



Le ruissellement sur sols drainés : identification des mécanismes de genèse

Bénédicte Augeard, Cyril Kao, Jérôme Ledun, Cédric Chaumont, Yves Nedelec

► To cite this version:

Bénédicte Augeard, Cyril Kao, Jérôme Ledun, Cédric Chaumont, Yves Nedelec. Le ruissellement sur sols drainés : identification des mécanismes de genèse. Ingénieries eau-agriculture-territoires, 2005, 43, p. 3 - p. 18. hal-00476118

HAL Id: hal-00476118

<https://hal.science/hal-00476118v1>

Submitted on 23 Apr 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le ruissellement sur sols drainés : identification des mécanismes de genèse

Bénédicte Augeard, Cyril Kao, Jérôme Ledun, Cédric Chaumont et Yves Nédélec

La compréhension des mécanismes de ruissellement sur les sols agricoles est indispensable pour orienter les actions visant à réduire les risques de crues et de dégradation de la qualité des eaux superficielles. Dans le domaine des sols drainés, cet article propose une synthèse originale des nouvelles connaissances acquises sur le terrain : fonctionnement hydrique, relations entre les états du sol et les fluctuations de la nappe, fonctionnement hydraulique du réseau enterré, comportements lors d'épisodes pluvieux intenses... Ces informations sont utiles notamment pour le diagnostic d'implantation de bandes enherbées dans le cadre de la nouvelle PAC.

En France, près de 7 millions d'hectares de terres agricoles sont affectés par l'hydromorphie. Les origines de l'engorgement des sols peuvent être variées selon que l'on considère des terres de plateaux, de versants ou de fonds de vallées. Ces zones sont presque systématiquement caractérisées par une forte implantation d'aménagements hydro-agricoles, où drainage et assainissement par fossés contribuent à l'amélioration des conditions d'exploitation agricole. Ce sont ainsi près de 3 millions d'hectares qui sont actuellement drainés en France, essentiellement par tuyaux enterrés (Mérot *et al.*, 2005).

Les enjeux liés à la maîtrise des impacts environnementaux de ce type d'aménagements sont majeurs, car la prédominance des circulations superficielles induit un risque aggravé de crues et une dégradation de la qualité des eaux superficielles. Les actions compensatoires encouragées (bandes enherbées, retenues tampons...) ne sont pas nécessairement raisonnées en tenant compte du fonctionnement spécifique de ces aménagements, limitant ainsi leur efficacité potentielle. Tout en gardant leur objectif opérationnel, les recherches menées sur l'impact des aménagements hydro-agricoles doivent s'appuyer sur une connaissance approfondie des processus hydrologiques spécifiques des bassins versants aménagés.

Dans ce sens, l'étude de la partition locale entre infiltration et ruissellement constitue une étape

de base dans la description des écoulements de l'eau dans un bassin versant. Or, cette étape n'est pas totalement maîtrisée compte tenu de la complexité et de la variabilité des facteurs influents. Ces facteurs peuvent être liés à la structure des premiers horizons du sol (battance¹, effondrement de l'horizon travaillé) (Boiffin, 1984) ou aux conditions d'écoulement dans le sol (conditions d'humidité, hauteur de la nappe).

En prolongement des travaux présentés par Nédélec *et al.* dans cette même revue, l'objectif de cet article est de faire le point sur les connaissances acquises sur les mécanismes contrôlant la genèse du ruissellement dans les parcelles agricoles drainées. Ce travail s'appuie en particulier sur les résultats de suivis expérimentaux menés par le Cemagref depuis une dizaine d'années.

Après avoir rappelé les principaux concepts classiquement utilisés pour expliquer les processus de genèse du ruissellement à l'échelle parcellaire, nous préciserons les facteurs contrôlant les phénomènes de battance des sols. Le fonctionnement hydrique spécifique des sols drainés sera illustré à travers les principaux résultats acquis sur le site expérimental de La Jaillière (44). Nous présenterons ensuite les effets combinés des états de surface du sol et des fluctuations de la nappe drainée sur la genèse du ruissellement, à travers les résultats acquis sur le bassin versant expérimental de l'Orgeval (77). Enfin, nous montrerons comment les caractéristiques hydrauliques du réseau enterré peuvent le cas échéant expliquer

1. Modification de l'état structural de la surface du sol sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie.

Les contacts

Cemagref, UR Hydro-systèmes et bioprocédés, Parc de Tourvoile, BP 44, 92163 Antony Cedex

une partie des phénomènes de ruissellement sur ce type de bassin. Précisons que l'étude spécifique des chemins d'écoulement et des distances de transfert du ruissellement n'est pas abordée dans le présent article.

Les principaux mécanismes de genèse du ruissellement

Les schémas traditionnels

Il est courant de distinguer deux processus pour expliquer l'apparition du ruissellement : d'une part, le refus d'infiltration d'un sol non saturé et d'autre part, le refus d'infiltration d'un sol saturé.

Le premier phénomène cité, le ruissellement dit « hortonien », apparaît lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol. Ce ruissellement est observé sur des sols initialement secs, en particulier sous des climats à pluviométrie de forte intensité (par exemple, les climats semi-arides ou méditerranéens). Il peut aussi résulter de la formation de croûtes de surface peu perméables liées aux phénomènes de battance dans certaines zones de climats humides où les sols limoneux ont une faible stabilité structurale.

Le ruissellement sur sol saturé, quant à lui, se développe lorsqu'une nappe est présente à proximité de la surface : pendant la pluie, le sol peut se saturer entièrement, l'infiltration est alors contrôlée par les écoulements dans la nappe et reste souvent très faible. Ce mécanisme se rencontre dans les zones situées à proximité d'un cours d'eau (car la nappe est proche de la surface). Les surfaces où sont générés ces écoulements sont appelées « surfaces contributives ». Leur évolution dans le temps et dans l'espace a fait l'objet de nombreux travaux (Dunne et Black, 1970 ; Beven et Kirkby, 1979 ; Mérot, 1988 ; Ambroise *et al.*, 1996). Ce type de ruissellement se rencontre aussi sur les plateaux lorsqu'un horizon imperméable à faible profondeur entraîne la présence de nappes perchées temporaires.

Comme le montrent certains travaux (Cros-Cayot, 1996 ; Kao *et al.*, 1998), ces types de ruissellement présentent une forte variabilité spatiotemporelle et peuvent coexister sur un même bassin versant. Ainsi, du ruissellement par saturation peut apparaître en hiver en condition de forte humidité. Parallèlement, si la couverture végétale est peu développée et la structure du sol insta-

ble, les pluies automnales et hivernales peuvent conduire à la formation d'une croûte de battance limitant l'infiltrabilité du sol, créant ainsi des conditions favorables à l'apparition de ruissellement de type hortonien. Dans le paragraphe suivant, nous revenons sur les principaux déterminants responsables de ces conditions.

Infiltrabilité du sol et états de surface

Dans beaucoup de sols limoneux, la proportion de matériaux liants (argile, matière organique) est insuffisante pour assurer la formation d'agrégats stables. Cette instabilité conduit à la formation de croûtes de battance qui réduisent considérablement la perméabilité du sol (Boiffin, 1984). À partir d'un état fragmentaire, poreux, créé par la dernière opération de travail du sol, deux phases de dégradation se succèdent (Bresson et Boiffin, 1990) :

- dans un premier temps, le compactage par la pluie d'une couche de sol en surface et le colmatage des interstices par les fines particules détachées des mottes réduisent la capacité d'infiltration du sol ; la **croûte structurale** se met en place ;
- dans un deuxième temps, lorsque l'intensité des pluies est supérieure à cette capacité d'infiltration, l'excès d'eau qui se forme en surface met en suspension les particules détachées des mottes. Celles-ci sont transportées et se déposent en formant des strates de granulométrie différente. Cette croûte est appelée **croûte sédimentaire**.

Outre la formation de ces deux types de croûtes de battance, la pluie combinée à la présence d'une nappe superficielle peut entraîner un **effondrement du lit de semence** ou de l'horizon labouré et diminuer la capacité d'infiltration et de stockage de cet horizon.

La dégradation de l'état de surface du sol est fonction (Auzet, 1987) :

- des caractéristiques des agrégats, notamment de la composition granulométrique (la teneur en argile augmente la stabilité ; les sols limoneux sont souvent instables), de la matière organique (qui augmente la stabilité) et de l'état et l'histoire hydrique ;
- des caractéristiques de la pluie, en particulier de l'énergie cinétique des gouttes ;
- de l'exposition du sol à la pluie (couvert végétal).

Sur les terres agricoles, la formation de la croûte de battance et l'effondrement de l'horizon labouré sont intimement liés aux pratiques culturales et aux systèmes de culture qui modifient la structure et la composition du sol ainsi que le couvert végétal (Martin, 1997) : création d'une surface fragmentaire au semis, couvert végétal de plus en plus important, récolte avec forte densité de traces de roues, labour éventuel. De par ses actions, en contrôlant les dates et le choix des techniques, l'exploitant agricole peut contribuer à l'accélération ou au ralentissement de la dégradation superficielle des sols.

Enfin, l'infiltration sur les terres agricoles est aussi influencée par l'activité biologique (macropores de lombrics, racines, galeries...) et l'éventuelle présence de fissures (fentes de dessiccation) qui dépendent elles-mêmes du travail du sol et du bilan hydrique des cultures.

L'évolution des états de surface et de la capacité d'infiltration du sol est donc conditionnée à la fois par les conditions pédoclimatiques du site et par les pratiques agricoles mises en œuvre.

Drainage et ruissellement

L'analyse de la littérature internationale (voir en particulier la revue de Robinson et Rycroft, 1999) aboutit au constat général que le drainage agricole limite fortement le ruissellement à l'échelle de la parcelle pour une fréquence d'événements pluviométriques proche de celle utilisée pour son dimensionnement (c'est-à-dire courants, de période de retour de 1 à 5 ans) (Lesaffre, 1988). Au-delà, la capacité du réseau enterré est considérée comme dépassée. Ce constat général s'appuie néanmoins sur des études très hétérogènes, tant les échelles et les systèmes agropédoclimatiques considérés sont différents. Enfin, peu d'études intègrent la caractérisation et l'analyse de l'évolution des états de surface dans de tels systèmes.

Afin de fournir des références caractérisant les principaux systèmes drainés français, deux contextes pédologiques sont analysés par la suite dans cet article :

- les sols limoneux argileux sur schistes tels qu'on peut les rencontrer sur le site expérimental de La Jaillière (Loire-Atlantique), sols dont la structure évolue peu au cours de la saison hivernale (bonne stabilité). Les conditions d'humidité et de hauteur de nappe constituent le principal facteur explicatif de l'apparition du ruissellement ;

- les sols limoneux sur formations calcaires tels qu'on peut les rencontrer sur le bassin versant de l'Orgeval (Brie, Seine-et-Marne), caractérisés par une plus grande instabilité (forte teneur en limon) et dont le changement de structure (battance), en plus des conditions hydriques du sol, peut contribuer à générer du ruissellement.

Le ruissellement sur sol drainé non battant : exemple du site de La Jaillière (44)

Le site expérimental de La Jaillière (encadré 1) est situé à la limite sud-est du Massif Armoricaïn, entre Nantes et Angers, sur le canton de Le Louroux-Béconnais. Cette région naturelle porte le nom vernaculaire de bocage angevin. Elle est traditionnellement consacrée à l'élevage (prairies et cultures fourragères) et s'est ouverte plus récemment à l'introduction de grandes cultures (blé et protéagineux). Le climat est océanique à faible pluviométrie annuelle (617 mm en moyenne entre 1961 et 1990). La répartition des pluies dans l'année est très régulière (moyennes mensuelles de 40 à 62 mm), avec un nombre mensuel de jours de pluie assez stable (de 10 à 16 en moyenne).

Dans ce contexte agronomique, trois types de rotations culturales ont été étudiés sur les parcelles expérimentales du site de La Jaillière :

Encadré 1

La station expérimentale de La Jaillière

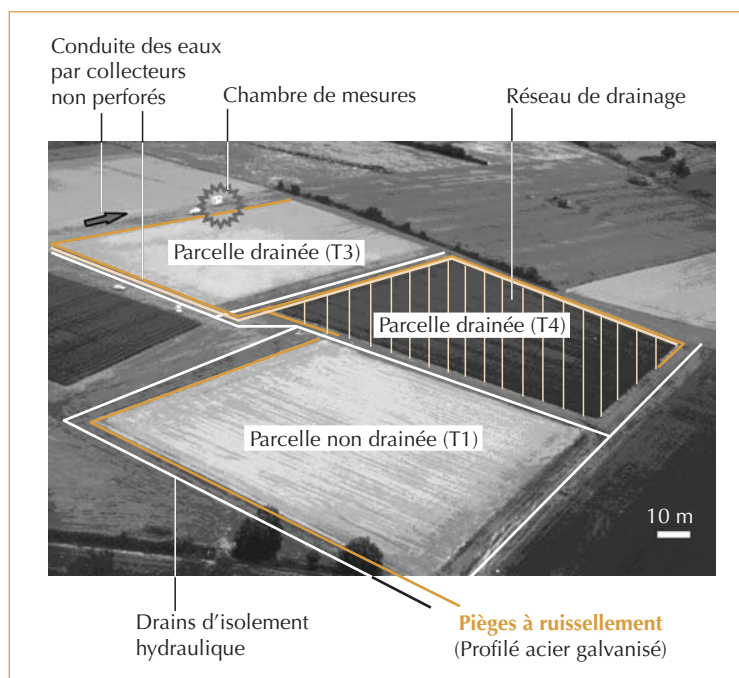
En 1987, dans le cadre de l'opération secteur de référence drainage, un dispositif expérimental a été mis en place sur la station expérimentale Arvalis (anciennement ITCF²) de La Jaillière. À l'origine, son objectif était l'étude de l'efficacité du drainage pour lever les contraintes liées aux excès d'eau. Par la suite, les études ont porté sur les exportations de produits phytosanitaires et de fertilisants. Ces travaux ont été conduits dans un étroit partenariat entre divers organismes de recherche qui ont mis en commun leurs compétences complémentaires (Arvalis, Cemagref, INRA, université d'Angers, ESA³). Un groupement d'intérêt scientifique (GIS) « pratiques culturales et qualité des eaux » a été créé en 1995 incluant encore d'autres partenaires.

2. Institut technique des céréales et des fourrages.

3. École supérieure d'agriculture.

4. Période humide hivernale durant laquelle le drainage fonctionne de façon continue.

▼ Figure 1
– Organisation type des parcelles expérimentales sur le site de La Jaillière (Arlot, 1999).



► Tableau 1 – Caractéristiques texturales des sols (plateau) de La Jaillière.

rotations maïs/blé, rotations pois/blé et prairies temporaires/cultures, avec différentes variantes de travail du sol (labour/semis direct), de couverture du sol en hiver et, pour les prairies, de pression de pâturage.

Les caractéristiques pédologiques et géologiques du site

Le site est localisé sur la série sédimentaire de St-Georges-sur-Loire qui se caractérise par une alternance de schistes et de grès avec intercalations de phanites. Les sols sont des sols bruns hydromorphes à texture limono-argileuse développés sur des formations d'altérites de schistes. Les pentes sont faibles à très faibles, variant de 0 à 3 %. La profondeur d'apparition du schiste altéré varie entre 30 et 60 cm. L'horizon de surface est constitué d'un limon moyen sableux (16 à 22 % d'argile) (tableau 1). Il contient par endroits des galets roulés qui en suggèrent une origine colluviale. L'horizon sous-jacent, d'épaisseur variable, est plus riche en argile (30 %, texture argilo-limoneuse). L'hydromorphie est marquée

sur l'ensemble du profil et se manifeste dès la surface par des traces de pseudo-gley.

Le dispositif expérimental de La Jaillière

Les débits de drainage et de ruissellement ont été mesurés durant une dizaine de campagnes expérimentales (1987-97) au pas de temps horaire sur 4 parcelles drainées (T3, T4, T5, T6) et non drainées T1 (environ 1 ha chacune en moyenne) (figure 1). Le ruissellement à l'échelle des parcelles a été capté par des pièges placés à leur aval topographique et les débits mesurés dans des chambres enterrées. Le suivi expérimental a aussi porté sur le niveau de la nappe perchée (piézométrie, le plus souvent à l'interdrain) et la pluviométrie.

Les principaux résultats sur le site de La Jaillière

L'analyse des bilans hydriques pour les parcelles drainées et non drainées a permis de caractériser l'effet du drainage sur le ruissellement. Ainsi, en période hivernale, le drainage réduit très fortement le ruissellement : le rapport du volume ruisselé au volume des précipitations est de 6 à 12 %, alors qu'il est de 70 à 80 % en parcelle non drainée (figure 2).

L'étude conjointe des données piézométriques et débitométriques a permis de mieux comprendre les mécanismes de genèse de ce ruissellement. Deux principaux types de mécanismes ont été distingués (Kao *et al.*, 1998) :

- avant le début de la saison de drainage intense⁴ alors que la nappe perchée n'est pas encore installée, les premiers épisodes de ruissellement sont comparables entre les parcelles drainées et non drainées (figure 3). Le mécanisme responsable est la progression du front d'humectation qui limite la capacité d'infiltration selon un schéma de type hortonien ;
- lorsque la nappe est installée, le fonctionnement du réseau de drainage améliore la capacité de stockage dynamique de la parcelle, limitant le ruissellement aux épisodes les plus intenses, lorsque la nappe approche de la surface (figure 4).

	Matière organique (%)	Argile (%)	Limons (%)	Sable (%)
Horizon de surface	1,9	19,1	44,6	34,4
Horizon 25-50 cm	1,1	29,8	37,7	31,4

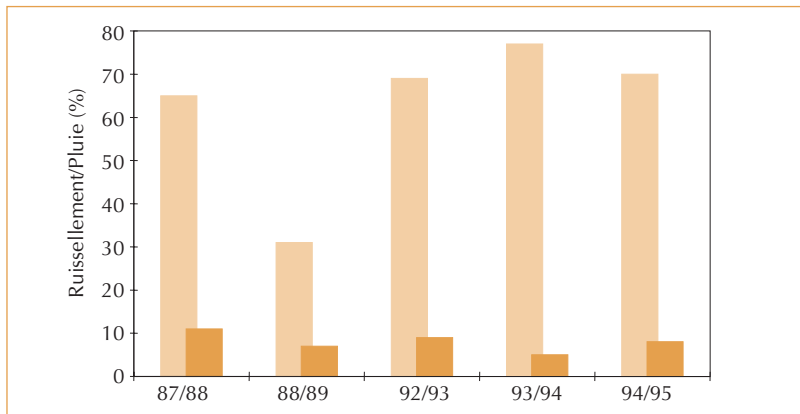


Figure 2 – Part du ruissellement mesuré/pluie (%) lors de différentes saisons hivernales de drainage. Comparaison entre parcelles non drainée (T1) et drainée (T3).

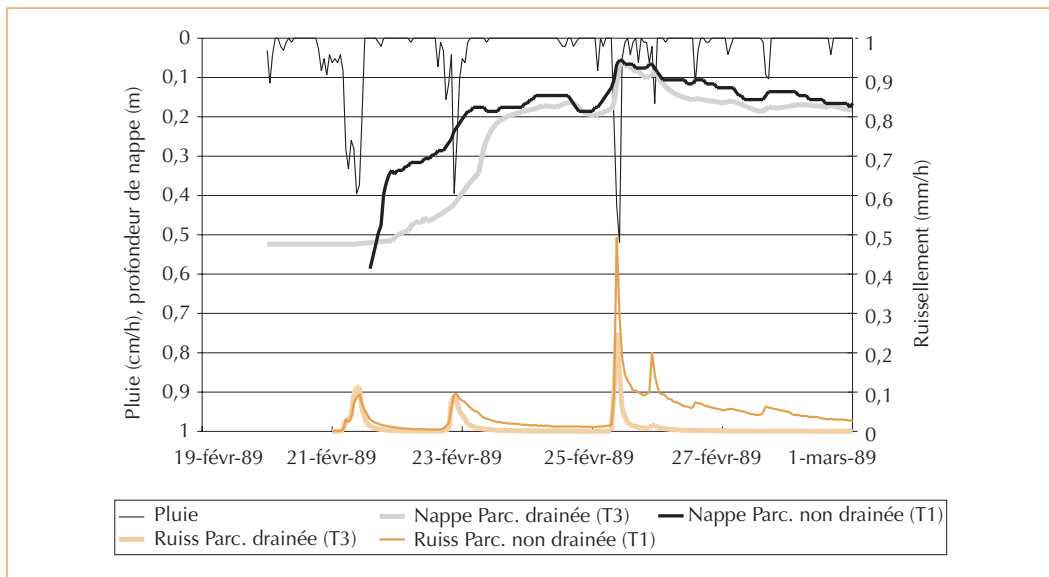


Figure 3 – Ruissellement, profondeur de nappe et pluviométrie mesurés pour des parcelles non drainée et drainée en début de saison de drainage intense (ici, année sèche) (culture de blé).

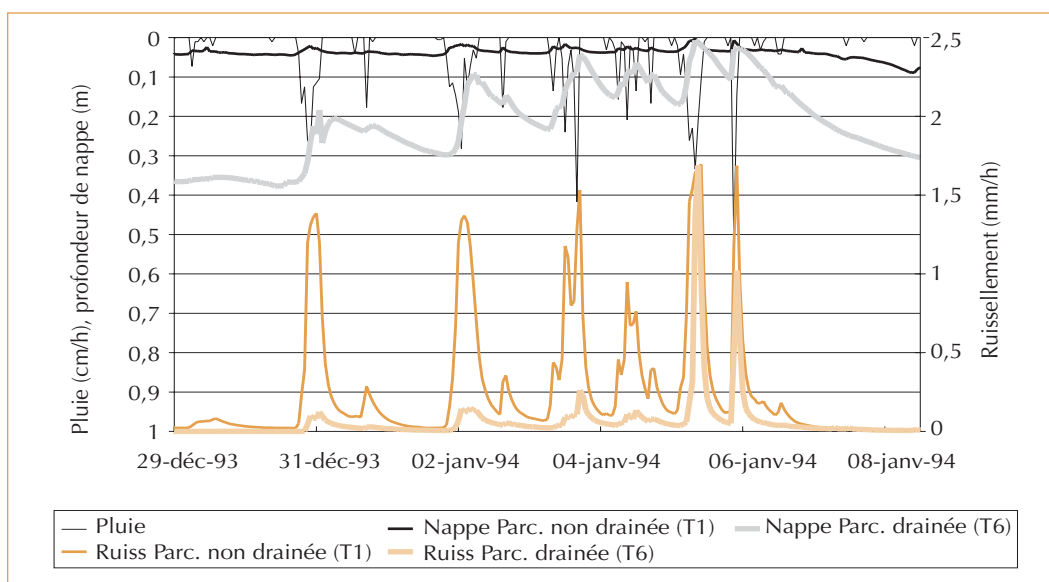


Figure 4 – Ruissellement, profondeur de nappe et pluviométrie mesurés pour des parcelles non drainée et drainée en cours de saison de drainage intense (culture de blé).

Le mécanisme de déclenchement est donc ici la limitation de l'infiltration par saturation temporaire de l'ensemble du profil. En parcelle non drainée, cette saturation est généralisée et se produit sur l'ensemble de la période hivernale, expliquant la différence des volumes ruisselés observés.

Ces résultats acquis sur la partition ruissellement/infiltration en parcelle drainée confirment que le drainage réduit significativement les volumes ruisselés en situation météorologique non exceptionnelle. Mais ces travaux ont porté sur des sols argilo-limoneux peu sensibles à la battance (Refes, 1997). Or, comme nous l'avons évoqué plus haut, si le drainage limite le ruissellement sur surface saturée en maintenant la nappe à un niveau inférieur à celui d'une parcelle non drainée, l'évolution de la structure des états de surface peut aussi engendrer un ruissellement de type hortonien. Une étude à l'échelle plus locale sur sol drainé sensible à la battance a donc été réalisée pour distinguer les effets de la nappe des effets liés à cette battance.

Le ruissellement en présence de drainage sur sol battant : exemple du bassin versant de Mélarchez (77)

Situation géographique

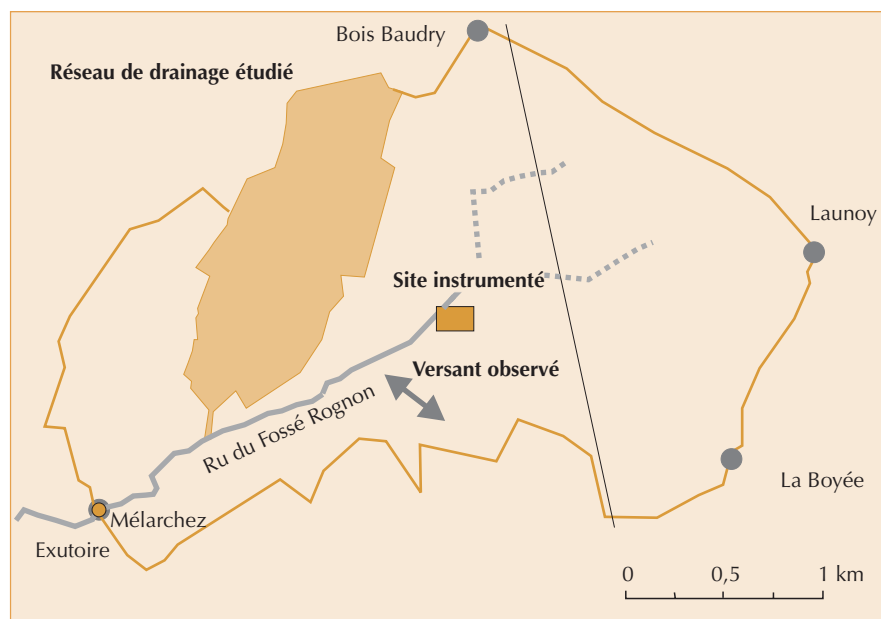
Le bassin versant de Mélarchez, 7 km², est un sous-bassin du bassin versant de recherche et d'expérimentations de l'Orgeval, situé sur le

plateau rural de Brie près de Coulommiers, en Seine-et-Marne. Le climat est de type océanique tempéré : 706 mm de précipitation moyenne annuelle (période 1962-2004) sont répartis sur toute l'année (moyenne mensuelle de 46 à 67 mm).

La rotation des cultures s'étale pour la majorité des agriculteurs sur 2 ans : le blé (éventuellement l'escourgeon), qui couvre la moitié de la surface, est en alternance avec des cultures de printemps, principalement la féverole et le maïs. La gestion de l'interculture est très variable (moutarde, déchaumage, désherbage). Certains agriculteurs ont choisi un mode de culture simplifiée essentiellement pour des questions de gain de temps (suppression du labour ou simplification des traitements, et pas de cultures dérobées à l'interculture...).

Caractéristiques pédologiques et géologiques

Les sols présents sur la majorité de ce bassin versant sont des limons sur argile reposant sur la formation des calcaires de Brie. L'horizon d'accumulation d'argile ou une argile à meulière à 1-2 m de profondeur entraîne l'apparition d'une nappe temporaire en hiver. La teneur en limon de ce sol est nettement supérieure à celle du sol de La Jaillière (tableau 2). Les tests de stabilité structurale (Le Bissonnais, 1996) effectués attestent que le sol est instable.



► Figure 5 – Localisation des zones d'étude sur le bassin versant de Mélarchez.

▼ Tableau 2 – Caractéristiques texturales des sols de Mélarchez.

	Matière organique (%)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)
Horizon A (0-50 cm)	2,2	17,9	76,4	5,7

Suivi expérimental

Une parcelle a été instrumentée durant l'hiver 2003-2004 afin de suivre les niveaux de la nappe ainsi que l'évolution des états de surface (figure 5). Cette parcelle a subi un déchaumage après une culture de blé (pratique culturale simplifiée).

L'instrumentation vise à caractériser les différences de comportement entre l'aplomb du drain (conditions de ressuyage maximales) et l'interdrain (siège d'un engorgement plus durable lors des événements pluvieux). Elle comprend un pluviomètre, 4 piézomètres mis en place entre le drain et l'interdrain (4 m), et deux placettes de collecte de ruissellement (5 × 2 m). Une de ces placettes se situe au-dessus du drain et l'autre à l'interdrain. Le ruissellement de chacune des placettes est collecté par des augets basculeurs placés dans un piège en contrebas des placettes.

Parallèlement, les états de surface ont été observés toutes les deux semaines sur 5 placettes de 1 m × 1 m :

- sur les 2 placettes servant à la collecte du ruissellement au niveau du site instrumenté, notées « drain » et « interdrain » ;
- 3 autres sont localisées sur un versant (notées « haut »/« milieu »/« bas » de versant) à 500 m du site instrumenté. Le haut de versant situé sur une autre parcelle (même pratiques culturales) possède un drainage plus ancien et *a priori* moins efficace. La composition granulométrique de ces placettes est sensiblement la même que celle du sol du site expérimental.

Les états de surface ont été suivis par une série d'indicateurs qui reflètent les principaux processus impliqués dans la partition infiltration/ruissellement. Notre étude s'est focalisée sur trois d'entre eux, plus particulièrement pertinents dans notre contexte :

- pourcentage de la surface de la placette recouvert par une croûte structurale (en lien avec l'infiltrabilité du sol) ;

- pourcentage de la surface de la placette recouvert par une croûte sédimentaire (en lien avec l'infiltrabilité du sol) ;

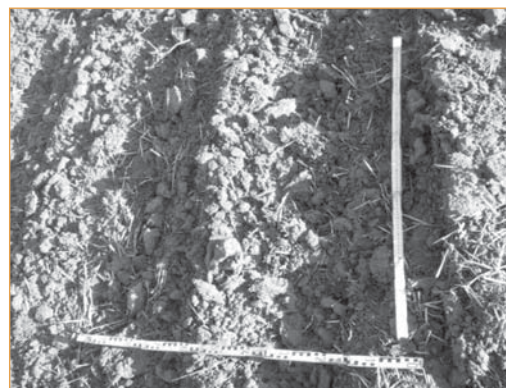
- microrelief (indicateur : profondeur moyenne des flaques potentielles ; en lien avec le volume d'eau stocké avant transfert du ruissellement).

Les principaux résultats sur le bassin versant de Mélarchez

La figure 6 (page 10) présente les profondeurs de nappe mesurées à l'interdrain et les intensités de pluie durant l'hiver 2003-2004. Trois épisodes pluvieux ont été retenus ici pour analyser ces données. Ces épisodes pluvieux se trouvent aussi sur la figure 7 (page 10) qui décrit la formation de la croûte de battance observée sur les placettes de collecte de ruissellement « drain » et « interdrain ».

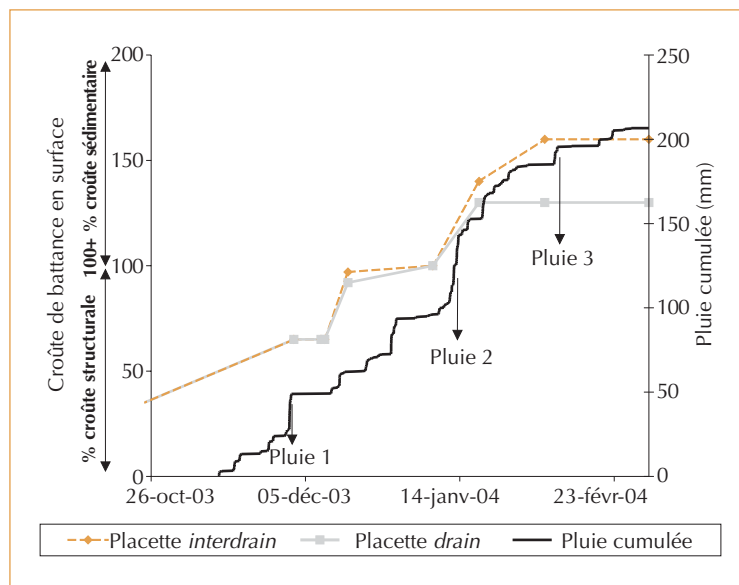
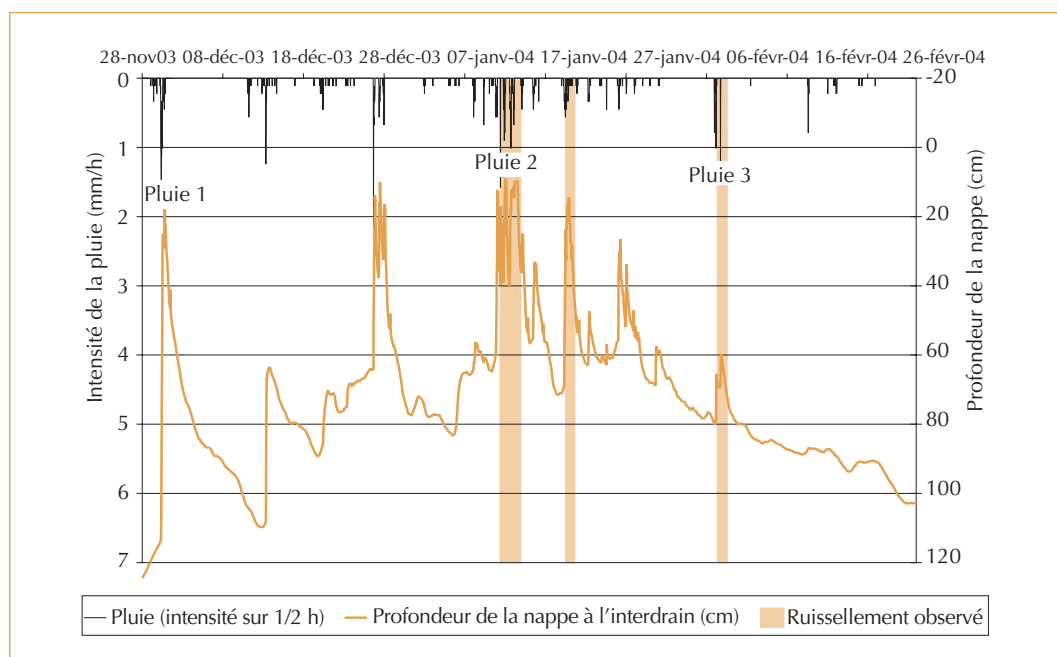
En début d'hiver, le travail du sol (ici un déchaumage, mais la remarque serait valable pour du labour et dans une moindre mesure pour un semis de culture d'hiver) confère à la surface une bonne infiltrabilité (photo 1).

De plus, le microrelief reste assez marqué et limite les transferts d'eau à la surface du sol. Pour ces raisons, lors des premiers épisodes pluvieux, notamment de la « pluie 1 », aucun ruissellement n'est observé. La croûte structurale se met en place progressivement au cours de ce début d'hiver sans engendrer de ruissellement (le pourcentage de surface du sol dégradé par une croûte structurale augmente) (figure 7).



◀ Photo 1 – Placette (1 m²) d'observation des états de surface après déchaumage (17/12/2003).

► Figure 6 – Épisodes de ruissellement observé à l'interdrain et évolution de la profondeur de nappe au cours de l'hiver 2003-2004 sur le site expérimental de Mélarchez. Les épisodes pluvieux numérotés sont décrits dans le texte.



▲ Figure 7 – Évolution de la croûte de battance sur le site expérimental de Mélarchez au cours de l'année 2003-2004.

L'épisode pluvieux noté « pluie 2 » est particulièrement long et entraîne une montée de la nappe à quelques centimètres en dessous de la surface du sol. Du ruissellement est observé à l'interdrain lorsqu'il pleut pendant cette période d'affleurement de la nappe.

Le ruissellement observé lors de la « pluie 2 » entraîne la formation d'une croûte de type sédi-

mentaire à l'interdrain (figure 7). Le microrelief devient moins marqué et les différentes dépressions du sol se connectent plus rapidement entre elles ; le transfert du ruissellement en est accéléré. La saturation en eau puis le drainage de l'horizon travaillé lors des périodes d'affleurement de la nappe entraînent un effondrement de cet horizon (la masse volumique passe de $1,10 \text{ g/cm}^3$ à $1,23 \text{ g/cm}^3$). Cet effondrement participe aussi à la baisse d'infiltrabilité de la surface.

L'affleurement de la nappe est aussi à l'origine de l'épisode de ruissellement observé entre les pluies « 2 » et « 3 ».

Notons qu'entre les pluies « 1 » et « 2 », un épisode pluvieux a entraîné une montée de nappe sans provoquer de ruissellement, car la pluie n'était pas concomitante à l'affleurement de la nappe (épisode de pluie plus court).

Lors de l'épisode pluvieux « pluie 3 », du ruissellement est observé à l'interdrain alors que la nappe est à plus de 60 cm de profondeur et que l'intensité de pluie n'est pas exceptionnelle. L'infiltrabilité de la surface est donc plus faible que durant les précédentes pluies. Ce constat est cohérent avec la présence de croûte sédimentaire observée à l'interdrain et l'effondrement de l'horizon de surface qui contribuent tous deux à la genèse de cet épisode de ruissellement.

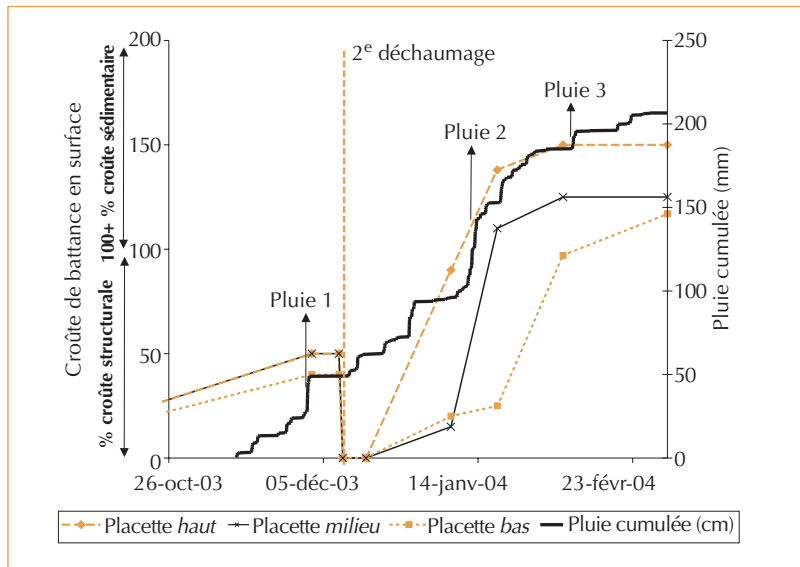


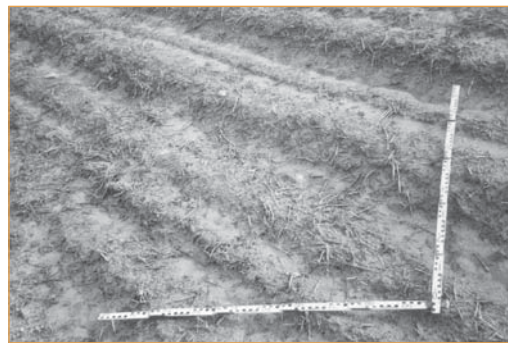
Figure 8 – Évolution des états de surface sur les placettes situées le long du versant observé (« haut » sur un ancien drainage, « milieu » et « bas » de versant).

Les observations des états de surface sur le reste de la parcelle (figure 8) nous informent que certaines constatations sont valables à plus grande échelle :

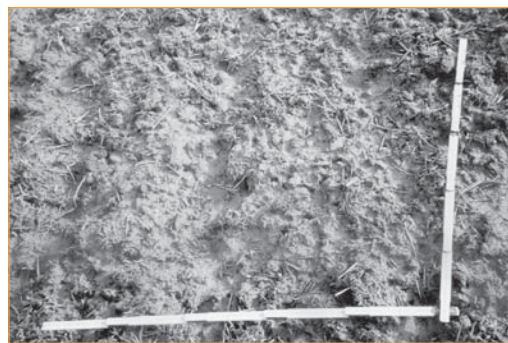
- la croûte structurale se forme pendant les premiers épisodes de l'hiver (pas de croûte sédimentaire observée, donc pas de ruissellement conséquent pendant cette période) ;
- la croûte sédimentaire commence à se former lors de la « pluie 2 » (donc présence de ruissellement, sauf pour la placette en bas de versant). Cette croûte n'excède pas 50 % de la surface, car elle se développe seulement dans les dépressions formées par le déchaumage.

La présence effective de ruissellement liée à la croûte sédimentaire pendant la « pluie 3 » n'est pas clairement visible à partir de la seule observation des états de surface.

La dégradation de la surface du sol est plus marquée sur la placette « haut » en termes de développement de croûte et baisse du microrelief (photo 2). En effet, sur cette placette, le drainage est ancien (plus espacé, moins profond et susceptible d'être défectueux) et l'horizon argileux est moins profond (environ 50 cm contre plus de 100 cm en bas de versant). La nappe superficielle est donc plus souvent proche de la surface. D'après nos observations sur le terrain, l'épisode « pluie 2 » a conduit à un ruissellement généralisé sur la parcelle, alors que sur la parcelle bien drainée (drainage récent), ce ruissellement était visible seulement à l'interdrain.



Photos 2 et 3 – Placettes (1 m²) d'observation des états de surface « haut » et « bas » avant l'épisode de « pluie 3 » (05/02/2004).



Sur les placettes « milieu » et « bas » de versant, les conditions de drainage sont meilleures (installation plus récente), donc la nappe affleure moins souvent à la surface du sol : la croûte sédimentaire se développe donc moins vite (photo 3).

Discussion des résultats sur le bassin versant de Mélarchez

Sur les parcelles drainées observées, lorsque la nappe superficielle est en place, les premiers épisodes de ruissellement sont liés à l'affleurement de la nappe selon les mêmes processus que ceux observés sur le site de La Jaillièrre. Le phénomène de battance intervient dans la genèse de ruissellement seulement en fin d'hiver, lorsque les périodes d'affleurement de la nappe ont entraîné du ruissellement et la formation d'une croûte sédimentaire. Notons que les épisodes pluvieux de l'automne, parfois assez intenses, sont aussi susceptibles de former rapidement une croûte de battance et de générer du ruissellement, même si cela n'a pas été le cas pendant l'année observée.

La tendance observée sur le site instrumenté est confirmée par les observations le long du versant : l'affleurement de la nappe est à l'origine des premiers épisodes de ruissellement et de la formation de la croûte sédimentaire, et ce d'autant plus que la nappe est mal drainée et donc (souvent) proche de la surface.

En conditions pluviométriques moyennes (ici, cumul de pluie de 234 mm entre novembre 2003 et mars 2004, soit légèrement en dessous de 270 mm, moyenne pour les années 1972-2002), un drainage efficace limite donc le ruissellement à quelques épisodes (affleurement de la nappe et battance en fin d'hiver). Cependant, si le sol est potentiellement battant, un drainage déficient peut accentuer le ruissellement, non seulement en augmentant les épisodes d'affleurement de la nappe, mais aussi en favorisant le développement de croûtes sédimentaires qui diminuent l'infiltrabilité du sol. La dernière partie de cette étude se focalise sur ces épisodes d'affleurement de la nappe contrôlés par l'efficacité de l'ensemble du réseau de drainage, drains et collecteurs.

▼ Tableau 3 – Récapitulatif des facteurs étudiés contrôlant l'apparition du ruissellement pour les différentes pluies sur les placettes. D : drain, ID : interdrain, H : haut de versant, M : milieu de versant, B : bas de versant.

L'impact du fonctionnement d'un réseau de collecteurs de drainage sur le ruissellement des parcelles drainées

Le fonctionnement hydraulique des réseaux de drainage a un impact direct sur la genèse du ruissellement. Une limitation de leur efficacité peut donc aggraver les risques de ruissellement en augmentant le temps de présence de la nappe à la proximité de la surface.

L'analyse de l'efficacité d'un réseau de drainage doit se raisonner en fonction des critères utilisés pour son dimensionnement et prendre en compte l'état réel du réseau

Il est ainsi nécessaire de distinguer les situations où le réseau est effectivement ancien ou mal dimensionné et sa capacité de collecte donc limitée, des cas où le réseau enterré est en bon état, bien dimensionné, mais l'événement hydrologique considéré est d'occurrence notablement plus rare que l'événement annuel qui sert de base au dimensionnement.

À titre d'illustration, un événement majeur de ruissellement, accompagné de coulées et de rigoles d'érosion intense, a été observé en mai 1996 sur une zone du bassin versant de Mélarchez, dans l'axe principal d'un réseau de collecteurs (Pecqueur, 1997). Un des éléments d'explication alors avancé a été la limitation du réseau de collecteurs pour cet épisode dont la période de retour a été estimée à 10 ans, et donc bien au-delà de sa capacité d'évacuation effective.

Nous proposons d'évaluer comment le fonctionnement hydraulique du réseau de collecteurs enterrés peut en effet expliquer une partie des phénomènes potentiels de ruissellement à la parcelle. L'organisation et le dimensionnement d'une partie du système drainant du bassin versant de Mélarchez ont été analysés afin d'identifier les

Placette	Croûte structurale (identifiée avant pluie)					Croûte sédimentaire (identifiée avant pluie)					Affleurement de la nappe (pendant la pluie)				
	D	ID	H	M	B	D	ID	H	M	B	D	ID	H	M	B
Pluie 1	x	x	x	x	x										
Pluie 2	x	x	x								x R*	x R	x r**		
Pluie 3	x	x	x	x	x		x R	x	x						

* R : facteur ayant causé du ruissellement mesuré.

** r : facteur ayant vraisemblablement causé du ruissellement (observation visuelle).

parcelles pour lesquelles le réseau enterré pourrait être potentiellement limitant selon la gamme de débit considéré.

Les caractéristiques du réseau étudié

Le réseau étudié dessert un sous-bassin de 92 ha (figure 5, page 8 et figure 9). La partie principale en aval est constituée d'un tuyau en béton de 400 mm de diamètre sur lequel se branchent 3 collecteurs de diamètre plus petit (200 mm), en PVC. Les collecteurs plus petits situés dans les parcelles sont en poterie ou en PVC, selon l'âge. Les drains sont généralement espacés de 10 m, sauf sur 2 parcelles en amont drainées récemment où l'écartement est de 8 m.

La pente des collecteurs est comprise traditionnellement entre 0,5 et 2 ‰. Peu d'informations existent sur leur pente réelle. D'après la carte IGN, dans la partie amont, la pente du terrain naturel est de l'ordre de 1 ‰, alors qu'elle atteint 2 ‰ en aval, où le talweg est plus marqué.

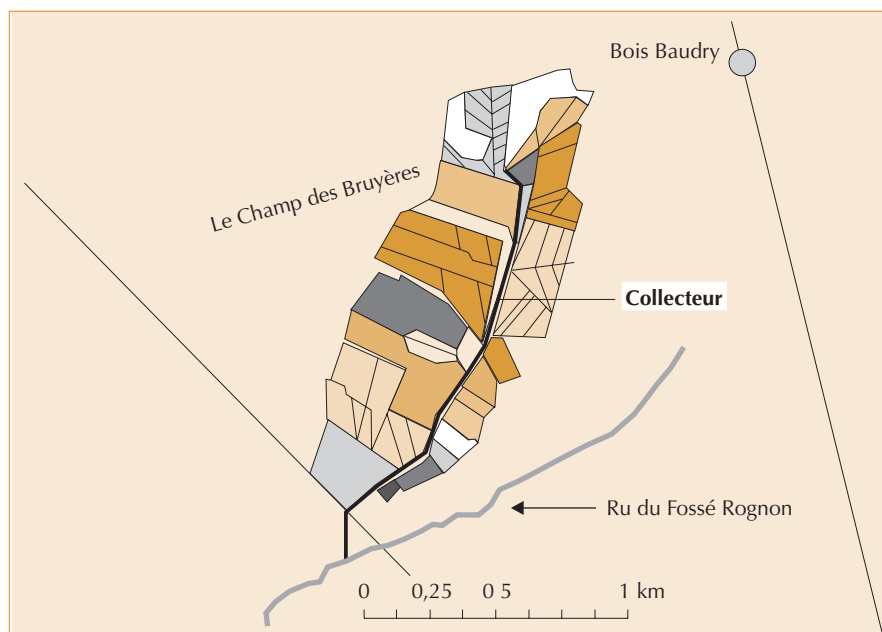
Principes du diagnostic de fonctionnement du réseau

Le dimensionnement des collecteurs est en principe fondé sur le calcul d'un débit de projet. Il est déterminé sur la base d'une pluie de durée (d) 3 jours et d'une période de retour (T) de 1 an (ministère de l'Agriculture, 1993). L'intensité de

cette pluie peut être estimée à partir des données statistiques de la pluviométrie de la région (par un modèle de type « Montana » par exemple). Un coefficient d'infiltration théorique est choisi (entre 70 et 90 ‰, en fonction de la topographie) pour évaluer le débit de projet spécifique (en l/s/ha) que le réseau enterré doit être capable d'évacuer. Il varie classiquement entre 1 et 2 l/s/ha dans le Bassin parisien. En fonction de la surface drainée par chaque partie du réseau, le débit transitant par chaque collecteur (en l/s) peut ainsi être calculé. Ce débit de projet ainsi que d'autres débits caractéristiques ont été estimés pour la zone considérée (tableau 4).

▼ Tableau 4 – Débits caractéristiques estimés (loi de Montana) pour des événements de durées (d) 1 et 3 jours, et un coefficient d'infiltration de 0,9. La station météorologique considérée est celle de La Ferté (77). Le débit en gras correspond au débit de projet du drainage agricole.

Période de retour	1 an	2 ans	5 ans	10 ans
Débits surfaciques (l/s/ha) pour d = 3 jours (72 h)	1,18	1,39	1,64	1,78
Débits surfaciques (l/s/ha) pour d = 1 jour (24 h)	2,30	2,82	3,42	3,80



◀ Figure 9 – Plan du réseau de collecte. Le collecteur principal est en gras. Les groupes de parcelles d'une même couleur sont connectés au collecteur principal par un même collecteur secondaire.

5. Direction
départementale de
l'agriculture et de la
forêt.

La mise en œuvre du diagnostic repose sur la **connaissance des diamètres et longueurs de collecteurs réellement utilisés** (à partir des plans disponibles auprès des agriculteurs, des cabinets de géomètres ou de la DDAF³). À partir de ces informations, en général accessibles, nous avons estimé le débit maximal admissible que le réseau, compte tenu de ses caractéristiques, peut évacuer avant mise en charge. On peut calculer ce débit limite en utilisant une formule dérivée de la loi de Manning-Strickler qui définit le débit à surface libre en régime permanent et uniforme. C'est cette relation qui est en général utilisée pour le dimensionnement des collecteurs (choix d'un diamètre théorique à partir de la pente). Elle s'exprime ainsi :

$$Q = K \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{D}{4} \right)^{2/3} I^{1/2} = \alpha K D^{8/3} I^{1/2}$$

où :

Q est le débit maximal avant la mise en charge du collecteur ($L^3 T^{-1}$),

D est le diamètre intérieur du collecteur (L),

I est la pente du collecteur (-),

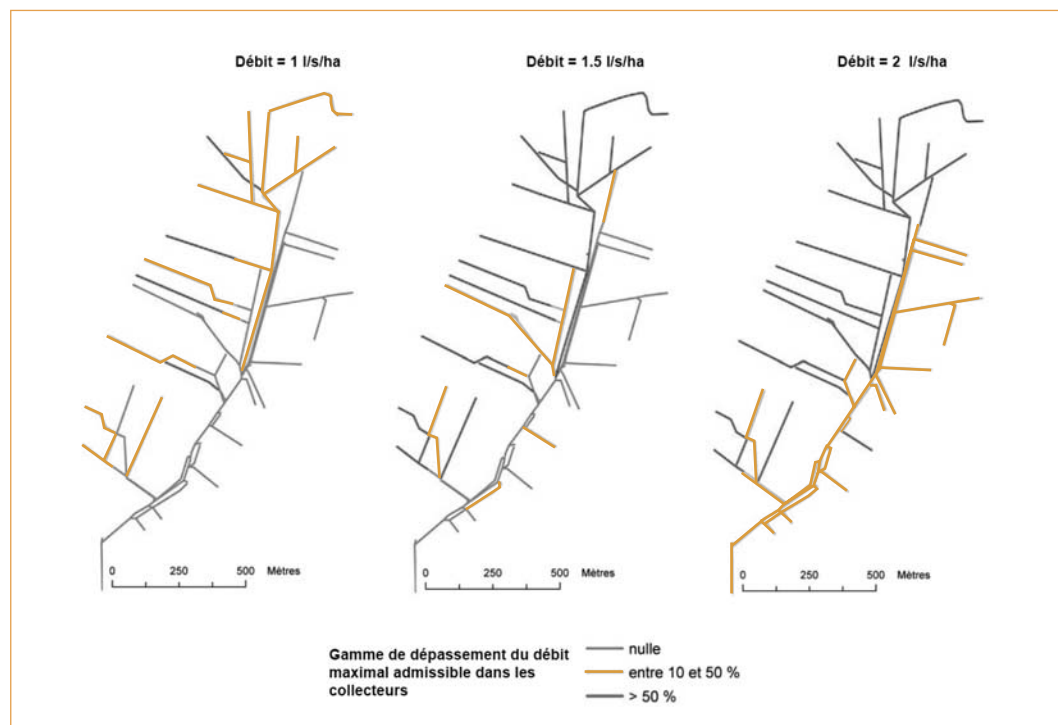
K est le coefficient de Manning-Strickler, lié à la rugosité des parois ($L^{1/3} T^{-1}$) ; il vaut 60 pour un tube en béton et 70 pour un tuyau annelé en PVC,

α est un coefficient qui intègre les constantes et les changements d'unités ; pour un débit **Q** en l/s, **D** en mm, $\alpha K = 1,870 \cdot 10^{-4}$ pour un tube en béton, $\alpha K = 2,182 \cdot 10^{-4}$ pour un tube annelé en PVC.

À titre d'exemple, pour un collecteur annelé en PVC de 72 mm de diamètre intérieur et une pente de 2 %, le débit maximal admissible évacué à surface libre est de l'ordre de 2,8 l/s. Si la surface drainée par ce collecteur est de 4 ha et le débit de projet de 1 l/s/ha, le collecteur est considéré comme sous-dimensionné.

Pour évaluer l'efficacité du réseau enterré, nous comparons donc le débit de projet estimé (tableau 4) et le débit maximal admissible calculé pour chaque collecteur de ce réseau. La pente a été fixée à 1 % sur tout le sous-bassin et le débit varie entre 1 et 2 l/s/ha, soit dans une gamme recouvrant les conditions de fonctionnement courantes à plus rares ($T = 1$ à 10 ans).

► Figure 10
– Localisation
des collecteurs
« limitants » pour trois
débits surfaciques,
selon le principe du
dépassement du débit
maximal admissible.



Les résultats du diagnostic

La figure 10 présente les collecteurs pour lesquels le débit considéré dépasse la capacité d'évacuation définie précédemment. Les couleurs utilisées indiquent l'écart entre ces deux grandeurs. Lorsqu'une partie du réseau passe en charge, nous considérons qu'elle limite l'écoulement dans la partie de réseau située en amont. Si le débit dépasse le débit maximal admissible de moins de 10 %, nous considérons que cela affecte peu l'écoulement. Il devient limité jusqu'à 50 % et très limité au-delà.

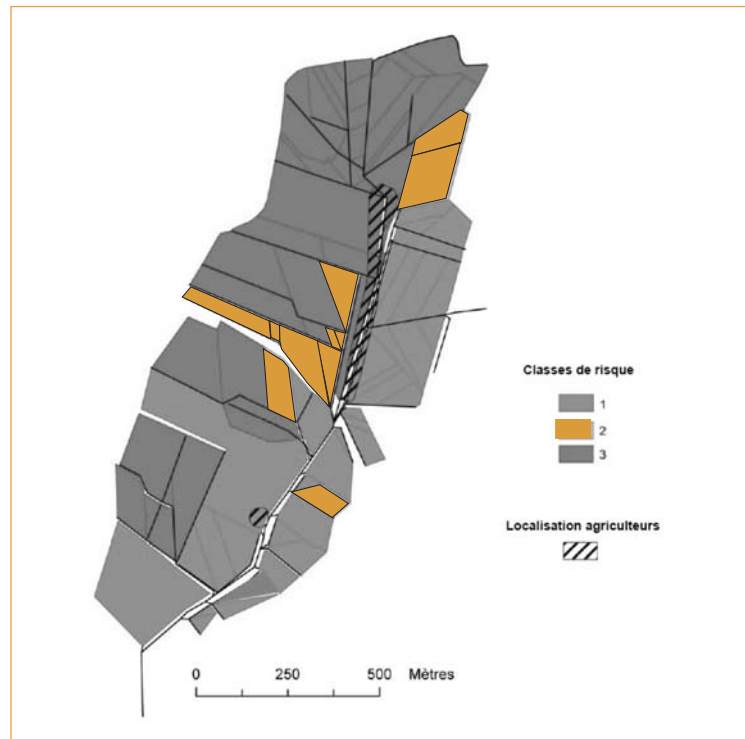
On constate que le plus long collecteur de la partie amont est susceptible de passer en charge dès le débit de 1 l/s/ha. La ramification située plus à l'ouest passe en charge à 1,5 l/s/ha. Seule la ramification et le collecteur principal aval fonctionnent normalement pour une pluie de 3 jours de fréquence annuelle. Tout le réseau est saturé pour un débit égal à 2 l/s/ha.

Ces résultats montrent deux choses :

- une partie du réseau de ce bassin (N-O) est clairement sous-dimensionnée. En effet, aucun collecteur ne devrait être potentiellement en charge pour un débit de projet compris entre 1 et 1,5 l/s/ha. Les parcelles connectées à cette partie du réseau présentent donc un risque de ruissellement important dans la mesure où le drainage est limité pour des événements très courants ;
- la partie aval du réseau est limitante à partir d'un débit spécifique de 2 l/s/ha. Ce débit correspond certes à une période de retour plus rare pour $d = 3$ jours, mais à une occurrence inférieure à $T = 1$ an pour une durée plus courte ($d = 1$ jour). On observe de plus que la mise en charge généralisée du réseau est très sensible à une variation somme toute faible (de 1,5 à 2 l/s/ha) des débits transitant dans le système.

Ces éléments de diagnostic ont été confrontés à la vision des agriculteurs du « risque ruissellement » sur cette partie du bassin. La figure 11 superpose les résultats du précédent diagnostic traduit au niveau parcellaire et la localisation de problèmes de ruissellement avérés d'après les enquêtes réalisées auprès des agriculteurs (Ledun, 2004).

Par construction, le diagnostic précédemment décrit conduit à des classes identifiant des parcelles (reliées à des collecteurs limitants ou non) qui présentent un risque vis-à-vis de la genèse du ruissellement. Les zones identifiées par les agriculteurs comme étant « régulièrement »



ruisselantes correspondent, quant à elles, à des lieux d'apparition visible du ruissellement (donc concentré après son transfert). Ces zones (en hachurées, figure 11) se situent effectivement à l'aval des parcelles drainées par les 2 collecteurs potentiellement en charge pour un débit égal à 1,5 l/s/ha. Les résultats sont donc cohérents à défaut d'être parfaitement homogènes.

L'analyse de cet exemple illustre l'importance du réseau enterré et de ses caractéristiques de fonctionnement hydraulique dans l'évaluation du risque vis-à-vis de la genèse du ruissellement. La prise en compte conjointe des particularités hydrologiques et hydrauliques de tels systèmes doit donc être systématiquement intégrée aux démarches d'estimation du risque « ruissellement » plus traditionnelles, fondées sur la caractérisation de l'évolution des états de surface du sol en lien avec la pluviométrie et les pratiques culturales.

Conclusion générale

Les résultats présentés dans cet article confirment que la genèse du ruissellement en parcelles drainées est essentiellement contrôlée par le niveau de la nappe. Le drainage limite fortement le ruissellement hivernal pour les événements

▲ Figure 11
– Comparaison entre les résultats du diagnostic « collecteurs » (débit considéré de 1,5 l/s/ha et pente de 1 %) et la localisation du ruissellement par les agriculteurs.

6. Politique agricole commune.

pluvieux courants, mais reste en revanche sans effet à la fois pour les événements intenses (de période de retour supérieure à 5 ans) et pour les épisodes hors période humide (absence de nappe perchée).

D'autre part, nous avons observé que le ruissellement généré par les affleurements de la nappe drainée pouvait conduire à l'apparition d'une croûte sédimentaire pour des sols battants. Ce phénomène, qui reste à confirmer par une observation de plus longue durée, est à prendre en compte dans la caractérisation du phénomène, notamment en fin d'hiver, car il peut aboutir à une amplification du ruissellement.

Enfin, nous avons mis en évidence l'influence du fonctionnement du réseau enterré (drains et collecteurs) sur la genèse du ruissellement.

Nous avons en particulier montré l'importance de mener un diagnostic hydraulique du réseau enterré pour identifier les zones pouvant être limitantes pour des gammes d'événements proches de celles utilisées pour dimensionner le système.

Ces quelques éléments d'analyse peuvent être utiles à l'heure où la conditionnalité des aides dans le cadre de la nouvelle PAC⁶ conduit à l'implantation systématique de bandes enherbées. En effet, la localisation de certains de ces dispositifs dans les bassins fortement drainés doit être raisonnée en fonction d'un risque « ruissellement » qui n'est pas nul dans de tels systèmes. Il convient d'évaluer ce risque en intégrant aussi bien les caractéristiques agro-pédologiques des parcelles que celles, plus souvent ignorées, du réseau enterré. □

7. Direction générale de la forêt et des affaires rurales.

Remerciements

Les résultats présentés dans cet article ont été acquis à travers différentes actions et programmes de recherches. Les auteurs tiennent à signaler en particulier l'appui financier du ministère de l'Agriculture (DGFAR⁷) et du projet « RIDES » du Programme national de recherche en hydrologie (PNRH) pour les travaux menés sur le bassin versant de l'Orgeval.

Résumé

Le drainage des terres agricoles par tuyaux enterrés favorise l'évacuation des eaux infiltrées et réduit d'autant les épisodes de ruissellement provoqués par l'affleurement de la nappe superficielle. Toutefois, des facteurs comme le dépassement de la capacité de drainage du réseau, la formation d'une croûte de battance limitant l'infiltrabilité de la surface ou la compaction liée au passage de roues d'engins sont susceptibles de contribuer à l'apparition du ruissellement. L'objet de cet article est d'identifier les processus à l'origine des épisodes de ruissellement observés sur des parcelles drainées. Ces connaissances doivent permettre de mieux raisonner les actions de lutte contre ce phénomène.

Deux sites expérimentaux fortement drainés ont servi de support à cette étude : La Jaillière (Loire-Atlantique) et l'Orgeval (Seine-et-Marne). Contrairement à celui de La Jaillière, le sol de l'Orgeval est sensible à la battance.

Nous montrons que le drainage diminue significativement les volumes ruisselés en hiver : le rapport du volume ruisselé au volume des précipitations passe de 70 à 80 % en parcelle non drainée à 6 à 12 % en parcelle drainée. Cependant, le drainage reste sans effet à la fois lors de certains événements intenses et lors d'épisodes hors période humide (absence de nappe à proximité de la surface). Les affleurements de nappe à l'interdrain sont à l'origine des principaux épisodes de ruissellement hivernal sur les deux bassins versants. Le diagnostic hydraulique du réseau de drainage d'une partie du bassin de l'Orgeval a permis de préciser les causes possibles de ces affleurements suivant les parcelles concernées : problèmes de sous-dimensionnement ou dépassement notable du débit de projet. D'autre part, nous avons observé que le ruissellement généré par les affleurements de la nappe drainée peut conduire à l'apparition d'une croûte sédimentaire pour des sols battants, limitant l'infiltrabilité du sol en fin d'hiver.

Abstract

Agricultural subsurface drainage increases the evacuation of infiltrated water and reduces surface runoff generated by soil profile saturation. However, other factors may contribute to surface runoff generation: e.g. limitation of drainage network capacity, soil surface sealing or compaction due to wheel tracks. The objective of this study is to identify the processes involved in the surface runoff occurrences observed on a tile drained field. Such knowledge aims at improving the efficiency of solutions implemented to control the surface runoff.

This study is based on results from two experimental sites: La Jaillièrre (Loire-Atlantique, France) and l'Orgeval (Seine-et-Marne, France). Contrary to La Jaillièrre, l'Orgeval soils are prone to crusting. It is shown that artificial drainage decreases significantly surface runoff in winter: the ratio of surface runoff amount on rainfall amount is 70%-80% from a non drained field and 6-12% from a drained field. Nevertheless, the drainage influence is lower during intense rainfall events and events that don't occur during the drainage season (when the shallow water table is not established). For both experimental sites, the profile saturation at midpoint between two drains explains the main surface runoff occurrences during winter. A hydraulic diagnostic of a part of the Orgeval tile drainage network allows to specify the origin of the profile saturation: the network is under dimensioned (depth, diameter and distance between drain, diameter of collector...) or the rainfall exceeds the design rainfall event. Moreover, we observed that surface runoff events induced by high water table level leads to sedimentary crust, for the soils prone to crusting. Therefore, this limits infiltration capacity at the end of winter.

Bibliographie

- AMBROISE, B., BEVEN, K., FREER, J., 1996, Toward a generalization of the TOPMODEL concepts: topographic indices of hydrological similarity, *Water Resour. Res.*, 32(7), p. 2135-2145.
- AMEZKETA, E., 1999, Soil aggregate stability: A review, *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(2-3), p. 83-151.
- AUZET, A.-V., 1987, *L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture: aspects agronomiques*, Min. Env., Min. Agri., CEREG-URA 95 CNRS.
- AUZET, A.-V., 2000, *Ruissellement, érosion et conditions de surface des sols à l'échelle de versants et petits bassins versants*, mémoire d'habilitation à diriger des recherches, université Louis Pasteur, Strasbourg, France.
- BEVEN, K., KIRKBY, M.-J., 1979, A physically based, variable contributing area model of catchment hydrology, *Hydrol. Sci.*, n° 24, p. 43-69.
- BOIFFIN, J., 1984, *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*, INA Paris-Grignon, 320 p.
- BRESSON, L.-M., BOIFFIN, J., 1990, Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field, *Geoderma*, 47(3-4), p. 301-325.
- CROS-CAYOT, S., 1996, *Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte armorocain*, thèse de doctorat de l'ENSAR.
- DUNNE, T., BLACK, R.-D., 1970, Partial area contributions to storm runoff in a small New England Watershed, *Water Resour. Res.*, n° 7, p. 1160-1172.
- HORTON, R.-E., 1933, The role of infiltration in the hydrologic cycle, *Trans. Am. Geophys. Union*, n° 14, p. 446-460.
- KAO, C., NÉDÉLEC, Y., ZIMMER, D., 1998, Surface runoff mechanisms and modeling in subsurface drained fields, in L.-C. BROWN (Ed), *7th International Drainage Symp. Drainage in the 21st century: food production and the environment*, ASAE, Orlando, Florida, USA, Proc., p. 258-266.

- LE BISSONNAIS, Y., 1996, Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology, *European Journal of Soil Science*, 47(4), p. 425-437.
- LEDUN, J., 2004, *Le déterminisme du ruissellement dans le bassin versant de Mélarchez*, rapport de stage de fin d'étude, DAA Agronomie et Environnement, INA-PG.
- LESAFFRE, B., 1988, *Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés*, université Paris VI, 334 p.
- MARTIN, P., 1997, *Pratiques culturales, ruissellement et érosion diffuse sur les plateaux limoneux du Nord-Ouest de l'Europe*, thèse INA P-G.
- MÉROT, P., 1988, Les zones de sources à surface variable et la question de leur localisation, *Hydrol. cont.*, n° 3, p. 105-115.
- MÉROT, P., KAO, C., MOUSSA, R., ARLLOT, M.-P., NÉDÉLEC, Y., 2005, Aménagement rural et gestion des excès d'eau. Chap 34 (p. 756-778), in GIRARD, M.-C., RÉMY, J.-C., MOREL, J.-L., BERTHELIN, J., WALTER, C. (Coord.), *Sols et environnement. Cours et études de cas*, Ed. Dunod Collection Sciences Sup., 832 p.
- Ministère de l'Agriculture, 1993, *Cahier des clauses techniques générales applicables aux études et à la maîtrise d'oeuvre des travaux d'assainissement et de drainage agricoles*, Bureau HAGONDERF (disponible auprès de l'unité HBAN du Cemagref Antony).
- NÉDÉLEC, Y., KAO, C., CHAUMONT, C., 2004, Réduction des transferts de crues dans les bassins versants agricoles fortement drainés : état des connaissances et des recherches, *Ingénieries-EAT*, n° 37, p. 3-21.
- PECQUEUR, S., 1997, *La dynamique fluviale dans le bassin versant du Grand Morin : l'exemple de l'Orgeval près de Coulommiers.*, 148 p.
- REFES, M., 1997, *Le ruissellement à l'échelle de la parcelle agricole : influence de l'état de surface et de l'état hydrique. Parcelles drainées et non drainées, site expérimental de La Jaillière*, DEA HHGG, univ. Paris VI, ENSMP, ENGREF.
- ROBINSON, M., RYCROFT, D.-W., 1999, The impact of drainage on streamflow, in J. VAN SHILFGAARDE (Editor), *Agricultural drainage*, Madison, Wisconsin, USA.