De plus, la période de tarissement observée vers le 6 mars pourrait être considérée comme une « fausse » période de tarissement sachant que, d'après la Fig.13, il se pourrait que cette dernière soit retardée par un apport de précipitations. Il se pourrait que le système réagisse à l'aval par un relativement faible pic de débit en réponse au fonctionnement du réseau à cette période. De surcroît, lorsqu'on observe des débits négatifs au collecteur, on note la présence de pics de crue à l'aval du réseau les 1, 4 et 7 mars 2007 justifiant d'une arrivée importante d'eau dans le réseau durant ces périodes.

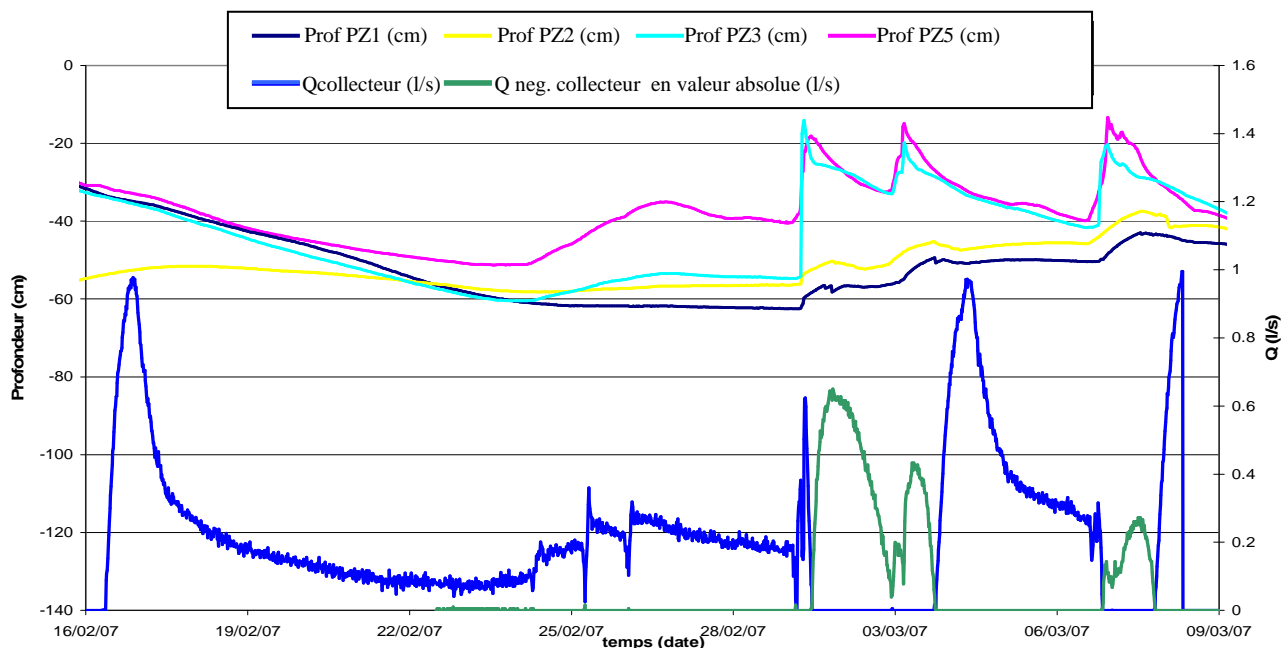


Fig.15 Evolution des hauteurs piézométriques en fonction du temps

Tout d'abord, il est à noter que, théoriquement, les piézomètres PZ1 à PZ5 sont respectivement du plus proche au plus éloigné d'un des drains de la parcelle considérée.

D'après les données de PZ1 (cf Fig.15), la nappe, près d'un des drains, est comprise entre 0,3 et 0,6 m de profondeur. Légèrement plus loin du drain, avec PZ2, on observe une hauteur de nappe variant dans le temps de 0,4 à 0,55 m de profondeur. Puis, plus on s'éloigne du drain et plus la nappe se rapproche de la surface. C'est ainsi que l'on observe des hauteurs de nappe pouvant atteindre 0,15 m de profondeur le 1, 4 et 7 mars d'après PZ5. De manière générale, on remarque bien une tendance caractéristique du rabattement de la nappe vers le drain. En effet, plus on s'éloigne du drain et plus les hauteurs de nappe sont élevées et proches de la surface.

Mais il est à noter certaines anomalies quant à l'évolution des hauteurs piézométriques entre elles. En effet, on remarque que, du 16 au 25 février, PZ2 indique des hauteurs de nappe plus profondes (de l'ordre de 0,55 m) que celles de PZ1 (allant de 0,3 à 0,6 m durant cette période). Il en va de même entre les courbes PZ3 et PZ1 où cette dernière, bien qu'ayant des valeurs de hauteurs piézométriques relativement proche de celle de PZ3, soit au dessus d'elle. Ceci semble indiquer une forme de nappe atypique durant cette période. Au niveau du collecteur, on passe d'un pic de crue le 17 février à une phase de tarissement. Puis, à partir du 25 février, on remarque une organisation de la nappe différente avec une nappe plus profonde proche du drain, représentée par PZ1 et de plus en plus proche de la surface en s'éloignant du drain, correspondant à PZ5. De plus, à partir du 25 février, on peut classer l'évolution des hauteurs piézométriques en deux catégories distinctes. En ce qui concerne PZ3 et PZ5, on remarque que les 1, 4 et 7 mars, lors de pointes de débits négatifs au collecteur, il se produit

des pics de remontée des hauteurs piézométriques allant de 0,4 à 0,2 m de profondeur environ et avec un abaissement de la nappe lorsque les pics de débits négatifs diminuent et laissent place à du débit positif.

Concernant PZ1 et PZ2, les variations des hauteurs piézométriques se font de manières différentes de celles de PZ3 et PZ5. Lors des pics de débits négatifs, on remarque que PZ1 et PZ2 augmentent à chaque fois par paliers séparés de 0,05 à 0,1 m, allant par exemple pour PZ1 de 0,65 à 0,45 m de profondeur. Ce phénomène particulier, par rapport au reste du système de nappe, laisserait présager la présence d'une nappe locale différente. En effet, il est probable qu'un écoulement d'eau du drain vers le sol remplisse ou forme une nappe temporaire localement. Si cet apport se produit à différents instants, ceci peut impliquer l'augmentation de cette nappe formée et ainsi justifier d'une évolution par palier des hauteurs piézométriques. Par contre, entre PZ1, PZ2 et PZ3, PZ5, peu d'éléments peuvent nous renseigner sur leurs différences de comportement.

En plus d'utiliser les données de terrain de Goins, une reconstitution du réseau de drainage la plus réelle possible est nécessaire afin de représenter au mieux le fonctionnement hydraulique du site d'étude.

b. caractéristiques du réseau de drainage enterré

Les réseaux de drainage étant constitués de conduites enterrées, il n'est pas facile de les situer en l'absence de plans précis. Des photos aériennes ainsi que des plans de géomètres ou du cadastre peuvent nous renseigner sur l'emplacement des drains et des collecteurs, mais de nombreux paramètres nécessaires à l'étude sont à déterminer.

Afin d'utiliser Xirene, on doit connaître certains paramètres hydrauliques du réseau tels que le diamètre des conduites, leur pente et le coefficient de Manning-Strickler. D'autres paramètres hydrauliques en relation avec la nappe adjacente sont également importants, la distance entre les drains et leur profondeur. Il faut également connaître l'orientation et la longueur des drains.

L'emplacement et l'orientation ainsi que la distance entre chaque conduite ont été déduites de photos aériennes récentes et d'un plan de géomètre de 1975 (extrait de plan de géomètres, 1975). D'après le plan, l'espacement entre les drains est fixée à 10 m. De même, la profondeur des conduites a été déterminée grâce aux indications du plan de géomètre et est en adéquation avec les règles de construction de réseaux de drainage enterré (Ritzema, 1994). Elle a été fixée à 0,8 m. En ce qui concerne la longueur des conduites, elle dépend de leur emplacement. Les drains ont été placés de telle manière à occuper la largeur de la parcelle drainée. La longueur moyenne des drains est de 100 m environ. La pente des drains est de 1/1000 et celle du collecteur est de 1/4000. Suivant la pente et la profondeur, les altitudes des extrémités de chaque conduites et des jonctions ont été calculées d'après la topographie de la carte IGN de Coulommiers au 1/25000 (Carte IGN Coulommiers, 1970). Ces valeurs, à priori théoriques, sont considérées comme étant représentatives de la réalité. Il en va de même pour le diamètre des conduites. Le diamètre des drains est fixé à 0,06 m, le diamètre du collecteur est de 0,10 m en amont du réseau et de 0,16 m à l'aval. Le coefficient de Manning-Strickler est fixé à $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. De manière générale, des conduites récentes ont un coefficient de Manning-Strickler de l'ordre de $60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. On considère, ici, sachant que le plan date de 1975, que les conduites doivent avoir une rugosité plus importante due à l'ancienneté du réseau de drainage. Ainsi, une fois tous ces éléments fixés, on intègre ce réseau de drainage enterré sur un SIG, QGIS et on cherche à modéliser son fonctionnement hydraulique.

c. création du réseau de drainage sur un SIG : QGIS

On crée sur un SIG QGIS, le réseau de drainage enterré ci-dessous.

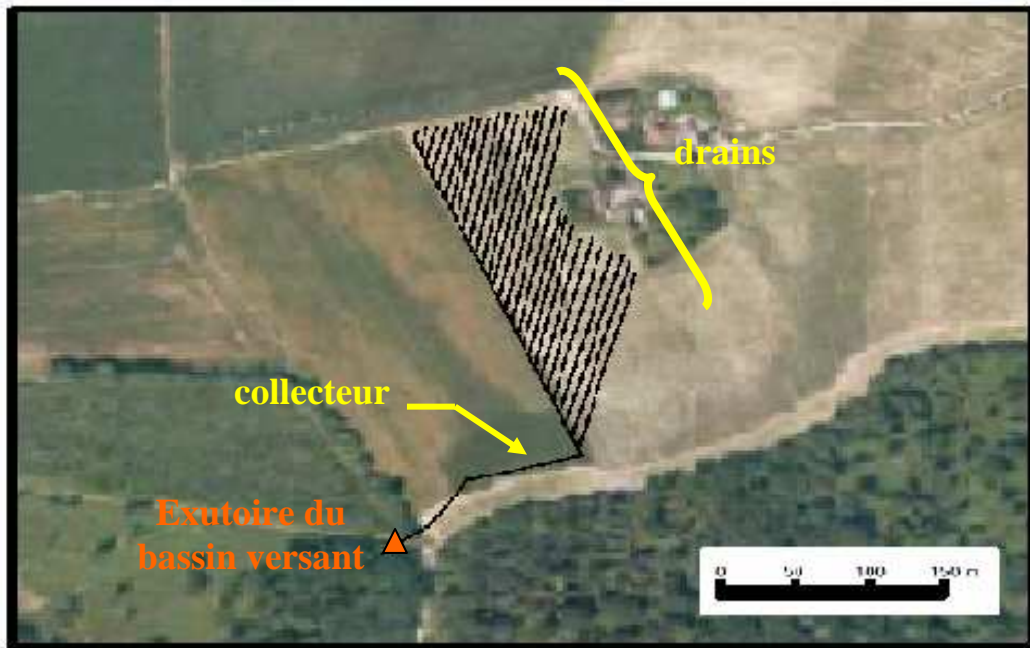


Fig.16 Constitution du réseau de drainage enterré sur le SIG QGIS

Sur la parcelle considérée (cf Fig.16), d'une superficie de 18000 m², se trouvent vingt-huit drains parallèles entre eux. Ils sont connectés à un collecteur situé en limite de parcelle. Ce dernier la parcourt de tout son long et rejoint le réseau principal qui va jusqu'au fossé d'évacuation (exutoire du bassin versant).

Le SIG QGIS est utilisé car il permet d'avoir une meilleure vision et une représentation directe du réseau de drainage agricole enterré sur la zone qui nous intéresse. Il permet de voir simplement les aires des surfaces étudiées ainsi que les longueurs des biefs dessinés. Il permet également de se repérer spatialement. Les données calculées par le SIG sont rentrées dans une base de données PostGIS reliée à une autre base de données PostgreSQL. Cette dernière est directement connectée au modèle Xirene, ce qui facilite la gestion d'un nombre relativement important de données à entrer dans le modèle hydraulique.

II) MODELISATION

1) Modèles nécessaires à l'étude

Afin de réaliser cette étude deux modèles élaborés au Cemagref sont utilisés, un modèle hydraulique à surface libre Xirene et un modèle de nappe perchée drainée Hydrowin.

a. Xirene : un modèle hydraulique à surface libre

Xirene (conçu au Cemagref par Michel Poirson, 1998) est utilisé dans le but de modéliser le comportement en crue du réseau de drainage enterré au niveau de la parcelle agricole étudiée (Da Conceicao, 2006).

Xirene est un modèle hydraulique fluvial 1D de réseau maillé. Il est basé sur la résolution des équations de Barré de Saint-Venant par discrétisation dans le temps et dans l'espace suivant la méthode des différences finies. En entrée, on rentre des hydrogrammes aux nœuds du réseau, c'est-à-dire en amont des conduites ou aux jonctions entre deux ou plusieurs conduites et des hydrogrammes latéraux, c'est-à-dire transversalement tout le long des drains. En sortie, il calcule des débits et des tirants d'eau (parfois assimilés à des pressions) en fonction du temps le long des sections des biefs considérés. Ceci se fait pour des écoulements transitoires et en régime fluvial uniquement. En plus d'écoulements torrentiels, il est à savoir qu'une deuxième condition limite fait arrêter la modélisation, des conduites à sec.

Il est à noter que les équations de Barré de Saint-Venant ne peuvent être utilisées uniquement que pour des écoulements à surface libre. Lorsque les écoulements passent en charge, Xirene prend en compte le modèle de la fente de Preissmann (1961) (Bourdarias, 2006). Au dessus de chaque conduite se trouve une fente fictive de faible largeur (de l'ordre du centimètre) ouverte et considérée en relation avec l'atmosphère. Ainsi, lorsque le réseau passe en charge avec des hauteurs d'eau supérieures au diamètre des conduites, la fente se remplit. Les écoulements en charge sont alors considérés comme des écoulements à surface libre. La différence est que dans un écoulement à surface libre la hauteur d'eau est inférieure au diamètre de la conduite alors que dans un écoulement en charge avec le modèle de la fente de Preissmann la hauteur d'eau est supérieure au diamètre de la conduite et est assimilée à la pression dans la conduite en hauteur de colonne d'eau.

Plus précisément, les équations de Barré de Saint-Venant (1871), unidimensionnelles et non linéaires, se vérifient dans les questions d'hydraulique fluviale. Elles sont utilisées pour des écoulements à surface libre graduellement et rapidement variés. Elles sont au nombre de deux, une équation de continuité et une équation fondamentale de la dynamique, appliquée en chaque section droite :

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial (-Q)}{\partial x} + q \quad (1) \text{ équation de continuité}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial [\beta (Q^2/S)]}{\partial x} - g S \frac{\partial Z}{\partial x} - g S J + \varepsilon q (Q/S) \quad (2) \text{ équation dynamique}$$

avec $\frac{\partial}{\partial t}$ dérivée partielle par rapport au temps t
 $\frac{\partial}{\partial x}$ dérivée partielle par rapport à l'abscisse x traversant la section droite
 S surface mouillée (m²)
 Q débit (m³/s)

Z	cote de la surface libre (m)
J	pente de charge par unité de longueur
q	débit latéral par unité de longueur (m ³ /s/m)
β	coefficient de quantité de mouvement
g	accélération de la pesanteur (m ² /s)
ε	0 si apport de débit latéral ou 1 si fuite

Elles peuvent être appliquées en respectant certaines conditions :

- l'écoulement est graduellement varié
- la pression est hydrostatique
- le fluide est supposé incompressible, la masse volumique est constante
- les pertes par frottement sont considérés comme des pertes de charge
- la distribution des vitesses sur une section mouillée est supposée uniforme
- la pente moyenne du fond i est considérée comme faible, soit $\sin i = \tan i = i$.
- la ligne d'écoulement des fluides est de faible courbure.

Les équations de Barré de Saint-Venant font intervenir des dérivées dans le temps et dans l'espace. Elles n'ont pas de solution analytique connue. La résolution de ces équations différentielles se fait alors par discrétisation selon la méthode des différences finies (cf annexe 1).

b. Hydrowin : un modèle de nappe perchée drainée

Hydrowin est un modèle de nappe 1D basé sur la résolution par la méthode des éléments finis des équations de Boussinesq (1904). On donne, en entrée, deux paramètres invariants, la perméabilité et la porosité de drainage, et en variables de forçage, les précipitations et une condition limite aval correspondant à la hauteur de nappe à l'aplomb du drain. Il est à savoir que le système correspond en réalité à un drainage par un fossé dont le fond est au niveau de l'imperméable. Ainsi, le drain est assimilé à ce fossé, ce qui constitue une approximation de la représentation. En sortie, Hydrowin calcule, à un pas de temps horaire, le débit de nappe en connexion avec le drain ainsi que les hauteurs piézométriques dans la nappe.

Les équations de Boussinesq sont utilisées dans des modélisations de drainage en milieu saturé. Elles sont au nombre de deux, une équation de continuité correspondant à un bilan hydrique et une équation fondamentale de la dynamique correspondant à la loi de Darcy (Bouarfa, 1995).

$$\delta q(x,t)/\delta x = R(y,t) - \mu(\delta y/\delta t) \quad (2) \text{ équation de continuité}$$

$$q(x,t) = - \int_0^{y(x)} K(z) [\delta \Psi_t(x,t)/\delta x] dz \quad (1) \text{ équation dynamique}$$

avec	$\Psi_t(x,t)$	potentiel total de l'eau du sol (m)
	$K(z)$	conductivité hydraulique horizontale du sol (m/s)
	$q(x,t)$	volume d'eau traversant la section d'abscisse x (m ³)
	$R(y,t)$	recharge issue des précipitations (mm/h)
	$y(x)$	hauteur de nappe à l'abscisse x à partir du toit de l'imperméable (m)
	μ	porosité de drainage

La loi de Darcy est généralement utilisée dans les écoulements en milieu poreux. Elle est valide pour une large gamme de flux et notamment lors d'études d'écoulements dans des sols agricoles. Mais, afin de pouvoir utiliser les équations de Boussinesq sous cette forme, plusieurs hypothèses doivent être vérifiées :

- le toit de l'imperméable est supposé horizontal
- le flux vertical à travers l'imperméable est négligeable
- le flux horizontal à l'interdrain est considéré nul
- la charge hydraulique est considérée nulle au drain
- le sol est supposé homogène et isotrope (pas de variations spatiales de la conductivité hydraulique et la porosité de drainage doit être homogène dans l'espace)
- l'hypothèse de Dupuit selon laquelle l'écoulement dans la zone saturée d'un système drainé est horizontal

Il est possible de simuler des débits négatifs avec Hydrowin. Généralement, les débits négatifs sont générés par une hauteur d'eau dans le fossé (assimilé au drain) plus élevée que la hauteur de nappe juxtaposée. Ceci a pour conséquence d'engendrer un écoulement du fossé vers la nappe.

Cette étude basée sur un cas réel de drainage agricole nécessite un certain nombre de données et une relativement bonne reconstitution du réseau afin de simuler des phénomènes dans des conditions les plus proches possibles de la réalité.

2) Aspects pratiques de la modélisation

a. organisation des entrées des données dans Xirene

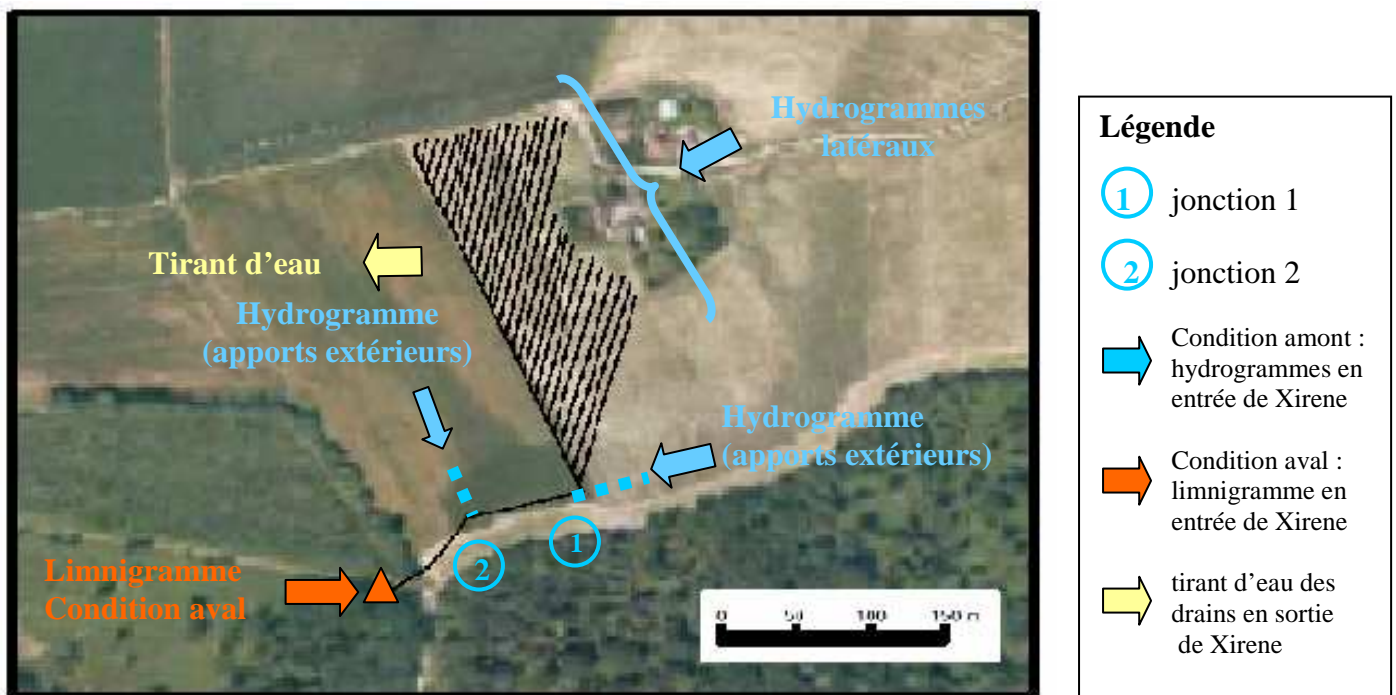


Fig.17 Mode d'entrée du jeu de données dans Xirene

Tout d'abord, le réseau ainsi créé ne représente pas entièrement la réalité. En effet, ce dernier n'est pas constitué que d'une seule parcelle mais de la totalité du bassin versant. Il existe ainsi d'autres collecteurs que celui considéré.

Un deuxième réseau, provenant de la partie nord du bassin versant, se jette également dans le fossé d'évacuation, indépendamment du collecteur dessiné Fig.17. On s'intéresse ici uniquement au réseau de drainage sud reconstitué ci-dessus. Au sein de ce réseau, une jonction se fait au niveau du collecteur instrumenté (jonction 1) correspondant au drainage des parcelles drainées à l'est de celle étudiée. Ces parcelles drainées et non modélisées représentent 13 % du bassin versant. Une deuxième jonction (jonction 2), toujours au niveau du collecteur reconstitué sur le SIG, correspond à l'arrivée d'eau de la parcelle à gauche de celle étudiée. Cette dernière représente 3,5 % du bassin versant. Sachant que la parcelle étudiée correspond à 1,5 % de la superficie totale, le reste du bassin versant de Goins représente 82 % de la superficie. Afin de modéliser au mieux le réseau considéré, il faut rentrer deux types d'hydrogrammes dans Xirene. En entrée du modèle, en condition amont, on entre à chaque nœud, situé aux jonctions considérées, des hydrogrammes représentant l'arrivée d'eau du reste des parcelles drainées non modélisées. Pour ce faire, on choisit de prendre l'hydrogramme mesuré au fossé d'évacuation, de lui appliquer un coefficient multiplicateur suivant la proportion de la superficie drainée par chaque zone du réseau, et de le réinjecter au niveau des jonctions. En condition aval, on entre le limnigramme mesuré au fossé d'évacuation, corrigée de la dénivelée du fond de fossé jusqu'au point de rejet (distant d'environ 0.113 m). A ceci s'ajoute en entrée un hydrogramme au niveau de chaque drain de façon latérale représentant l'interaction drain-nappe. Mais, le problème est que cette dynamique de transfert d'eau n'est pas directement mesurée. Ainsi, par le modèle de nappe, Hydrowin, on cherche à simuler ces échanges drain-nappe. Puis, l'hydrogramme obtenu en sortie d'Hydrowin est mis en entrée dans Xirene.

N'existant pas de couplage entre Xirene et Hydrowin, il sera effectué plusieurs itérations dans le but de converger vers une modélisation qui se rapprocherait le plus possible de la réalité.

b. modélisation d'un débit de nappe rentrant dans les drains : Choix des données d'entrée du modèle Hydrowin

A partir d'Hydrowin, on cherche à obtenir un débit de nappe afin de représenter l'interaction drains-nappe au niveau de la parcelle considérée. Sur cette dernière, les paramètres de sol, tels que la perméabilité et la porosité de drainage, sont peu voire mal connus. On estime, d'après des études en cours effectuées sur Goins par le Cemagref, que la perméabilité est de l'ordre de 0,012 m/h et que la porosité de drainage est de 2 % environ. En plus de ces paramètres, s'ajoutent des variables de forçage, les précipitations et les hauteurs de fossé (assimilé au drain) correspondant à la hauteur de nappe à l'aplomb du drain en fonction du temps. A première vue, le choix des hauteurs de fossé n'est pas trivial. Aucune donnée de hauteur de nappe n'est connue à l'aplomb d'un des drains de la parcelle. Il est à savoir qu'il existe des données piézométriques au sein de cette dernière fournies grâce à l'instrumentation des piézomètres PZ1 à PZ6. Il semblerait, d'après l'organisation des piézomètres, que ces derniers soient à proximité de l'un des drains, avec du piézomètre le plus proche PZ1 au plus éloigné PZ6. Ainsi, PZ1, étant le plus proche de l'un des drains, il semblerait le plus apte à suivre la hauteur de nappe au voisinage de ce dernier, même si on ne connaît pas la distance qui les sépare.

La première simulation se fait à partir des données brutes. On choisit une perméabilité de 0,012 m/h, une porosité de drainage de 2 %, un système où l'interdrain se situe à 5 m et la profondeur du fossé correspondant au drain est à 0,80 m. On considère également que le substratum imperméable se trouve juste sous le fossé afin de ne pas tenir compte

d'écoulements horizontaux sous ce dernier. Les précipitations correspondent aux données brutes relevées à Goins et on choisit les hauteurs de nappe fournies par PZ1, le tout du 18 février au 7 mars 2007. Au temps initial, on impose une forme de nappe elliptique représentant théoriquement la réalité (Bouarfa, 1995).

En sortie d'Hydrowin, on obtient des débits et des hauteurs de nappe en fonction du temps pour la demi-nappe simulée. Répartie sur un drain entier et appliquée à l'identique sur la totalité des drains de la parcelle, on obtient l'évolution des débits de nappe en fonction du temps pour toute la parcelle. On peut alors les comparer aux débits mesurés au collecteur à l'aval de cette dernière sachant qu'elle correspond à la partie du collecteur qui reçoit toutes les eaux des drains de la parcelle (cf Fig.18).

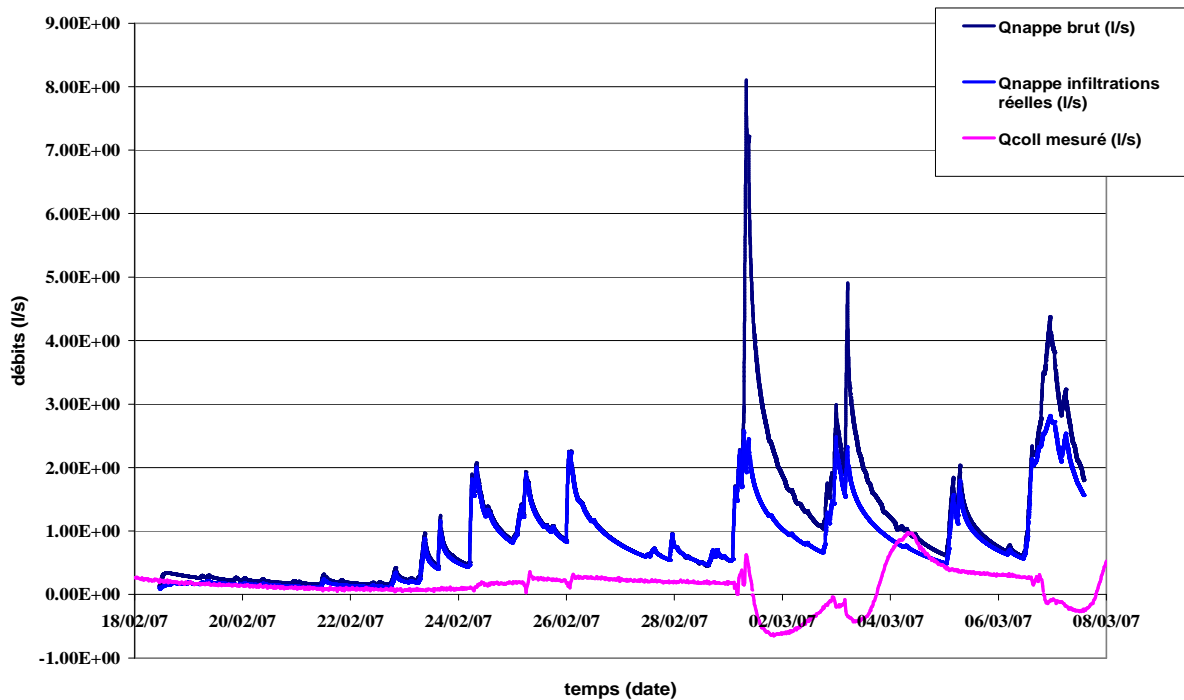


Fig.18 Evolution du débit de nappe en sortie d'Hydrowin en fonction du temps, itération 0

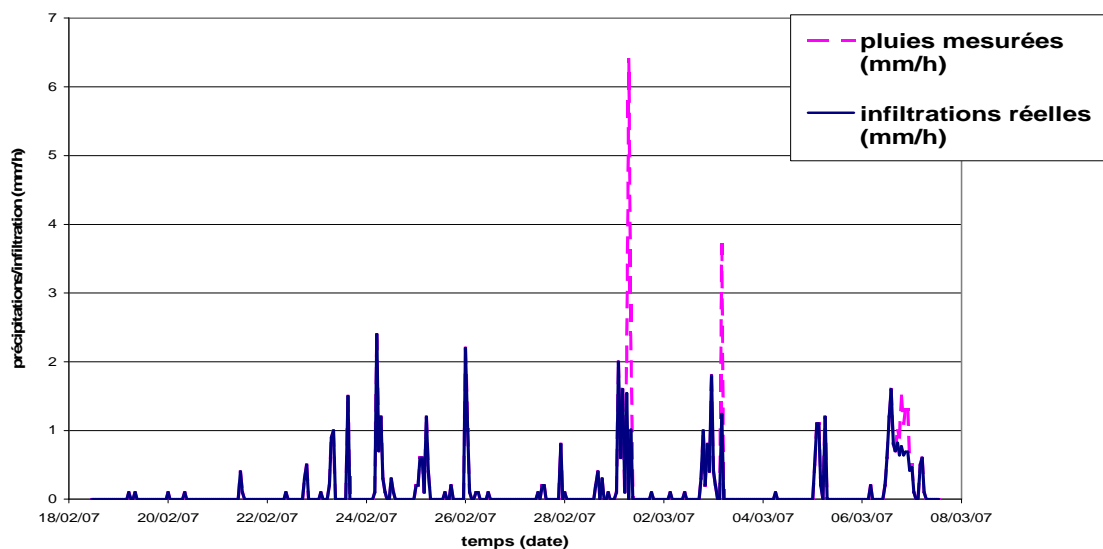


Fig.19 Evolution des précipitations brutes et des infiltrations réelles en fonction du temps

On remarque très nettement une différence significative entre les débits mesurés au collecteur instrumenté et les débits simulés (courbe Qnappe brut). Les valeurs de débits simulés sont comprises entre 0,5 et 8 l/s sans observer, à aucun moment, des débits négatifs. Lors de périodes de débits négatifs dans le collecteur instrumenté, on remarque que la simulation ne correspond pas du tout aux observations. Lorsqu'on mesure des débits négatifs au collecteur, on obtient par simulations des pics de débits positifs. C'est le cas, par exemple, entre le 1 et 2 mars 2007 où les débits mesurés passent de 0,5 à - 0,5 l/s environ alors que le pic de débit simulé atteint plus de 8 l/s. Il en va de même entre le 3 et le 4 mars 2007 où pour des débits mesurés de l'ordre de - 0,5 l/s, on observe des débits simulés de près de 5 l/s. En revanche, il semblerait que la simulation réagisse à chaque épisode de pluie en créant un pic de crue plus ou moins important suivant son intensité. En effet, on remarque que du 5 au 6 mars 2007 les débits simulés en sortie d'Hydrowin fournissent deux pics de crue de près de 2 l/s alors que les débits mesurés au collecteur tendent à être constants au cours du temps (de l'ordre de 0,4 l/s) durant cette période. Or, on note un épisode pluvieux durant cette période (cf Fig.18). Il semble alors nécessaire de revoir les données d'entrée afin d'approcher la simulation des débits de nappe aux mesures de débits au collecteur considéré. Pour ce faire, il faut trouver les paramètres les plus optimum possibles.

En ce qui concerne les paramètres de sol, perméabilité et porosité de drainage, on émet l'hypothèse qu'ils correspondent relativement bien au sol de Goins (milieu observé d'une texture limono-sableuse à limono-argileuse pouvant être considéré comme un sol semi-perméable acceptant alors cet ordre de grandeur de perméabilité et de porosité de drainage). Il semble alors préférable de ne pas les modifier d'une simulation à l'autre. De surcroît, l'organisation du drainage étant imposé par les plans de construction du réseau, on considère la géométrie du fossé fixe. Seules les données de précipitation et de hauteurs de fossé semblent pouvoir être modifiées.

Les modifications de données d'entrée d'Hydrowin qui paraissent être les plus efficaces et les plus cohérentes avec ce que l'on cherche à modéliser consistent à garder les hauteurs du piézomètre PZ1 sur la période considérée mais en considérant le drain en charge au départ. En effet, on considère qu'au départ de la simulation on se trouve au début d'une période de tarissement à la date du 18 février 2007 ; comme on part de la fin d'une pointe de crue, le temps initial de la simulation correspond au début du tarissement qui lui est associée. On suppose que PZ1 est proche du drain mais probablement pas juxtaposé à ce dernier. Ainsi, il se pourrait que ce piézomètre étant juste à côté du drain conserve l'allure de la déformation de la nappe à son voisinage, mais, étant probablement légèrement décalé, ses hauteurs peuvent être plus importantes que celles adjacentes au drain. On émet alors l'hypothèse qu'au début de la simulation le drain est en charge dû à ce pic de crue. On décale alors les données du piézomètre PZ1 avec au départ la hauteur initiale qui correspond au drain en charge soit $h = 0,06$ m (diamètre du drain). De plus, on impose des données de précipitations légèrement différentes. On admet qu'il puisse exister un refus d'infiltration. A certains moments, il se peut qu'il s'infilte moins que ce qu'il pleut. En effet, lorsqu'il se produit des épisodes pluvieux, une partie de l'eau s'infilte alors que l'autre ruisselle. Une étude parallèle en cours utilisant le modèle Hydrus fournit une infiltration réelle par rapport aux précipitations mesurées durant la période d'étude (cf Fig.19). C'est cette dernière, semblant être plus réaliste, qui a été choisie lors de cette simulation (cf Fig.18).

Tableau des paramètres et variables de forçage utilisés lors du choix du jeu de données initiales en entrée d'Hydrowin (cf Fig.18)

Qnappe brutes	Qnappe infiltrations réelles
K = 0,012 m/h	K = 0,012 m/h
$\mu = 2 \%$	$\mu = 2 \%$
Précipitations brutes	Infiltrations réelles
Hauteur du fossé : PZ1	Hauteur du fossé : PZ1 décalé

Au vu des modifications apportées (Qnappe infiltrations réelles), on remarque que certains pics de crue ont diminué (cf Fig.18) de deux à trois fois par rapport à l'hydrogramme issu de la simulation avec les données brutes (plus de 8 l/s contre 2,5 l/s entre le 1 et le 2 mars par exemple). On note également, au début de la simulation, que la courbe obtenue coïncide relativement bien avec l'hydrogramme des débits mesurés durant les trois premiers jours (du 18 février au 21 février 2007) avec des débits de l'ordre de 0,3 l/s, au début du tarissement. Par contre, lors des pics de crue du 23 février au 28 février 2007, on remarque que l'hydrogramme (Qnappe infiltrations réelles) se superpose à l'hydrogramme issu de la simulation des données brutes (Qnappe brut), mais aucunement avec l'hydrogramme mesuré au collecteur. Ainsi, durant cette période, soit la simulation sur-estime les débits de nappe, soit il apparaît une sous-estimation des débits mesurés au collecteur. De plus, bien que les débits aient diminué par rapport à l'hydrogramme brut, ces derniers ne coïncident toujours pas avec les débits observés à partir du 1 mars 2007 (période avec des débits négatifs dans le collecteur instrumenté) et également vers le 7 mars avec des débits de l'ordre de 2,75 l/s contre des débits négatifs au même moment.

Sachant que la hauteur du fossé en entrée du modèle ne nous est pas directement fournie au vu du peu de renseignements la concernant, on prend ce dernier hydrogramme en sortie d'Hydrowin (Qnappe infiltrations réelles) comme première entrée dans Xirene en tant qu'hydrogramme de débits latéraux pour chaque drain de la parcelle. Il est à noter que, désormais, on ne s'occupe plus de la période du 18 février au 28 février 2007, car les simulations ne s'approchent pas des mesures. De plus, on s'intéresse aux périodes de débits négatifs. Ainsi, on commence la période de simulation le 28 février 2007.

En ce qui concerne ces trois pics, du 23 au 27 février 2007 de 2 l/s environ contre 0,3 l/s mesurés au collecteur, deux hypothèses peuvent se présenter : les débits simulés sont sur-estimés par rapport aux débits mesurés ou inversement. Sachant que les hydrogrammes issus des simulations semblent réagir proportionnellement à la recharge (précipitations ou infiltrations réelles en entrée du modèle), les volumes d'eau arrivant sur la parcelle doivent correspondre aux volumes d'eau précipités.

Il s'en suit plusieurs itérations. On cherche à faire converger les débits simulés vers ce qui est mesuré sur le terrain par un aller-retour de Xirene à Hydrowin. On souhaite arriver à des hauteurs de fossé les plus appropriées en entrée d'Hydrowin afin d'obtenir des hydrogrammes en sortie représentant au mieux dans Xirene les débits latéraux entrant dans les drains.

III) RESULTATS ET INTERPRETATION

1) Résultats

a. trois itérations successives

Plusieurs itérations sont effectuées afin de voir s'il est possible de converger vers des débits proches de ceux mesurés sur le terrain. Ces itérations débutent le 28 février 2007, date à partir de laquelle des débits négatifs sont observés.

- Itération 0 : phase d'initialisation

La première itération peut être considérée comme une phase d'initialisation. Les paramètres entrés pour la simulation d'Hydrowin, et particulièrement les hauteurs de nappe à l'aplomb du drain, sont au départ théoriques. De plus, la première simulation de Xirene est faite sans influence du reste du réseau, c'est-à-dire sans apport d'eau venant des jonctions connectées au reste du réseau. Ainsi, au niveau du collecteur instrumenté, on regarde comment évolue l'écoulement issu uniquement des hydrogrammes entrant dans les drains correspondant à une interaction drain-nappe. On obtient en sortie d'Hydrowin et puis de Xirene les hydrogrammes observés ci-dessous (cf Fig.20).

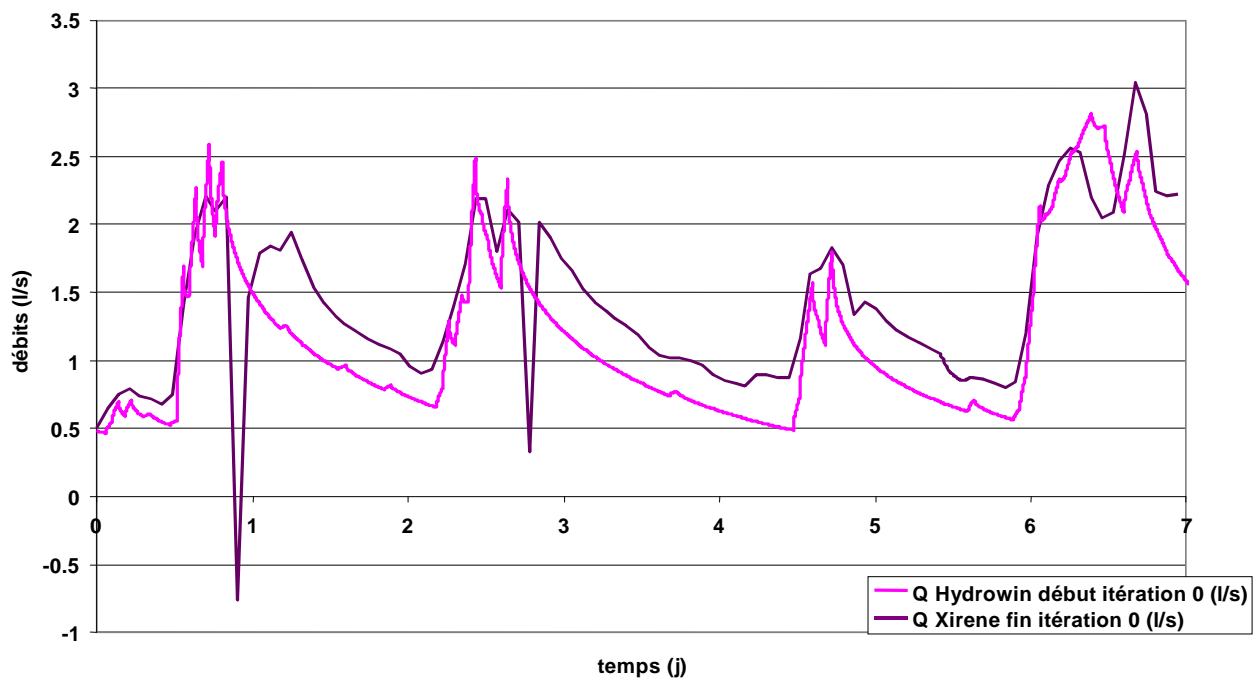


Fig.20 Evolution des débits en sortie d'Hydrowin et de Xirene en fonction du temps lors de la phase d'initialisation

Tout d'abord, en ce qui concerne l'hydrogramme en sortie d'Hydrowin, les valeurs de débits sont comprises entre 0,5 l/s, au départ le 28 février 2007, et 2,75 l/s environ vers 6,5 jours soit le 7 mars 2007. On remarque qu'il n'y a pas de débits négatifs. Par contre, on dénote la présence d'une succession de pics de crue entre 0,5 et 0,9 jours avec des valeurs de pointes de crue de l'ordre de 2,25 à 2,6 l/s, de même vers 2,5 et 2,8 jours avec des pics de débit de 2,5 et 2,3 l/s environ, ainsi que vers 6,5 jours avec une pointe de débit de 2,75 l/s environ. On remarque que ces pics de débit se produisent aux mêmes périodes que celles de débits négatifs mesurés au collecteur. De plus, après chaque phase de pointe de débit, on remarque qu'il se produit un tarissement.

Lorsqu'on rentre l'hydrogramme en sortie d'Hydrowin ci-dessus dans Xirene pour chaque drain, on obtient, toujours au niveau de la partie du collecteur instrumenté, l'hydrogramme en sortie de Xirene ci-dessus. Les valeurs de débit sont comprises entre -0,75 l/s vers 0,9 jours et 3 l/s environ vers 6,8 jours. De manière générale, les pointes de débit sont observées aux mêmes dates que celles de l'hydrogramme en sortie d'Hydrowin avec des valeurs relativement semblables. En revanche, il est à noter que l'allure de ces pointes de débit varie légèrement par rapport à celle de l'hydrogramme en sortie d'Hydrowin. En effet, les pics de débit sont atténués de 0,5 l/s environ et durent plus longtemps (allant d'une durée de 0,1 jour observé les 2,6 et 2,8 jours à une liaison de plusieurs pics de débit telle qu'il est dénoté entre 0,5 et 1 jours ou encore entre 4,5 et 4,8 jours). A partir de 6,2 jours, on note que l'allure de l'hydrogramme en sortie de Xirene est proche de celle de l'hydrogramme en sortie d'Hydrowin mais que ces derniers ne sont pas complètement en phase et que leurs pointes de débit sont différentes, 3 l/s pour Xirene contre 2,5 l/s pour Hydrowin vers 6,8 jours par exemple. De même, les phases de tarissement observées en sortie de Xirene semblent avoir le même comportement que celles en sortie d'Hydrowin mais avec des débits plus élevés. On note un pic de débits négatifs (vers 0,9 jours avec une pointe à 0,75 l/s) et un pic tendant vers zéro vers 2,8 jours de 0,3 l/s. Il est à noter que ces pics « inverses » se trouvent aux mêmes périodes que les débits négatifs mesurés au collecteur dans sa partie instrumentée.

A partir de ces résultats, une nouvelle simulation par Hydrowin, puis Xirene, est effectuée afin de tenter de mettre en correspondance les pressions ou niveau d'eau dans les drains et les hauteurs de nappe correspondantes. Pour ce faire, en entrée d'Hydrowin, seule la hauteur de nappe à l'aplomb du drain est modifiée. Il est pris le tirant d'eau fictif du drain situé au milieu de la parcelle provenant de la simulation de Xirene précédente. On ne tient pas compte dans cette étude de la différence entre les drains bien que les tirants d'eau soient très variables entre l'aval et l'amont de la parcelle. La nouvelle simulation de Xirene est réalisée dans des conditions supposées proches de la réalité, c'est-à-dire en introduisant en plus des hydrogrammes latéraux issus d'Hydrowin imposés à chaque drain, les hydrogrammes aux jonctions, ainsi que le limnigramme à l'aval du réseau (cf Fig.21).

- Itération 1

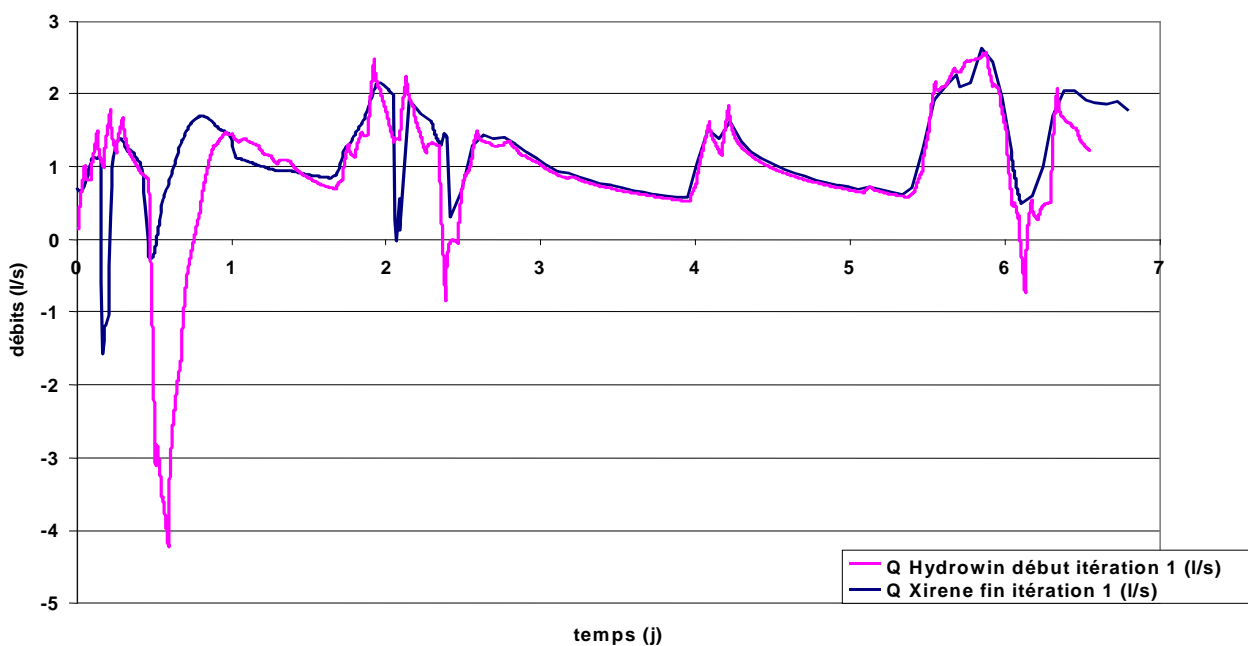


Fig.21 Evolution des débits en sortie d'Hydrowin et de Xirene en fonction du temps lors de la première itération

Contrairement à précédemment, l'hydrogramme en sortie d'Hydrowin comporte trois phases de débits négatifs, de 0,5 à 0,8 jours, de 2,3 à 2,5 jours et vers 6,2 jours. Ces débits négatifs ont des pointes respectivement de -4,2, -0,9 et -0,8 l/s environ. Ces pics fins de débits négatifs se trouvent aux mêmes périodes que ceux mesurés au collecteur instrumenté mais ils sont nettement plus brefs, quelques heures contre quelques jours, et nettement plus élevés, -4 l/s contre un maximum de débit négatif de -0,6 l/s à la même période par exemple. On remarque qu'avant chaque phase de débits négatifs se trouvent des pics de crue pouvant atteindre par exemple 2,5 l/s environ vers 1,9 jours ou 5,9 jours. En outre, entre 4 et 4,3 jours, se trouvent deux pics de débit respectivement de 1,6 et 1,9 l/s sans débits négatifs associés.

En ce qui concerne les débits associés en sortie de Xirene, on dénote de manière générale une certaine concordance entre les deux courbes. En effet, les périodes de tarissement se correspondent relativement bien. C'est le cas notamment des deux phases de tarissement, de 2,6 à 5,5 jours, avec, entre les deux, deux pics de débit déjà observés sur l'hydrogramme en sortie d'Hydrowin (entre 4 et 4,3 jours). De surcroît, on remarque le même phénomène observé lors de la phase d'initialisation avec des pointes de débits en sortie de Xirene en phase avec celles observées en sortie d'Hydrowin, mais légèrement plus atténuées et plus longues dans le temps. Ceci s'observe, par exemple, entre 0 et 0,5 jours et vers 1,9 jours avec des pointes de débit pour Xirene 0,88 fois moins importantes que pour Hydrowin (2,2 l/s contre 2,5 l/s). Là où on note la présence de débits négatifs en sortie d'Hydrowin, on remarque des pointes de débits « inverses » voire négatifs en sortie de Xirene en phase avec ces derniers. Par contre, on note que ceux issus de Xirene sont moins élevés et relativement moins étalés dans le temps que ceux issus d'Hydrowin. Ainsi, vers 0,5 jours on observe une pointe de débit négatif de -0,2 l/s environ, vers 2,5 jours une pointe « inverse » de 0,3 l/s et une dernière vers 6,2 jours de 0,4 l/s pour des valeurs de débits d'Hydrowin respectivement de -4,2, -0,9 et -0,8 l/s. En outre, au niveau des deux périodes de pointes de débits observées avant les débits négatifs sur l'hydrogramme issu d'Hydrowin, de 0 à 0,5 jours et de 1,8 à 2,2 jours, on remarque durant ces périodes la présence de fines pointes de débits négatifs sur l'hydrogramme en sortie de Xirene sans retour dans la nappe (débit d'Hydrowin positif). Ces pointes de débits négatifs prennent respectivement les valeurs de -1,7 et -0,05 l/s.

Une deuxième itération est réalisée dans les mêmes conditions. En entrée d'Hydrowin, seule la hauteur de nappe à l'aplomb du drain est modifiée. Il a été pris le tirant d'eau du drain au milieu de la parcelle issu de la simulation précédente et la simulation de Xirene est réalisée dans les mêmes conditions (cf Fig.22).

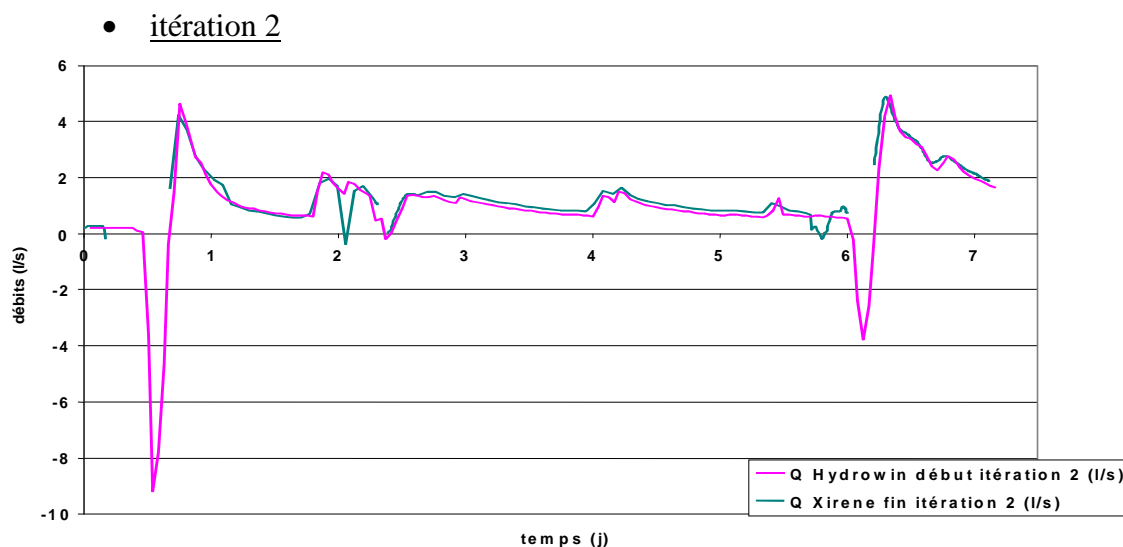


Fig.22 Evolution des débits en sortie d'Hydrowin et de Xirene en fonction du temps lors de la deuxième itération

Tout d'abord, en ce qui concerne l'hydrogramme en sortie d'Hydrowin, on remarque qu'il existe trois phases de débits négatifs, de 0,4 à 0,7 jours avec une pointe de -9,2 l/s environ vers 0,7 jours, à 2,4 jours avec une pointe de débit de -0,2 l/s et de 6,1 à 6,3 jours avec une pointe de débit de -3,9 l/s. Après les deux grandes périodes de débits négatifs, on note la présence d'un pic de débit positif. Ainsi, respectivement, on observe des pics de débit de l'ordre de 4,6 l/s et 5 l/s à 0,8 et 6,4 jours. On retrouve les deux pics de débit de l'ordre de 1,7 l/s entre 4 et 4,3 jours observés à l'itération 1. On remarque aussi deux pics de débit de 2,1 et 1,9 l/s à 1,8 et 2,2 jours, ainsi qu'un pic de débit de 1,2 l/s vers 5,6 jours.

Au niveau de l'hydrogramme en sortie de Xirene, on remarque que ce dernier est, de manière générale, en phase avec l'hydrogramme issu d'Hydrowin. En revanche, on note qu'à certaines périodes, il y a une absence de données due à une impossibilité de simulation : de 0,2 à 0,7 jours et de 6 à 6,2 jours, certains drains sont considérés à sec par le modèle. Il est à noter que ces périodes correspondent aux deux périodes à relativement forts débits négatifs de l'hydrogramme issu d'Hydrowin. Bien qu'il existe une relativement bonne corrélation entre les deux hydrogrammes étudiés, on observe sur l'hydrogramme en sortie de Xirene deux pointes de débits négatifs, l'une vers 2,1 jours avec un débit de l'ordre de -0,3 l/s et le deuxième vers 5,8 jours avec un débit de -0,2 l/s, alors que l'hydrogramme en sortie d'Hydrowin indique une relativement faible (à 2,1 jours) voire inexistante (à 5,8 jours) tendance à tendre vers des débits négatifs.

b. évolution et comparaison des itérations

- Evolution des débits de nappe en sortie d'Hydrowin au cours des différentes itérations

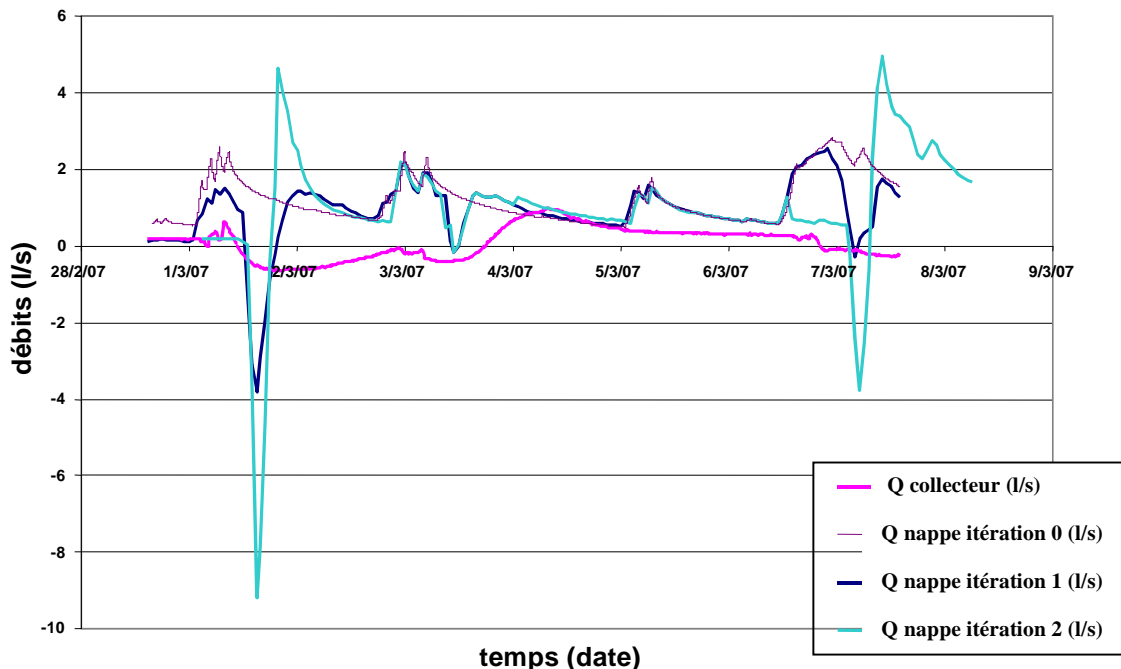


Fig.23 Evolution des débits de nappe en sortie d'Hydrowin en fonction du temps

On peut comparer les hydrogrammes en sortie d'Hydrowin issus des trois itérations successives (cf Fig.23) afin de voir comment évolue les débits de nappe simulés. Ainsi, on remarque qu'on passe d'un hydrogramme sans débits négatifs (itération 0) à un hydrogramme avec présence de débits négatifs de plus en plus importants (de l'itération 1 à 2) passant notamment de -4 l/s à plus de -9 l/s entre le 1 et 2 mars 2007 ou encore de -0,3 l/s à près de -4 l/s vers le 7 mars 2007. Ces débits négatifs apparaissent aux mêmes périodes que les débits négatifs mesurés sur le terrain. Par contre, contrairement à ces derniers, on remarque que les pics de débits négatifs simulés sont nettement plus pointus avec des valeurs pouvant être 15 fois supérieures aux mesures (cas du premier pic de débit de l'itération 2 de l'ordre de -9 l/s contre -0,6 l/s mesuré sur le terrain) et plus brefs, d'une durée horaire contre une durée journalière. Il est à noter qu'au niveau de l'hydrogramme correspondant à l'itération 2, on voit qu'en plus de débits négatifs nettement plus importants que ceux des autres hydrogrammes, les pointes de débits positifs sont également plus élevées. Le 2 mars ainsi qu'entre le 7 et 8 mars 2007, les débits sont de l'ordre de 4,8 et 5 l/s. En outre, on note la présence de pics de débits en phase d'un hydrogramme à l'autre. C'est le cas vers le 3 puis vers le 5 mars 2007 avec des pointes de débits respectivement de 2 l/s et 1,75 l/s environ.

Cette succession d'hydrogrammes montre la réalité de la tendance à la réalimentation de la nappe, mais cette forme simple de couplage entre drain et nappe ne permet pas de tendre vers un équilibre entre les deux milieux.

- Evolution du tirant d'eau ou de la pression dans drain situé au milieu de la parcelle au cours des différentes itérations

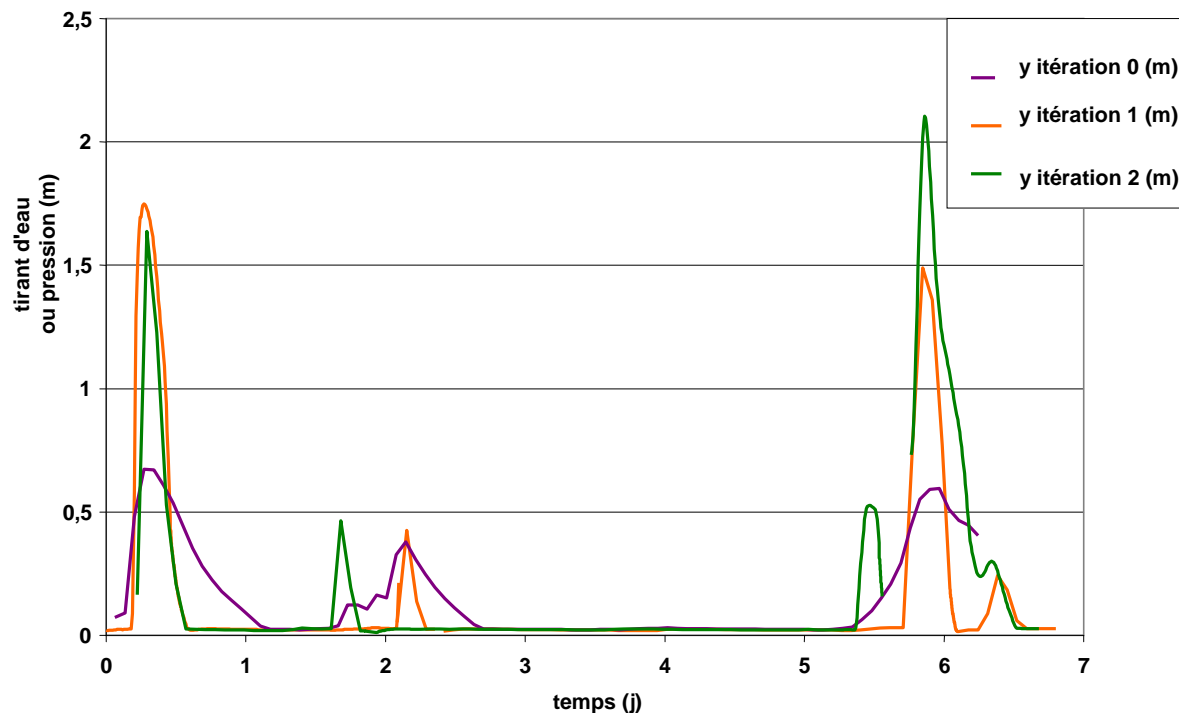


Fig.24 Evolution du tirant d'eau calculé par Xirene du drain au centre de la parcelle en fonction du temps et suivant les différentes itérations

Au vu de l'évolution des tirants d'eau (ou pression) en sortie de Xirene, on peut voir qu'il existe une certaine coïncidence entre les différents pics de hauteurs d'eau, notée y , dans le drain suivant les différentes itérations. Il est à noter que le diamètre d'un drain est de 0,06 m. Ainsi, avec le modèle de la fente de Preissmann, on relève que ces tirants d'eau peuvent parfois être supérieurs à ce dernier. Les pics de hauteurs d'eau sont observés vers 0,4 jours, 2,2 jours et 6 jours. On remarque que le tirant d'eau de l'itération 0 est toujours inférieur aux autres tirants d'eau. Lors du premier pic, le tirant d'eau de l'itération 0 est de 0,7 m contre 1,65 et 1,75 m pour ceux issus des itérations 2 et 1. De même, vers le 6^{ème} jour, le premier tirant d'eau est de 0,6 m contre 1,5 et 2,1 m pour ceux issus respectivement des itérations 1 et 2. On note également que les pics de la phase d'initialisation sont moins importants et plus étalés dans le temps que ceux des deux autres itérations. De plus, certains pics de hauteurs d'eau des itérations 1 et 2 n'apparaissent pas au cours de la phase d'initialisation. C'est le cas notamment avec l'itération 1 vers 6,4-6,5 jours avec une hauteur d'eau au niveau du drain de 0,25 m. De même, au cours de l'itération 2, on observe un pic de près de 0,5 m vers 1,8 jours, de plus de 0,5 m vers 5,5 jours et de 0,25 m à 6,4 jours. Il est à noter qu'à 1,8 jours là où un pic est observé pour l'itération 2, il existe une augmentation de hauteur d'eau « par palier » durant la phase d'initialisation. Enfin, entre les pics de tirants d'eau, il ressort une certaine constante de ces derniers avec des valeurs de hauteurs d'eau ne dépassant pas 0,06 m. Ceci est observé, par exemple entre 3 et 5 jours.

- Evolution du débit en sortie de Xirene dans la zone du collecteur instrumenté au cours des différentes itérations

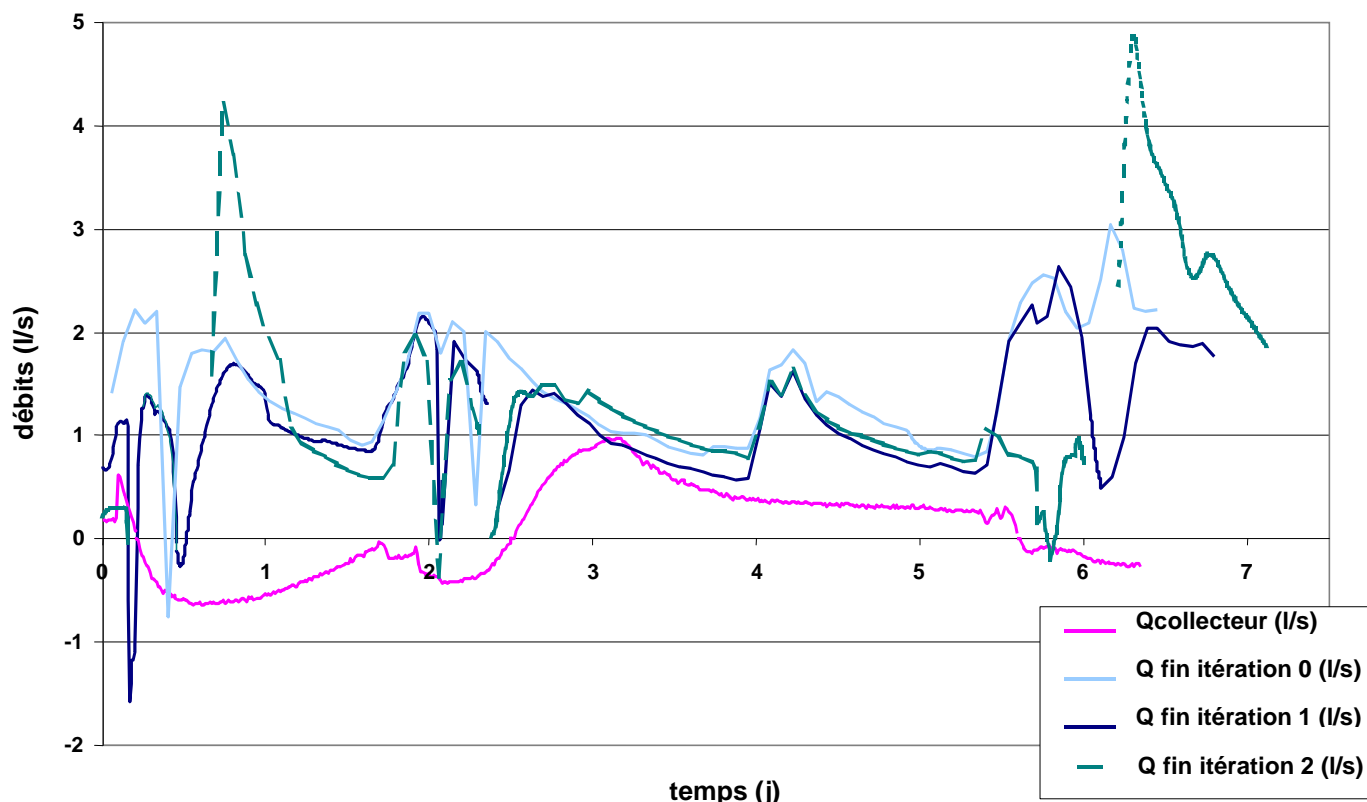


Fig.25 Evolution des débits en sortie de Xirene lors des différentes itérations

En ce qui concerne les hydrogrammes en sortie de Xirene dans la région du collecteur instrumenté, on peut remarquer des évolutions différentes d'un hydrogramme à l'autre. Pour le premier hydrogramme correspondant à la phase d'initialisation, on retrouve une phase de débits négatifs, vers 0,4 jours avec une valeur de pointe de débit de $-0,8$ l/s environ. Bien que ce dernier pic soit très fin et ainsi très bref dans le temps par rapport au temps que dure les débits négatifs mesurés au collecteur, il apparaît bien à la même période. Il se trouve un deuxième pic de débit « inversé » vers 2,3 jours d'une valeur de $0,3$ l/s environ. Ce dernier pic tendant vers des débits négatifs se trouve à une période où on observe également des débits négatifs au collecteur instrumenté. Par contre, lors de la troisième phase de débits négatifs au collecteur, on ne note pas de débits négatifs simulés mais des pics de débits pouvant aller jusqu'à 3 l/s vers 6,2 jours. L'itération 1 donne un hydrogramme relativement différents. Les pics « inverses » observés précédemment ne se retrouvent pas sur cet hydrogramme. Un premier pic de débits négatifs apparaît vers 0,2 jours de l'ordre de $-1,65$ l/s. Un deuxième pic est observé vers 0,5 jours de $-0,3$ l/s environ. Puis, on remarque un pic négatif proche de zéro vers 2,1 jours. Il est à noter que vers 2,4 jours, il existe une lacune dans l'hydrogramme due à une absence de calculs de débits à cette période. En outre, on note la présence d'un pic tendant également vers des valeurs négatives vers 6,1 jours de l'ordre de $0,5$ l/s. Il est à noter que ces débits apparaissent aux mêmes périodes que ceux mesurés au collecteur. En revanche, contrairement à ces derniers, ils sont également nettement plus brefs dans le temps. En ce qui concerne l'hydrogramme en sortie de Xirene lors de l'itération 2, on remarque que ce dernier ne réagit pas tout à fait de la même manière que les deux autres. Tout d'abord, on dénote l'absence de calculs de débits de 0,3 à 0,7 jours, vers 2,4 jours et de 6 à 6,2 jours. Ces périodes correspondent à des mesures de débits négatifs sur le terrain. Deux de ces lacunes sont suivies de forts pics de débits, de l'ordre de $4,25$ l/s et $4,9$ l/s respectivement pour 0,8 et 6,4 jours. Cependant, il existe des pics de débits négatifs. C'est la cas à 2,1 jours avec un pic de $-0,4$ l/s, en phase avec celui de l'itération 1, et vers 5,8 jours avec un pic de $-0,2$ l/s environ. Ce dernier apparaît alors que pour les itérations 0 et 1 on observe un pic de débit de $2,5-2,6$ l/s. On remarque aussi qu'il se produit à chaque itération deux pics de débits entre 4 et 4,3 jours de l'ordre de $1,5$ et $1,6$ l/s non observé au collecteur.

2) Interprétation et fonctionnement hydraulique du réseau de drainage

a. interprétation

- Atténuation des pics de débit en sortie de Xirene par rapport à ceux en sortie d'Hydrowin

Tout d'abord, on peut voir qu'il ressort une évolution quant au comportement du système d'une itération à l'autre. Dans un premier temps, on remarque un phénomène général qui se produit lors de toutes les itérations. Il ressort une atténuation des pics de débit des hydrogrammes issus de Xirene par rapport à ceux d'Hydrowin. Il est à savoir qu'on compare des variations de débits au cours du temps sur une même période, du 28 février au 7 mars 2007, période à relativement forts débits et à débits négatifs, et ceci au même endroit, au niveau de la partie du collecteur instrumenté, à l'aval de la parcelle. Par contre, ces hydrogrammes ne sont pas obtenus de la même manière. Lors d'une simulation d'Hydrowin, on ne s'intéresse qu'à une demi-nappe. Ainsi, afin de voir le comportement de la nappe dans son ensemble, on regarde comment évolue ce débit de nappe sur tous les drains du système considéré. En ce qui concerne Xirene, on injecte l'hydrogramme en sortie d'Hydrowin (correspondant à l'apport principal d'une demi-nappe) en double sur la longueur de chaque drain de façon à avoir partout le même hydrogramme. L'hydrogramme en sortie de Xirene correspond à un écoulement de 28 drains. Contrairement à Hydrowin, l'eau n'arrive pas en

même temps. Il existe un léger décalage entre l'eau issue du drain le plus en amont et celle provenant du drain le plus à l'aval lorsqu'elle arrive au niveau de la zone étudiée (partie du collecteur instrumenté). Ainsi, ceci peut expliquer l'amortissement des pics observé au niveau des hydrogrammes en sortie de Xirene par rapport à ceux d'Hydrowin, ainsi que les connexions observées entre plusieurs pics (pour Xirene) telles qu'il est dénoté pour l'**itération 0** entre 4,5 et 4,8 jours.

Concernant Xirene lors de l'**itération 1**, on remarque qu'il existe des débits négatifs ou des pics « inverses » aux mêmes périodes que ceux simulés en sortie d'Hydrowin et ainsi que ceux mesurés au collecteur instrumenté, dont un vers 6,2 jours qui n'apparaissait pas lors de la **phase d'initialisation**. Mais, ces pics de débit sont nettement moins importants que ceux simulés par Hydrowin (-0,2 l/s contre -4,2 l/s, 0,4 l/s contre -0,9 l/s et 0,3 l/s contre -0,8 l/s). Au vu de ces valeurs, il semble que le système se tamponne aussi (atténuation des pics). Ceci est probablement dû également à l'organisation du réseau avec un décalage d'arrivée de l'eau à l'aval de la parcelle. Bien que la longueur moyenne des drains soit de 100 m (valeur prise pour Hydrowin afin de comparer l'hydrogramme moyen simulé dans la zone du collecteur instrumenté avec celui mesuré dans la réalité), ils n'ont pas tous la même longueur. Ainsi, pour chaque drain, suivant leur longueur, on ne rentre pas les mêmes intensités de débit d'un hydrogramme à l'autre. Ceci est dans le but d'entrer le même hydrogramme latéral par drain. Cette caractéristique pourrait également expliquer le retard possible dans l'écoulement et ainsi l'amortissement des pics de débit.

- Condition aval, facteur limitant pour Hydrowin de la formation de débits négatifs lors de la phase d'initialisation

En ce qui concerne la **phase d'initialisation**, ou encore l'**itération 0**, on remarque qu'il n'y a pas de débits négatifs simulés en sortie d'Hydrowin et ainsi pas de caractérisation d'un écoulement allant du drain vers la nappe. Au vu du fonctionnement d'Hydrowin, où les débits négatifs sont générés par une hauteur d'eau dans le fossé (assimilé au drain) plus élevée que la hauteur de nappe juxtaposée impliquant un écoulement du fossé vers la nappe, il semble que cette absence de débits négatifs soit due à la condition limite aval correspondant à la hauteur de nappe rentrée à l'aplomb du drain. Il se pourrait que cette dernière ne soit pas suffisante pour générer les débits négatifs attendus. Sachant que les autres paramètres et variables de forçage en entrée d'Hydrowin restent inchangés d'une simulation à l'autre et qu'on note la présence de débits négatifs au niveau des autres itérations, on peut écarter l'hypothèse selon laquelle ces autres paramètres empêcheraient la possibilité d'un écoulement du drain vers la nappe. Ainsi, le facteur limitant semble bien être la condition limite aval correspondant à la hauteur de nappe rentrée à l'aplomb du drain lors de cette initialisation.

- Phase d'initialisation : des débits négatifs en sortie de Xirene dus au dimensionnement du réseau

En revanche, en sortie de Xirene lors de l'**itération 0**, on remarque la présence d'une pointe de débit négatif à 0,9 jours de -0,75 l/s. Sachant qu'on entre comme paramètres d'entrée uniquement le débit de nappe issu d'Hydrowin, ainsi que, comme condition aval, le limnigramme mesuré au fossé d'évacuation et qu'il n'existe pas d'autres apports extérieurs, cette pointe de débit négatif peut être due uniquement au dimensionnement du réseau. En effet, un trop grand apport d'eau dans les drains associé à une condition aval mettant le réseau en charge pourrait engendrer une limitation de la capacité d'évacuation de ce dernier. L'eau serait alors contrainte de s'écouler du drain vers la nappe. On remarque également la présence d'un pic inverse à 2,8 jours de 0,3 l/s. Ce dernier pourrait être dû au phénomène exposé ci-dessus, mais avec probablement une capacité limitante d'évacuation du réseau moins

importante à cette période, impliquant alors une possibilité d'évacuation de l'eau jusqu'à l'aval du réseau. Ainsi, dû à une limitation d'écoulement dans les conduites à un instant donné (vers 2,8 jours), mais pas complètement limitante pour le bloquer entièrement, l'écoulement est fortement réduit. Puis, lorsque cette influence ne se fait plus sentir, on retourne à un écoulement non contraint et ainsi à des valeurs de débit positives.

- Des débits de tarissement différents entre Xirene et Hydrowin dus à la condition aval

On remarque une différence de débits lors des phases de tarissement entre les deux hydrogrammes en sortie d'Hydrowin et de Xirene, avec des débits nettement plus importants pour Xirene que pour Hydrowin. Ceci semble confirmer l'importance de la condition aval du réseau. En effet, le réseau étant en charge durant toute la période d'étude avec des valeurs de hauteurs d'eau au fossé d'évacuation plus ou moins importantes au cours du temps, le système ne peut pas se rééquilibrer. Ceci laisse place à des débits plus élevés dans Xirene que dans Hydrowin lors des phases de tarissement. Cette condition aval en charge doit bien amplifier le phénomène de débits négatifs par blocage de l'évacuation de l'écoulement dans les conduites associée à un apport d'eau important issu de la nappe.

Par contre, les variations de débits et les différences notables observées (**itération 0**) entre les deux hydrogrammes entre 6 et 7 jours, sont difficilement explicables. Elles peuvent effectivement être dues aux variations de hauteurs d'eau au fossé d'évacuation qui met en charge le système à cette période de façon relativement importante expliquant alors ces différences de débits d'un hydrogramme à l'autre. Le problème est qu'il ne se produit pas de débits négatifs ou du moins de débits inverses durant cette période. En effet, au vu du reste de l'hydrogramme en sortie de Xirene, on s'attendrait à voir des pics de débits inverses. Il se peut qu'on rencontre des problèmes numériques expliquant alors des variations importantes de débits, à cette période, pouvant expliquer de telles divergences.

- Itération 1 : présence de pics de débit négatif pour Hydrowin et Xirene

Au niveau de l'**itération 1**, il ressort des débits négatifs sur l'hydrogramme en sortie d'Hydrowin de 0,5 à 0,8 jours, de 2,3 à 2,5 jours et vers 6,2 jours prenant respectivement les valeurs de pointes de débit de -4,2 l/s, -0,9 l/s et -0,8 l/s. Par rapport à l'**itération 0**, seules les variations dans le temps de hauteurs d'eau à l'aplomb du drain sont modifiées. Il est pris le tirant d'eau du drain au milieu de la parcelle en sortie de Xirene (**itération 0**), car on considère qu'il représente la hauteur médiane d'eau des drains au cours du temps. Lors de l'**itération 1** pour Hydrowin, il semble qu'il se produit un ajustement des hauteurs d'eau car on retrouve sur l'hydrogramme de sortie des débits simulés négatifs aux mêmes périodes que ceux mesurés au collecteur instrumenté. Il est à noter que ces débits négatifs calculés dans Hydrowin (**itération 1**) correspondent aux périodes à forts débits de la **phase d'initialisation**, lors du premier Hydrowin. Ces forts débits entraînent de forts débits voire des pointes de débits négatifs ou « inverses » au niveau de l'hydrogramme en sortie de Xirene qui lui est associé. Ceci provoque des pics de hauteur d'eau plus importants qui sont réinjectés comme données d'entrée dans Hydrowin.

- Différences de valeur et d'allure des pics de débit négatif entre ce qui est mesuré et ce qui est simulé : influence du pas de temps de calcul

On note que les pics de débits négatifs calculés prennent des valeurs relativement importantes par rapport à ceux mesurés sur le terrain, -4,2 l/s (**Hydrowin itération 1**) et -9,2 l/s (**Hydrowin itération 2**) vers 0,7 jours contre un maximum de débit négatif mesuré sur le

terrain de -0,6 l/s. En plus d'être relativement élevés par rapport aux mesures de terrain, les pics de débit négatif ou de débit « inverse » calculés par Hydrowin sont relativement brefs. Leur durée est de l'ordre de quelques heures contre un pas de temps journalier pour ceux mesurés au collecteur instrumenté. En plus de valeurs de hauteur d'eau à l'aplomb du drain relativement importantes (valeurs qui peuvent atteindre par exemple 1,75 m à 0,4 jours pour l'**itération 1**) qui pourrait provoquer seules ces forts débits, s'ajoute un pas de calcul horaire. Il est possible que ce pas de calcul soit trop grand pour pouvoir tenir compte des variations importantes des valeurs d'entrée d'Hydrowin. Un pas de temps de calcul plus resserré pourrait être plus adaptées aux variations des données d'entrée d'Hydrowin impliquant alors une mise en forme des hydrogrammes probablement plus réaliste. Au vu de l'allure de l'hydrogramme en sortie d'Hydrowin, on peut confirmer la formation des débits négatifs déjà vu lors de la **phase d'initialisation**. En effet, pour Hydrowin lors de l'**itération 1**, on remarque qu'avant les pics de débit négatif, il se produit de forts débits. Hydrowin réagit de la manière suivante : un apport important de précipitations provoque de relativement forts débits latéraux de la nappe vers le drain. Ceci engendre une remontée du niveau d'eau dans le fossé assimilé au drain de façon relativement rapide (à un pas de temps horaire). L'inertie de la nappe (variations à un pas de temps de plusieurs heures à journalier) (Ritzema, 1994) fait que cette dernière monte moins vite. Le niveau d'eau au fossé devient supérieur à celui de la nappe. Ainsi, cette différence implique un écoulement du fossé vers la nappe. Or, ceci peut fausser la représentation et les calculs de l'hydrogramme de nappe en sortie d'Hydrowin avec un écoulement du fossé vers la nappe sur-estimé dû à la probable trop grande différence de hauteur d'eau entre le fossé et la nappe. En outre, il est à noter que s'il se produit de l'affleurement lors des calculs d'Hydrowin, l'eau ruisselée en surface est réinjectée dans le système en tant que recharge et est utilisée pour le calcul de débit de nappe. Sachant qu'on assimile le drain à un fossé à surface libre avec comme données d'entrée des hauteurs à l'aplomb de ce dernier parfois supérieures à la profondeur du drain (supérieur à 0,8 m), il est probable que ces débits négatifs soient en effet sur-estimés par rapport à ce qui est observé dans la réalité.

- Des modèles sensibles aux précipitations

Il semble que les modèles soient relativement sensibles aux précipitations. En effet, entre 4 et 4,3 jours, le système réagit à un apport de pluies par la formation de deux pics de 1,75 l/s environ. Or, ces derniers surviennent à chaque itération, aussi bien pour Hydrowin que pour Xirene, alors que ce phénomène n'est pas mesuré sur le terrain. Si on écarte un problème de mesures au collecteur à cette période donnée, il semble exister une limite quant aux possibilités de modélisation d'Hydrowin. En effet, on considère, en plus d'apports extérieurs possibles, qu'on ne fait qu'injecter dans Xirene ce qu'on obtient d'Hydrowin. Ainsi, tel qu'il est dénoté lors du premier choix des entrées d'Hydrowin pour la phase d'initialisation ainsi que lors de toutes les autres itérations, des pics de crue simulés non mesurés sur le terrain. C'est le cas notamment du 25 au 27 février 2007 avec des pics de débit mesurés au collecteur de l'ordre de 0,3 l/s contre des pics de débits simulés à la même période de 2 l/s environ, ainsi que vers le 5 mars 2007 avec des pointes de débits simulés non mesurées au collecteur. Le modèle Hydrowin ne tient pas compte de phénomène d'infiltration profonde, ainsi que d'éventuels stockages temporaires d'eau dans une zone superficielle du sol. Ainsi, il est probable, à certains moments, suivant les paramètres d'entrée introduites dans Hydrowin, que le système sur-estime les débits de nappe calculés. On observe au niveau de l'**itération 2** un léger pic de débit de 1,2 l/s environ à 5,6 jours correspondant également à une réponse aux précipitations, mais qui se présente ici plus comme un artefact que comme un pic de crue contrairement aux autres itérations.

- Influence des apports extérieurs aux jonctions

On remarque des pointes de débits négatifs toujours au niveau de l'hydrogramme en sortie de Xirene, mais ne correspondant pas à des débits négatifs en sortie d'Hydrowin. C'est le cas, par exemple, vers 0,3 jours où on note une pointe de débit négatif de -1,6 l/s contre un relativement fort débit de 1,75 l/s en sortie d'Hydrowin. Il est à noter que les conditions de modélisation lors de l'**itération 1** sont différentes de la **phase d'initialisation**. On rajoute l'apport d'hydrogramme aux nœuds externes, jonctions 1 et 2, afin de simuler des conditions supposées les plus réelles possibles. On remarque qu'une des jonction (jonction 1) se trouve juste à l'aval de la zone de mesures de débits au niveau du collecteur. En plus de la condition aval en charge et de la contrainte du dimensionnement du réseau, à certains moments, suivant l'intensité des débits de ces hydrogrammes entrés aux jonctions, il est tout à fait possible qu'ils génèrent un apport d'eau suffisamment important pour qu'il puisse remonter dans le collecteur. On observerait ainsi, durant certaines périodes, des pointes de débit négatif issues de l'arrivée d'eau d'autres collecteurs remontant dans les conduites accolées. C'est ainsi que l'on explique ces pointes de débit négatif simulées en sortie de Xirene qui ne coïncident pas avec des débits négatifs issus d'Hydrowin. Ce phénomène est observé pour l'**itérations 1** vers 0,3 jours avec un pic de -1,6 l/s, pour les **itérations 1 et 2** vers 2,1 jours avec un pic de -0,3 l/s, ainsi qu'uniquement pour l'**itération 2** vers 5,8 jours avec un pic de débit de -0,2 l/s environ. Ces périodes coïncident avec celles de débits négatifs mesurées sur le terrain.

- Les hauteurs d'eau dans les drains

Au vu des variations de tirants d'eau d'une itération à l'autre, là où apparaît de forts débits ou des débits négatifs, il apparaît des pics de tirant d'eau importants associés. Il semble que lorsque le réseau est contraint et doit laisser place à un écoulement « inverse », du drain vers la nappe, ce dernier est fortement en charge. Ceci se traduit par des hauteurs d'eau relativement élevées dans la fente de Preissmann. De plus, on remarque que, d'une itération à l'autre, les pics de hauteur d'eau au niveau de la fente de Preissmann sont de plus en plus nombreux, pas forcément en phase mais aussi de plus en plus fins et de plus en plus importants. Il se pourrait que ceci puisse être expliqué par le pas de calcul trop grand en entrée d'Hydrowin qui sur-estimerait également les tirants d'eau et qui les diviserait en plusieurs pics brefs et longs au lieu d'avoir des pics moins importants et qui dureraient plus longtemps.

- Les arrêts de modélisation

Lors de l'**itération 2** au niveau de l'hydrogramme en sortie d'Hydrowin, on remarque à certains moments une absence de données. Ceci est dû à certaines limites du modèle Xirene. Effectivement, deux conditions limites font arrêter la modélisation, des conduites à sec et des écoulements torrentiels. Or, lors de la dernière simulation de Xirene (**itération 2**), on remarque une absence de simulation de 0,2 à 0,7 jours et de 6 à 6,2 jours due à des drains considérés à sec. Le diamètre des drains est de 0,06 m. On remarque que les variations de hauteurs d'eau le long d'un drain peuvent passer de moins de 0,06 m à plus de 1,5 m, et inversement, en moins d'une heure. C'est ce que l'on observe avec les pics de tirant d'eau des **itérations 1 et 2** vers 0,4 jours d'une valeur de 1,7 et 1,65 m. Ces vitesses de variations de hauteurs d'eau sont relativement rapides. Le modèle considère alors le passage d'un pic de tirant d'eau élevé à une hauteur d'eau inférieure à 0,06 m en moins d'une heure comme le passage d'une hauteur d'eau relativement forte à un drain à sec à cause d'une variation numérique importante approximant le niveau de l'eau à zéro au lieu de 0,06 m, induisant un drain à sec pour le modèle.

b. fonctionnement hydraulique du réseau de drainage enterré

- Trois facteurs pouvant induire des débits négatifs au collecteur

Le réseau de drainage agricole enterré sur l'une des parcelles de Goins a un fonctionnement particulier. Suivant certaines conditions environnementales et suivant l'organisation et le dimensionnement du réseau, il est possible de mesurer un écoulement « inverse » par rapport au fonctionnement habituel d'un réseau de drainage, c'est-à-dire un écoulement allant du drain vers la nappe. Ces débits négatifs apparaissent lors de fortes périodes de crue, tel qu'il est étudié du 28 février au 8 mars 2007. En plus d'un apport d'eau important dû à de fortes précipitations durant cette période, l'organisation et le dimensionnement du drainage joue également un rôle quant à la formation de ces débits négatifs. En effet, une condition aval limitante soit, ici, un niveau d'eau au fossé d'évacuation important impliquant une capacité limitée d'évacuation de l'eau du réseau par sa mise en charge, en plus de fortes précipitations, suffisent à contraindre l'écoulement. A ceci s'ajoute un autre facteur pouvant jouer sur la formation des débits négatifs. Ceci concerne les jonctions entre deux ou plusieurs conduites. Au niveau des jonctions arrive de l'eau issue d'une autre partie du réseau. En période de crue, l'écoulement se fait de façon massive sur tout le réseau et probablement à certaines périodes en charge. Lorsque cette eau arrive à une jonction, il est tout à fait probable qu'elle puisse remonter dans la conduite adjacente. Ceci produit alors des débits négatifs.

- Un fonctionnement des drains au cas par cas

Il est probable que tous les drains ne réagissent pas de la même manière. Suivant leur emplacement, il se peut que certains drains soient en charge et d'autres non. Plus on se trouve à l'amont du réseau et moins les drains sont en charge (cf annexe 2). Il est à noter que la localisation de l'instrumentation du collecteur est à l'aval de la parcelle, juste à l'amont d'une jonction avec un autre collecteur drainant une superficie 9,6 fois plus grande que celle étudiée. Il est possible, en plus de toutes ces caractéristiques, que le réseau soit mal dimensionné. Il est possible qu'il ne permette pas des écoulements relativement importants lors des périodes de drainage intense. Ceci peut être avéré par l'observation, notamment au niveau de la partie du collecteur instrumenté, d'un ruissellement et de la formation de flaques relativement étendues (cf Fig.7).

- A quoi correspond la nappe drainée

Un autre problème existe, quelle est exactement la nappe drainée et où se localise-t-elle précisément. De nombreuses questions existent au vu des mesures piézométriques relevées sur la parcelle de Goins considérée. Le comportement de la nappe semble être particulier. Du fait de l'augmentation de leurs hauteurs piézométriques par palier, deux des piézomètres, PZ1 et PZ2, laisseraient présager la présence d'une nappe locale temporaire. Il serait alors probable que cette dernière se remplisse par une recharge issue des précipitations, mais aussi par un écoulement allant des drains vers la nappe. On considère qu'il est tout à fait possible qu'une nappe locale se forme au vu de la texture limono-argileuse et aux caractéristiques semi-perméable du sol. De plus, sachant que ce sol est considéré comme relativement hétérogène, il est probable que cette nappe, si elle existe, ne se retrouve pas partout, mais uniquement vers la zone du collecteur instrumenté. Il est à savoir que la parcelle a une pente de 1/1000 allant de l'altitude la plus haute en amont de la parcelle à l'altitude la plus basse à l'aval. Dans la zone du collecteur instrumenté, on se trouve sur un point bas. Il est probable alors que cette région soit une zone propice d'accumulation d'eau en surface et puisse comporter une nappe locale temporaire.

- Un bilan hydrologique insatisfait

Par contre, on remarque une nette différence entre les volumes d'eau drainés simulés et ceux mesurés, avec des valeurs de volumes d'eau simulés relativement plus importantes que les volumes mesurés. En effet, bien qu'il existe une corrélation dans le temps entre les débits simulés et les débits mesurés, les pics de débits simulés sont relativement plus élevés que les pics de débits mesurés. Il est probable que certains phénomènes rencontrés dans la réalité ne soient pas pris en compte.

C'est ainsi que l'hypothèse d'une infiltration profonde est posée. Si on admet l'hypothèse selon laquelle il existe un phénomène de drainance en profondeur, ceci pourrait expliquer une différence de volumes d'eau et ainsi de débits entre les simulations et ce qui est mesuré sur le terrain. Un écoulement vers une nappe plus profonde pourrait permettre d'évacuer ce trop plein d'eau observé lors des simulations.

Il est également possible qu'il puisse exister un stockage d'eau temporaire dans la zone non saturée du sol. Ceci pourrait également expliquer cette différence de volumes d'eau entre ce qui est simulé et ce qui est mesuré. Ainsi, l'eau issue des précipitations arriverait sur toute la parcelle mais serait infiltrée de façon différée dans le temps.

De surcroît, il se peut que les données d'entrée au niveau de Xirene soit sur-estimées par rapport à la réalité. En choisissant comme hydrogrammes aux jonctions l'hydrogramme mesuré à l'exutoire du réseau rapporté à la superficie drainée correspondante, il se pourrait que ces derniers soient sur-estimés. La période d'étude comportant de nombreuses crues, l'ensemble du réseau peut être considéré en charge. Ainsi, l'arrivée d'eau aux jonctions pourrait être tamponnée du fait d'une capacité limitée d'évacuation de l'eau pouvant se produire sur la totalité du réseau. Ainsi, cette eau arriverait bien, mais de façon différée impliquant des volumes moins importants que ceux simulés.

Par contre, il est à noter qu'on arrive à simuler des débits négatifs et aux bonnes périodes mais l'allure de la courbe au niveau de ces débits n'est pas en harmonie avec celle représentant les débits mesurés à l'aval du collecteur. Le processus itératif ne mène manifestement pas sous cette forme à une amélioration de la quantification de ces débits négatifs.

3) Limites des modèles et discussion

Au vue des différences notables entre les hydrogrammes simulés et l'hydrogramme mesuré au collecteur, il semble exister des limites aux modèles quant à la représentation de l'écoulement dans la zone d'étude considérée.

a. limites des modèles

- Limites du modèle Xirene

Deux conditions font que le modèle Xirene arrête les simulations, des conduites à sec et un écoulement torrentiel. Xirene est usuellement employé pour des études d'écoulements de rivières et de canaux à pentes faibles, de l'ordre de 1/10000. Or, les pentes des conduites du réseau de drainage sont ici de l'ordre de 1/1000 et 1/4000. Cette pente relativement forte peut engendrer des écoulements rapides jusqu'à provoquer des écoulements torrentiels. Les débits au sein des conduites étant relativement faibles, de l'ordre du l/s au centième de l/s, ils sont considérés comme faibles. Avec des variations numériques, ces derniers peuvent être approximés à zéro et ainsi engendrer des conduites à sec. De plus, de faibles tirants d'eau peuvent provoquer des écoulements torrentiels par variations rapides du filet d'eau au sein de

la conduite. En ce qui concerne la fente de Preissmann, elle permet de s'astreindre de la mise en charge. Par contre, elle génère des hauteurs d'eau parfois très importantes qui peuvent aller jusqu'au mètre en moins d'une heure. Ceci entraîne des variations de tirant d'eau et des vitesses d'écoulement très rapides provoquant des écoulements torrentiels ou encore des conduites à sec par approximation de la valeur du tirant d'eau à zéro lorsque la conduite n'est plus en charge (passage d'une hauteur de plus d'un mètre à moins de 0,06 m en moins d'une heure avec des variations numériques). Ainsi, lors de cette étude, de nombreuses contraintes existent quant au fonctionnement du modèle Xirene. Pour des réflexions de fonctionnement hydraulique de réseau de drainage agricole, Xirene a été utilisé mais plus sur des applications théoriques où les données d'entrée ne perturbaient pas le bon fonctionnement du modèle. Ici, sur un cas réel, il est intéressant de voir la complexité du fonctionnement du système considéré.

- Limites du modèle Hydrowin

Une des principales réflexions au niveau des hydrogrammes en sortie d'Hydrowin est la différence de volumes drainés entre ce qui est simulé et ce qui est mesuré sur le terrain. En effet, lors de périodes de pics de débit, ces pics simulés sont toujours relativement plus importants que ceux mesurés. Afin d'expliquer cette sur-estimation de débits lors des simulations, on peut émettre différentes hypothèses. Il se pourrait qu'il puisse exister une infiltration profonde que le modèle ne prend pas en compte. En effet, l'eau issue des précipitations arrive bien sur la parcelle. Les volumes d'eau ainsi formés existent bien mais ne sont pas observés au niveau du collecteur instrumenté. Ainsi, cette eau doit bien être évacuée dans la réalité. On sait qu'Hydrowin ne tient pas compte d'infiltration profonde, car c'est un phénomène qui est difficile à mettre en situation. En effet, cette infiltration profonde, si elle existe, est-elle toujours la même et où est-elle localisée et quel est son taux. En outre, Hydrowin ne tient pas compte d'un stockage temporaire dans un horizon superficiel du sol. Ainsi, si on considère que l'apport d'eau dans les drains se fait de façon différée avec des pics de débits moindre que ce qui est attendu (à cause d'un meilleur stockage de l'eau dans le sol), ceci implique des mêmes volumes d'eau transférés mais à des temps plus longs que ce qui est simulé. De surcroît, au vu du choix des paramètres d'entrée d'Hydrowin, il se peut que les simulations en soient modifiées. Tout d'abord, les paramètres intrinsèques du sol semblent les plus adéquats car ils représentent relativement bien le sol du site d'étude. En revanche, il est à savoir que si on augmente la porosité de drainage, les volumes d'eau diminuent au niveau des pics mais ceci se répercute sur l'ensemble de l'hydrogramme. Même si les pics de débit diminuent, les volumes d'eau, dus aux précipitations, restent les mêmes. Si la perméabilité diminue, le sol devient moins perméable. L'eau qui arrive doit passer dans la nappe. Si le sol est moins perméable, ce phénomène mettra plus de temps à se faire. Ainsi, les pics de crue diminuent, mais laissent place à une allure de la courbe en paliers, une augmentation permanente de la valeur des débits dans le temps suivant l'arrivée ponctuelle des pluies. Ainsi, les paramètres de sol utilisés semblent être les plus adéquats.

De plus, une des principales interrogations concerne le choix de la hauteur d'eau à l'aplomb du drain lors des simulations d'Hydrowin. On remarque, entre la première et la dernière itération, qu'on commence à simuler des débits négatifs aux mêmes périodes que ceux mesurés au collecteur instrumenté, mais que l'allure de ces débits simulés ne coïncide pas avec la réalité. Les hauteurs utilisées sont théoriques et parfois incohérentes avec la réalité. Les manières de les obtenir et de les utiliser pour les calculs d'Hydrowin sont probablement mal adaptées. En effet, au pas de temps horaire d'Hydrowin, il se peut que ces fortes variations de tirant d'eau en très peu de temps induisent des débits en sortie du modèle non réalistes. Le pas de temps de calcul d'Hydrowin et la mise en forme des hydrogrammes partagés sont probablement inadaptés. Ils impliqueraient une sur-estimation des débits négatifs et des pointes de ces derniers relativement fortes et brèves. En outre, la simplification

de l'assimilation du drain à un fossé peut modifier les résultats par rapport à la réalité. Le mode d'entrée de l'eau, de la nappe vers le fossé, se fait de façon horizontale sur toute la hauteur du fossé en contact avec la nappe. Pour un drain, l'écoulement est différent. Le drain est percé à certains endroits. Ainsi, l'échange d'eau se fait à travers ces pores situés sur toute la partie radiale du drain.

b. discussion

Ainsi, à première vue, il se pourrait que les débits simulés ne soient pas sur-estimés par rapport aux débits mesurés. Par contre, il se pourrait que tout le volume d'eau infiltré ne passe pas dans les drains. On pourrait émettre l'hypothèse d'une infiltration vers une nappe plus profonde. Il se pourrait également que les volumes d'eau n'arrivant pas dans le drain remplissent la zone non saturée du sol. Ces hypothèses pourraient expliquer le fait que toute l'eau arrivant sur la parcelle pendant les périodes de pluie ne soit pas observée au niveau du collecteur instrumenté, mais au niveau des hydrogrammes simulés de débit de nappe. De plus, ces différences de volumes d'eau entre le mesuré et le simulé ne semblent pas provenir du ruissellement car les données d'infiltration réelle (donnée par Hydrus) enlèvent ce ruissellement. En outre, ce ruissellement n'est pas retrouvé à l'aval de la parcelle voire du bassin versant. Hydrowin ne tenant pas compte d'infiltration profonde, les surplus de volume d'eau évacués probablement en profondeur ne peuvent pas apparaître sur les simulations. On observe alors un surplus d'eau au niveau de l'hydrogramme de débits de nappe. De plus, si tel est le cas, il semble difficile de mettre en situation une telle infiltration profonde. En effet, il se peut qu'elle ne soit pas toujours forcément d'une même intensité et répartie de façon homogène sur le site d'étude. Il en va de même pour un stockage d'eau dans la zone non saturée. De plus, cette différence de volume d'eau, durant cette période, entre les données du collecteur et ce qui est simulé par Hydrowin, nous indique que ce volume n'est ni dans le collecteur ni dans la nappe. On peut éliminer l'hypothèse d'une évapotranspiration car aux mois de février-mars les températures maximales avoisinent les 14° C et la parcelle agricole étudiée est nue (en attente de semences de blé). Ceci n'est pas favorable à de l'évapotranspiration (températures pas assez élevées et absence de végétation). En outre, durant ces périodes, les précipitations relevées correspondent bien à de la pluie et non à de la neige. Ainsi, cette différence de volume ne peut s'expliquer par une accumulation d'eau à la surface du sol modifiant alors les volumes d'eau précipités par rapport aux volumes infiltrés. De surcroît, il est probable que le collecteur ait mal été instrumenté et que son emplacement est mal été choisi. Il se trouve tout à l'aval d'une parcelle en pente, au niveau d'un point bas. (cf Fig. 7). De plus, il est juste à l'amont d'une jonction avec une surface drainée 9,6 fois supérieure à la parcelle étudiée et relativement proche de l'exutoire impliquant une relativement facile mise en charge.

CONCLUSION

Le drainage est largement présent dans l'agriculture. Dans les régions tempérées, telles qu'en France, il a pour but de lutter contre les excès d'eau et l'engorgement des cultures. L'étude a été effectuée dans le bassin versant de Goins, situé en Seine-et-Marne (77), d'une superficie de 1,3 km². Ce bassin versant est essentiellement agricole et 90 % de ces parcelles sont drainées. Il constitue un relativement bon site d'étude de drainage réel agricole par réseau enterré. Lors de relativement fortes périodes de crue, on note, au sein d'un collecteur, un phénomène encore peu étudié : des débits négatifs. On considère que ce phénomène, qui peut jouer un rôle de rétention, caractérise le comportement en crue du réseau de drainage enterré. L'intérêt de cette étude est de travailler sur un réseau réel, à partir des données de terrain mesurées sur le bassin versant de Goins. Une réflexion s'est faite sur la reconstitution du réseau et de sa représentation sur un SIG, QGIS, ainsi que sur le choix du jeu de données en entrée des modèles, Xirene et Hydrowin, de leur aspects pratiques de couplage, et sur le fonctionnement hydraulique de la zone étudiée.

Il apparaît sur ce site d'étude un fonctionnement particulier du réseau réel de drainage enterré. Les débits négatifs apparaissent lors de relativement fortes périodes de crue suivant certaines conditions environnementales, ainsi que suivant l'organisation et le dimensionnement du réseau. En effet, il semble que les débits négatifs dépendent des précipitations, mais aussi de l'arrivée de l'eau à certains endroits tels qu'aux jonctions où une circulation importante à ce niveau peut engendrer une remontée de l'eau dans la conduite du dessus. Ceci est associé à une influence aval du réseau le mettant en charge et limitant les écoulements vers l'exutoire, ainsi que suivant le dimensionnement du réseau contraignant les écoulements.

En ce qui concerne le fonctionnement de la nappe, au vu des données de terrain et notamment au vu des données piézométriques, il se pourrait que la nappe soit une nappe locale temporaire. Elle se remplirait alors soit par une recharge issue des précipitations et/ou soit par un écoulement allant des drains vers la nappe. Ceci est possible dans la mesure où on considère que le sol est hétérogène à texture limono-argileuse. Dans ce cas, il se peut alors que cette nappe soit effectivement locale, dans la zone instrumentée. De plus, il est à noter que la zone d'instrumentation se situe au niveau d'un point bas, ce qui pourrait avérer cette hypothèse.

Lorsqu'on compare les simulations aux données de terrain, des différences de volumes d'eau drainés apparaissent nettement. Les volumes drainés simulés sont relativement plus importants que ceux observés sur le terrain. On peut émettre plusieurs hypothèses pour justifier cette différence notable. Il se pourrait qu'il y ait une infiltration profonde ou encore un stockage temporaire d'eau dans la zone non saturée du sol. Dans ce cas, les mêmes volumes d'eau arrivent sur la parcelle mais leur écoulement est différé dans le temps. Ces deux hypothèses ne peuvent pas être vérifiées dans la mesure où elles ne sont pas prises en compte par les modèles. En outre, il se peut qu'il y ait une sur-estimation des données d'entrée de Xirene. En effet, si on considère que le réseau est en charge, il se pourrait que l'apport d'eau au niveau des jonctions soit sur-estimé.

Les modèles utilisés ne sont pas prévus initialement pour ce type d'étude. Les contraintes réelles sont plus fortes que lors d'études hydrauliques de réseau de drainage théorique. Les hypothèses émises lors de cette étude sont simplifiées mais tentent de rester les plus cohérentes possibles avec la réalité. Il se pose alors la question de l'emplacement de l'instrumentation qui pourrait compliquer l'étude. Suivant l'organisation de ce réseau de drainage, la partie instrumentée du collecteur semble être le lieu d'un fonctionnement hydraulique particulier du réseau.

En perspective, il serait intéressant de poursuivre l'étude avec des données de terrain complémentaires lors des prochaines périodes de drainage en implantant des mesures de hauteurs d'eau ou des capteurs de pression au sein du collecteur. Il serait intéressant également d'instrumenter une autre partie du collecteur, y faire des mesures de débits mais plus en amont de la parcelle et de faire une étude complémentaire des parties annexes du réseau afin de voir si leurs écoulements ont été effectivement sur-estimés.

De plus, une réflexion sur une évolution des modèles avec un couplage effectif au niveau de chaque drain, des pas de temps adaptés aux deux milieux sont indispensables. De même, la prise en compte de nouvelles hypothèses telles qu'une infiltration profonde ou un possible stockage d'eau temporaire pourrait être à envisager afin de pouvoir voir si on peut répondre au problème de différence de transfert de volume d'eau entre ce qui est mesuré et ce qui est simulé.

BIBLIOGRAPHIE

Augeard, B., C. Kao, et al. (2005). "Mechanisms of surface runoff genesis on a subsurface drained soil affected by surface crusting: A field investigation." *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **30**(8-10), 598-610.

Bouarfa, S. (1995). "Drainage en périmètre irrigué, Prise en compte de l'évaporation dans la modélisation saturée du drainage". Cemagref, Antony, 253.

Bourdarias, S. G. (2006). "A finite volume scheme for a model coupling free surface and pressurised flows in pipes." *Journal of computational and applied mathematic*,: 23.

Da Conceicao, C. (2006). "Modélisation de la rétention de crues de drainage en réseau enterré influencé". Cemagref, Antony, unité Hydrosystèmes et bioprocédés, Université Paris VI. Master 1 spécialité Mécanique des fluides et énergétique, 39.

Delahaye A.(1975). Plan de géomètres-experts. Drainage en commun au hameau de Goins, n° d'inscription 2236, 1/1250

IGN (1970). Coulommiers n° 3-4 1/25000.

Nedelec, Y. (2005). Interactions en crues entre drainage souterrain et assainissement agricole. *Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts*. Paris, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, 231.

Poirson, M. (1998). "Modélisation numérique unidimensionnelle en régime fluvial de réseau hydraulique à surface libre". Cemagref, Antony, 99.

Ritzema, H. P. (1994). *Drainage principles and applications*, International Institute for Land Reclamation and Improvement.

Wiskow, E. and R. R. van der Ploeg (2003). "Calculation of drain spacings for optimal rainstorm flood control." *Journal of Hydrology* **272**(1-4), 163-174

Annexe 1 Discrétisation des équations de Barré de Saint-Venant (Poirson, 1998)

Rappel des équations de Barré de Saint-Venant

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(-Q) + q \quad (1) \text{ équation de continuité}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}[\beta (Q^2/S)] - g S \frac{\partial Z}{\partial x} - g S J + \varepsilon q (Q/S) \quad (2) \text{ équation dynamique}$$

- avec $\frac{\partial}{\partial t}$ dérivée partielle par rapport au temps t
 $\frac{\partial}{\partial x}$ dérivée partielle par rapport à l'abscisse x
 S surface mouillée (m²)
 Q débit (m³/s)
 Z cote (m)
 J pente de la ligne de charge
 q débit latéral par unité de longueur (m³/s/m)
 β coefficient de quantité de mouvement
 g accélération de la pesanteur (m²/s)
 ε 0 si apport de débit latéral ou 1 si fuite

Préliminaire à la discrétisation des équations de Barré de Saint-Venant

Dans un premier temps, on peut résoudre le cas de $\frac{\partial Z}{\partial x}$.

En effet, on peut déduire des hypothèses de base que la courbure de la ligne d'eau est négligeable entre deux sections j et $j+1$.

Cela signifie que $\frac{\partial Z}{\partial x}$ est constant sur le pas d'espace $\delta x = |x_{j+1} - x_j|$

Ce qui se traduit par

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{\partial Z}{\partial x} Z_j = \frac{\partial Z}{\partial x} Z_{j+1} = \frac{Z_{j+1} - Z_j}{\delta x} = \frac{\delta Z}{\delta x}$$

Sous cette hypothèse on peut poser

$$V = \begin{vmatrix} S \\ Q \end{vmatrix} \quad U = \begin{vmatrix} -Q \\ -\beta \frac{Q^2}{S} \end{vmatrix} \quad W = \begin{vmatrix} q \\ -g.S \frac{\delta Z}{\delta x} - g.S.J + \varepsilon q \frac{Q}{S} \end{vmatrix}$$

Le système des équations de Saint-Venant s'écrit alors

$$\boxed{\frac{\partial}{\partial t} V = \frac{\partial}{\partial x} U + W} \quad (1)$$

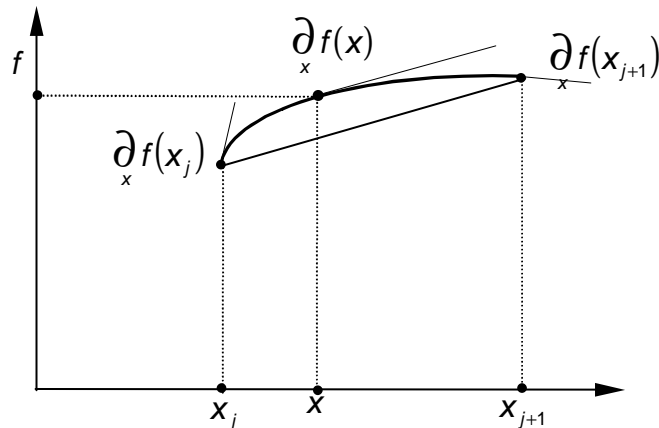
Principe de discrétisation

La discrétisation des équations de Barré Saint Venant reposera sur le théorème des accroissements finis.

Soit $f(x)$ une fonction continue et dérivable et $x \in]x_j, x_{j+1}[$, on a

$$\partial_x f(x) = \frac{f(x_{j+1}) - f(x_j)}{x_{j+1} - x_j} = \frac{\delta f}{\delta x}$$

ce que représente graphiquement la figure ci-dessous



Il est facile de s'apercevoir qu'en un point de l'arc, la tangente est parallèle à la sécante. Soit l'approximation de cette tangente au point x par une interpolation linéaire des tangentes aux points x_j et x_{j+1} , on a

$$\partial_x f(x) = (1 - \omega) \partial_x f(x_j) + \omega \partial_x f(x_{j+1})$$

avec $\omega = \frac{x - x_j}{\delta x}$ coefficient d'interpolation linéaire compris entre 0 et 1.

On obtient ainsi une relation entre les dérivés partielles aux extrémités de l'intervalle et un rapport de différences finies (cf (2)).

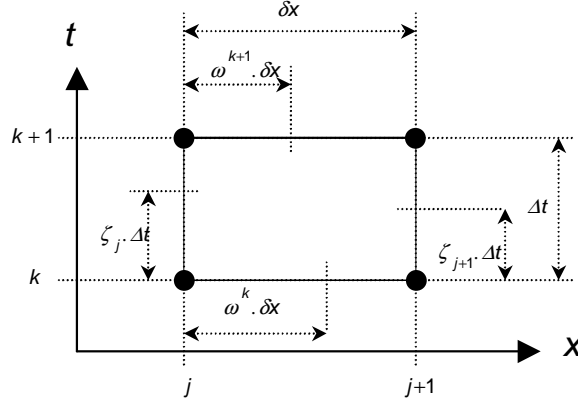
$$\boxed{(1 - \omega) \partial_x f(x_j) + \omega \partial_x f(x_{j+1}) = \frac{\delta f}{\delta x}} \quad (2)$$

Discrétisation

La résolution des équation de Barré de Saint-Venant nécessite une double discrétisation dans le temps et dans l'espace.

On note δ les variations dans l'espace et Δ les variations temporelles. L'indice spatial est en bas et l'indice temporel en haut.

Notons ω le coefficient d'interpolation linéaire pour la discrétisation spatiale et ζ pour la discrétisation temporelle.



Il existe alors quatre équations de discrétisation :

- à l'abscisse j entre les instants k et $k+1$:

$$(1-\zeta_j) \partial_t V_j^k + \zeta_j \partial_t V_j^{k+1} = \frac{\Delta V_j}{\Delta t}$$

- à l'abscisse $j+1$ entre les instants k et $k+1$:

$$(1-\zeta_{j+1}) \partial_t V_{j+1}^k + \zeta_{j+1} \partial_t V_{j+1}^{k+1} = \frac{\Delta V_{j+1}}{\Delta t}$$

- à l'instant k entre les abscisses j et $j+1$:

$$(1-\omega^k) \partial_x U_j^k + \omega^k \partial_x U_{j+1}^k = \frac{\delta U^k}{\delta x}$$

- à l'instant $k+1$ entre les abscisses j et $j+1$:

$$(1-\omega^{k+1}) \partial_x U_j^{k+1} + \omega^{k+1} \partial_x U_{j+1}^{k+1} = \frac{\delta U^{k+1}}{\delta x}$$

Et quatre fois le système de Saint-Venant :

- en j et k : $\partial_t V_j^k = \partial_x U_j^k + W_j^k$

- en j et $k+1$: $\partial_t V_j^{k+1} = \partial_x U_j^{k+1} + W_j^{k+1}$

- en $j+1$ et k : $\partial_t^k \mathcal{V}_{j+1}^k = \partial_x^k \mathcal{U}_{j+1}^k + W_{j+1}^k$

- en $j+1$ et $k+1$: $\partial_t^{k+1} \mathcal{V}_{j+1}^{k+1} = \partial_x^{k+1} \mathcal{U}_{j+1}^{k+1} + W_{j+1}^{k+1}$

On obtient le système suivant,

	$\partial_t^k \mathcal{V}_j^k$	$\partial_t^{k+1} \mathcal{V}_j^{k+1}$	$\partial_t^k \mathcal{V}_{j+1}^k$	$\partial_t^{k+1} \mathcal{V}_{j+1}^{k+1}$	$\partial_x^k \mathcal{U}_j^k$	$\partial_x^k \mathcal{U}_{j+1}^k$	$\partial_x^{k+1} \mathcal{U}_j^{k+1}$	$\partial_x^{k+1} \mathcal{U}_{j+1}^{k+1}$	
{1}	$(1-\zeta_j)$	ζ_j							$\frac{\Delta \mathcal{V}_j}{\Delta t}$
{2}			$(1-\zeta_{j+1})$	ζ_{j+1}					$\frac{\Delta \mathcal{V}_{j+1}}{\Delta t}$
{3}					$(1-\omega^k)$	ω^k			$\frac{\partial \mathcal{U}^k}{\partial x}$
{4}							$(1-\omega^{k+1})$	ω^{k+1}	$\frac{\partial \mathcal{U}^{k+1}}{\partial x}$
{5}	1				-1				W_j^k
{6}		1					-1		W_j^{k+1}
{7}			1			-1			W_{j+1}^k
{8}				1				-1	W_{j+1}^{k+1}

On triangule ce système par la méthode de Gauss,

	$\partial_t^k \mathcal{V}_j^k$	$\partial_t^{k+1} \mathcal{V}_j^{k+1}$	$\partial_t^k \mathcal{V}_{j+1}^k$	$\partial_t^{k+1} \mathcal{V}_{j+1}^{k+1}$	$\partial_x^k \mathcal{U}_j^k$	$\partial_x^k \mathcal{U}_{j+1}^k$	$\partial_x^{k+1} \mathcal{U}_j^{k+1}$	$\partial_x^{k+1} \mathcal{U}_{j+1}^{k+1}$	
{5}	1				-1				W_j^k
{6}		1					-1		W_j^{k+1}
{7}			1			-1			W_{j+1}^k
{8}				1				-1	W_{j+1}^{k+1}
{3}					$(1-\omega^k)$	ω^k			$\frac{\partial \mathcal{U}^k}{\partial x}$
{1}{5}{6}{3}						$-\omega^k(1-\zeta_j)$	$(1-\omega^k)\zeta_j$		C_j
{4}							$(1-\omega^{k+1})$	ω^{k+1}	$\frac{\partial \mathcal{U}^{k+1}}{\partial x}$
{2}{7}{8}{4} {1}{5}{6}{3}						A		0	C

avec

$$C_j = (1 - \omega^k) \left[\frac{\Delta V_j}{\Delta t} - (1 - \zeta_j) W_j^k - \zeta_j \cdot W_j^{k+1} \right] - (1 - \zeta_j) \frac{\delta U^k}{\delta x}$$

$$C_{j+1} = \omega^{k+1} \cdot \left[\frac{\Delta V_{j+1}}{\Delta t} - (1 - \zeta_{j+1}) W_{j+1}^k - \zeta_{j+1} \cdot W_{j+1}^{k+1} \right] - \zeta_{j+1} \cdot \frac{\delta U^{k+1}}{\delta x}$$

$$A = (1 - \omega^k) \zeta_j \cdot \omega^{k+1} \cdot (1 - \zeta_{j+1}) - (1 - \omega^{k+1}) \zeta_{j+1} \cdot \omega^k \cdot (1 - \zeta_j)$$

$$C = (1 - \omega^k) \zeta_j \cdot C_{j+1} + (1 - \omega^{k+1}) \zeta_{j+1} \cdot C_j$$

Le système a des solutions pour A=0 et C=0,
on obtient

$$A = 0 \rightarrow (1 - \omega^k) \zeta_j = (1 - \omega^{k+1}) \zeta_{j+1} \lambda \quad \text{où} \quad \lambda = \frac{\omega^k \cdot (1 - \zeta_j)}{\omega^{k+1} \cdot (1 - \zeta_{j+1})}$$

$$C = 0 \rightarrow C_j + \lambda C_{j+1} = 0$$

Ainsi le système de Barré de Saint-Venant discrétisé peut s'écrire,

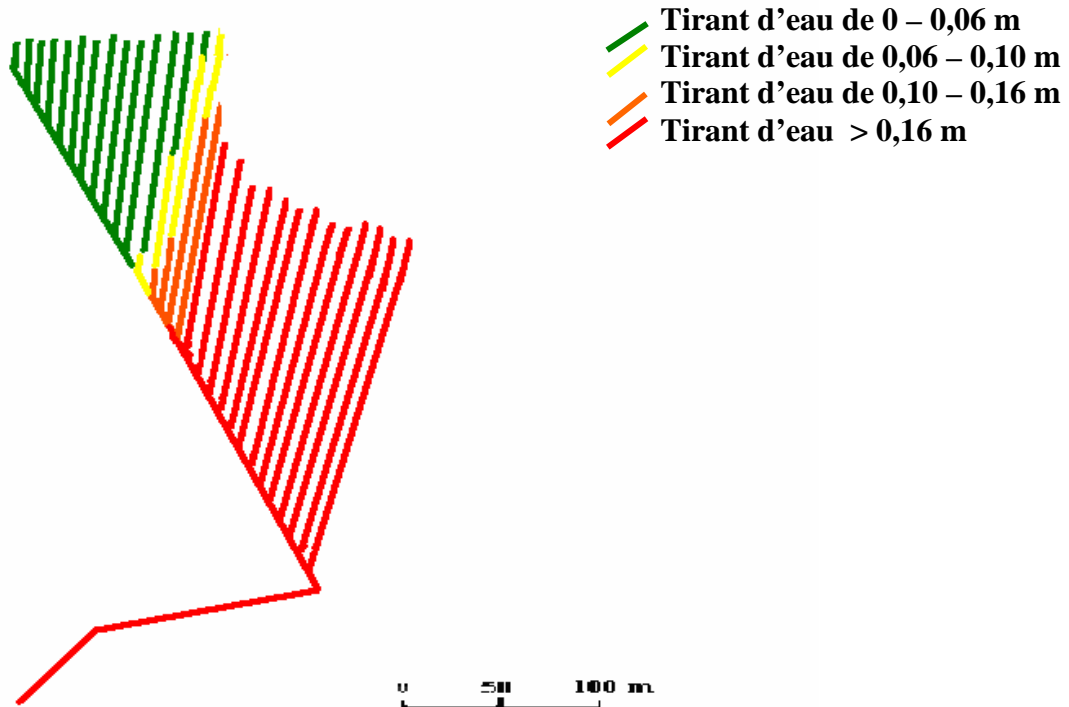
$$\frac{\omega^k \cdot \zeta_j \cdot \Delta V_{j+1}}{\Delta t} = \frac{\omega^k \cdot \zeta_j \cdot U_{j+1} - \omega^k \cdot \zeta_j \cdot U_j}{\Delta x} + \frac{\omega^k \cdot \zeta_j \cdot W_{j+1} + \omega^k \cdot \zeta_j \cdot W_j}{\Delta x} - \frac{\omega^k \cdot \zeta_j \cdot \Delta U_{j+1} + \omega^k \cdot \zeta_j \cdot \Delta U_j}{\Delta x}$$

En supposant $\omega^k = \omega^{k+1} = \omega$ et $\zeta_j = \zeta_{j+1} = \zeta$, on obtient la discrétisation de Preissmann,

$$\frac{\omega \cdot \zeta \cdot \Delta V_{j+1}}{\Delta t} = \frac{\omega \cdot \zeta \cdot U_{j+1} - \omega \cdot \zeta \cdot U_j}{\Delta x} + \frac{\omega \cdot \zeta \cdot W_{j+1} + \omega \cdot \zeta \cdot W_j}{\Delta x} - \frac{\omega \cdot \zeta \cdot \Delta U_{j+1} + \omega \cdot \zeta \cdot \Delta U_j}{\Delta x}$$

Annexe 2

Légende



Répartition des hauteurs d'eau au sein des conduites à 1 jour de simulation lors de la phase d'initialisation

Un exemple de répartition des hauteurs d'eau dans les conduites du réseau de drainage considéré. Ce schéma de répartition des hauteurs d'eau au sein des conduites à un instant donné est issue du SIG QGIS. Ce dernier est en connexion avec les données en sortie de Xirene. Grâce au SIG, il est possible de se représenter spatialement ce qui est simulé à un instant donné.

On se trouve vers 1 jour de simulation lors de l'itération 0, soit vers le 1 mars 2007. Cette période se situe peu de temps avant la première période de débits négatifs mesurés au collecteur. On rappelle que la condition aval du réseau se trouve en charge durant la quasi totalité de la période d'étude avec des valeurs de hauteur d'eau plus ou moins importantes dans le temps. On rappelle également que le diamètre des drains est de 0,06 m, que celui du collecteur est de 0,10 m dans sa partie connectée aux drains et de 0,16 m dans sa partie aval. En outre, avec le modèle de la fente de Preissmann, lorsque le réseau passe en charge, les calculs hydrauliques à surface libre sont toujours possibles, car l'eau remplit une fine fente fictive (de l'ordre du centimètre) considérée en contact avec l'atmosphère. Ce modèle implique donc d'avoir des hauteurs d'eau dans les conduites supérieures aux diamètres de ces dernières lorsque le réseau passe en charge.

Alors que l'aval du réseau est en charge, on remarque que les drains les plus à l'amont de la parcelle ne le sont pas (tirant d'eau complètement inférieur à 0,06 m pour les 13 drains à l'amont de la parcelle). On remarque que la mise en charge se fait de manière graduelle avec des hauteurs d'eau moins importantes entre l'amont d'un drain et son aval. Ceci s'observe par exemple au niveau des drains vers le milieu de la parcelle avec une croissance des variations des hauteurs d'eau observée. Le reste de la parcelle est en charge. Cette décroissance de mise en charge peut être expliquée par l'organisation en pente du réseau allant du point le plus haut en amont au point le plus bas à l'aval. Cette organisation sert à faciliter la circulation de l'eau dans les conduites.