



## **Les observatoires du ruissellement : comprendre les processus pour améliorer les modélisations**

Thomas Grangeon, Olivier Cerdan, Valentin Landemaine, Rosalie Vandromme, Jean-François Desprats, Sébastien Salvador-Blanes, Pierre Vanhooydonck, Arthur Gaillot, Louis Manière, Isabelle Pene-Galland, et al.

### **► To cite this version:**

Thomas Grangeon, Olivier Cerdan, Valentin Landemaine, Rosalie Vandromme, Jean-François Desprats, et al.. Les observatoires du ruissellement : comprendre les processus pour améliorer les modélisations. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, EDP Sciences, 2020, pp.7-16. 10.1051/lhb/2020056 . cea-03161717

**HAL Id: cea-03161717**

**<https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-03161717>**

Submitted on 8 Mar 2021

**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.

## Les observatoires du ruissellement : comprendre les processus pour améliorer les modélisations

Thomas GRANGEON<sup>1\*</sup>, Olivier CERDAN<sup>1</sup>, Valentin LANDEMAINE<sup>1</sup>, Rosalie VANDROMME<sup>1</sup>, Jean-François DESPRATS<sup>1</sup>, Sébastien SALVADOR-BLANES<sup>2</sup>, Pierre VANHOOYDONCK<sup>2</sup>, Arthur GAILLOT<sup>2</sup>, Louis MANIERE<sup>2</sup>, Isabelle PENE-GALLAND<sup>2</sup>, Olivier EVRARD<sup>3</sup>, Anthony FOUCHER<sup>3</sup>, Lauriane LEDIEU<sup>4</sup>, Anaëlle SIMONNEAU<sup>4</sup>, Jean-François OUVRY<sup>5</sup>, Lai Ting PAK<sup>5,6</sup>

<sup>1</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Département Risques et Prévention, 3 Avenue Claude Guillemin, Orléans, France

<sup>2</sup> EA 6293 Géo-Hydrosystèmes COTinentaux (GéHCO) - Université de Tours, Faculté des Sciences et Techniques, Tours, France

<sup>3</sup> Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE-IPSL), UMR 8212 (CEA/CNRS/UVSQ), Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France

<sup>4</sup> Univ. Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France

<sup>5</sup> Association de recherche sur le Ruissellement, l'Erosion et l'Aménagement du Sol (AREAS), 2 Avenue Foch, 76460 Saint-Valéry-en-Caux

<sup>6</sup> UPR HortSys, Cirad, F-97285 Le Lamentin, Martinique, France

\* Auteur correspondant : t.grangeon@brgm.fr

*Le ruissellement est un phénomène épisodique et localisé, donc difficile à mesurer. Il résulte de l'interaction de nombreux facteurs, dont les caractéristiques intrinsèques et de surface du sol, la morphologie du bassin versant, mais également les caractéristiques pluviométriques. Afin d'améliorer la compréhension de la genèse et de la propagation du ruissellement au sein de bassins versants de tête, cinq observatoires du ruissellement sont présentés, incluant 11 bassins versants. Pour chacun d'entre eux, la pluie et le ruissellement sont mesurés sur le terrain à haute fréquence ( $\leq 15$  minutes) pendant des durées longues (1.5 à 11 ans). 1640 événements pluvio-ruisselants sont extraits de ces chroniques en continu et statistiquement analysés afin de cerner les facteurs influant significativement le ruissellement.*

*La réponse ruisselante de chaque bassin versant est extrêmement complexe mais permet d'identifier des comportements communs. L'importance d'une considération des caractéristiques des sols est montrée, ainsi que celle de leur occupation, état de surface et hydrique. La dispersion de la relation pluie-débit observée au sein de chacun des observatoires permet par ailleurs de montrer et de quantifier l'impact des caractéristiques pluviométriques sur la lame d'eau ruisselée. Les leçons apprises sur chacun des observatoires et leurs conséquences sur la compréhension et la modélisation du ruissellement dans différents contextes sont discutées.*

*Mots-clefs : Ruissellement hortonien, ruissellement par saturation, propriété des sols, pluviométrie*

### *Runoff observatories: from processes analysis to improved modelling*

*Runoff events are usually very concentrated in both space and time, and are therefore challenging to monitor. They result from the interactions of rainfall characteristics with both soil surface and intrinsic characteristics and catchment morphology.*

*To improve our understanding of this complex process, five observatories were installed to monitor the runoff response of eleven catchments to natural rainfall events. Measurements were performed with a high frequency ( $\leq 15$  minutes-time step) and over long time periods (1.5 to 11 years). 1640 rainfall-runoff events were extracted from rainfall and discharge time series. Statistical analyses were performed in order to analyze the processes to account for when studying runoff events.*

*The rainfall-runoff response of each catchment is highly variable, but some common features were identified across contrasted catchments. Under highly variable soil types, the catchment runoff exhibited contrasted patterns. Soil surface state, and land use were demonstrated to highly affect runoff. The scattering in the rainfall-runoff relationship demonstrated the key role of the initial soil state and rainfall characteristics. Lessons learnt from previous studies in these various environments, as well as their consequences on runoff understanding and modelling are discussed.*

*Keywords: Infiltration-excess runoff, saturation-excess runoff, soil properties, rainfall*

### INTRODUCTION

Le ruissellement est un phénomène complexe qui résulte de l'interaction de nombreux facteurs, notamment des précipitations avec le sol (Beven, 1983). Les précipitations, comme les propriétés du sol, étant extrêmement hétérogènes à la fois dans l'espace et dans le temps, le ruissellement présente une variabilité forte à toutes les échelles, allant du mètre à l'échelle du bassin versant et de la seconde à la journée. Au sein de cette complexité,

on distingue en général le ruissellement hortonien, ou ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration (Horton, 1933), du ruissellement par saturation du sol (Dunne, 1978), bien que les deux processus puissent se produire de manière concomitante sur un bassin versant (Saffarpour et al., 2016).

Les enjeux liés à la compréhension de la formation et de la propagation du ruissellement sont nombreux. Ils sont tout d'abord sociétaux, les crues correspondantes étant en général rapides comparées à celles de cours d'eau ou de nappe (Blöschl & Sivapalan, 1995), ce qui implique un temps de réaction moindre pour réagir face à une éventuelle alerte. Par ailleurs, le ruissellement peut éroder les sols et servir de vecteur de transport aux particules ainsi mises en mouvement. Celles-ci peuvent également contenir ou adsorber à leur surface diverses substances biogènes ou polluantes (e.g. Eléments Traces Métalliques, ETM – Garneau et al., 2014 ; pesticides – Gascuel-Oudoux et al., 2009 ; carbone – Gomes et al., 2019). Le ruissellement participe ainsi au cycle des éléments et au transfert de contaminants vers des milieux réceptacles au sein desquels les conditions physico-chimiques peuvent permettre leur remobilisation dans l'environnement. Enfin, lorsque les conditions d'écoulement s'y prêtent, par exemple lors de la décrue, ces matériaux peuvent se déposer et engendrer des dégâts ainsi que des coûts de réhabilitation supplémentaires, notamment dans le cas de zones d'habitations (Evrard et al., 2007).

Les enjeux liés à la compréhension du ruissellement sont par ailleurs scientifiques. Il peut se produire dans des conditions extrêmement variées : par exemple, les évènements méditerranéens dont les durées sont brèves et les cumuls de l'ordre de quelques centaines de millimètres sont souvent associés à du ruissellement hortonien. Ce type de ruissellement, gouverné par les caractéristiques des pluies, peut néanmoins se produire pour des cumuls moindres, de l'ordre de la dizaine de millimètres, par exemple lorsqu'un sol battant s'encroûte sous l'effet des averses successives (Valentin & Bresson, 1992). Inversement, le ruissellement produit par saturation implique l'enchaînement d'évènements au cours de la saison hydrologique et peut générer des évènements ruisselants pour des évènements pluvieux de cumuls inférieurs à dix millimètres (e.g. Grangeon et al., 2017).

Face aux conséquences possibles du ruissellement, il apparaît nécessaire de mettre en place des stratégies d'aménagement du territoire afin d'en limiter les conséquences. Cependant, les connaissances manquent pour produire des modèles et outils permettant d'aboutir à de tels plans d'aménagement. Les principales limites à l'atteinte de cet objectif sont aujourd'hui liées à la quantification des volumes d'eau et des vitesses impliquées au cours des évènements ruisselants, mais également à l'identification des sources du ruissellement et aux chemins de l'eau au sein des bassins versants.

Afin de progresser dans la compréhension et la conceptualisation du ruissellement, et permettre d'aboutir à la création d'outils pertinents de gestion du risque associé, la mise en place d'observatoires de mesures constitue l'une des solutions pertinentes. Ils permettent en effet d'analyser les processus gouvernant la dynamique du ruissellement, mais offrent également des terrains sur lesquels des données de qualité et acquises en continu sont disponibles, permettant de conceptualiser, tester, conforter ou corriger voire réfuter des hypothèses de modélisation. De manière générale, de nombreux observatoires ont été et sont en train d'être déployés dans le monde (e.g. Critical Zone Observatories – CZO ou encore Observatoires de la Zone Critique : Application et Recherche – OZCAR), dans le but d'acquérir sur le long terme des informations à haute fréquence spatiale et temporelle, par exemple pour analyser la réponse hydro-sédimentaire de bassins versants (e.g. Nord et al., 2017). Ce travail s'insère dans ce contexte global d'acquisition et d'analyse de données. Cinq observatoires sont retenus, représentant onze sous-bassins versants, dont le fonctionnement détaillé a été analysé par ailleurs (Grangeon et al., 2017 ; Desprats et al., 2018 ; Grangeon et al., en révision ; Ledieu et al., accepté). L'approche retenue dans la présente étude se centre sur les bassins versants de tête. Elle consiste à privilégier la diversité des terrains d'étude afin de disposer d'une grande variété de conditions hydrologiques et donc d'améliorer la représentativité des résultats. Au vu des échelles temporelles impliquées dans l'étude du ruissellement, le critère de sélection a été la disponibilité de mesures à haute fréquence (de l'ordre de dix minutes) sur des périodes de temps représentatives de la variabilité des conditions pouvant générer du ruissellement (au minimum une année hydrologique).

## MATERIEL ET METHODES

Les cinq observatoires déployés sont localisés en France métropolitaine. Ils se situent en région Centre Val de Loire : Louroux (quatre bassins versants), Bonnée (un bassin versant), Egoutier (un bassin versant) ; en Normandie : Bourville (deux bassins versants) ; mais également sur l'île de Mayotte (trois bassins versants) (Figure 1).

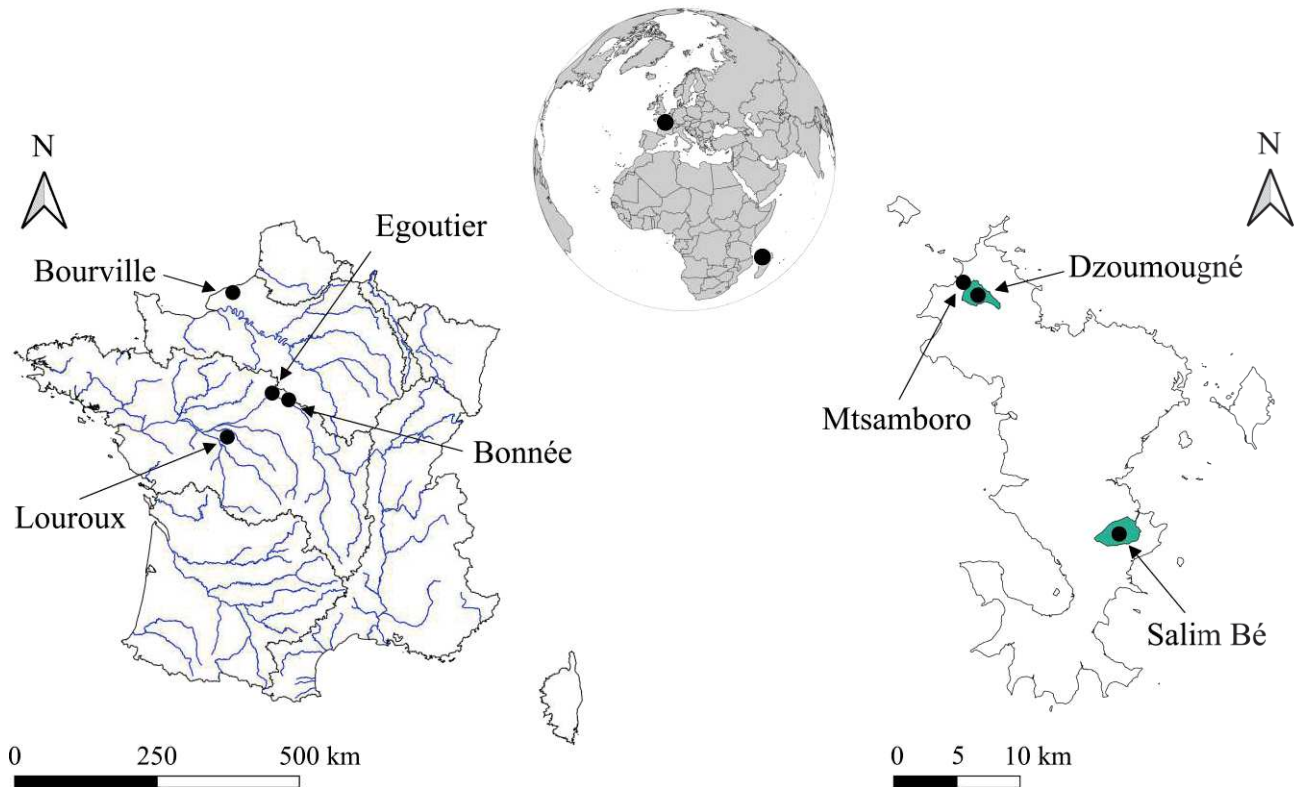


Figure 1: Localisation des cinq observatoires, regroupant un total de 11 bassins versants

Leurs principales caractéristiques, les variables suivies ainsi que leurs fréquences d'acquisition sont indiquées dans le Tableau 1.

Sites		Sols		Climat	Mesures		
Observatoires	Surfaces (km <sup>2</sup> ) - Durée d'acquisition (années) - Nombre d'évènements ruisselants analysés (-)	Occupation du sol dominante	Texture dominante	Classification de Köppen-Geiger - Pluie moyenne annuelle (mm)	Mesures communes aux observatoires (fréquence)	Mesures supplémentaires et remarques	Processus dominant la genèse du ruissellement
Louroux – Masniers (Masn.)	1.96 – 7 ans * - 39	Agriculture	Limons	Tempéré – 684 mm	Q (15 min.), P (5 min.), MES (15 min.)	Q et MES sur parcelles et drain agricole, phosphore	Saturation (+ hortonien)
Louroux – Grand Bray (GB)	5.04 – 7 ans * - 39	Agriculture	Limons	Tempéré – 684 mm	Q (15 min.), P (5 min.), MES (15 min.)	Inclut le bassin de Masniers, phosphore	Saturation (+ hortonien)
Louroux – Beaulieu (Beau.)	5.91 – 7 ans * - 39	Agriculture	Limons	Tempéré – 684 mm	Q (15 min.), P (5 min.), MES (15 min.)	Phosphore	Saturation (+ hortonien)
Louroux – Conteraye (Cont.)	2.03 – 7 ans * - 39	Forêts et prairies	Limons	Tempéré – 684 mm	Q (15 min.), P (5 minutes), MES (15 min.) en suspension (15 min.)	Phosphore	Saturation (+ hortonien)
Bonnée (Bonn.)	120 – 2 ans – 35	Agriculture et forêts	Sables et argiles	Tempéré – 637 mm	Q (10 min.), P (10 minutes), MES (10 min.)	Q et MES à l'exutoire de 34 ha de parcelles drainées	Saturation et hortonien
Mayotte - Mtsamboro (Mtsa.)	0.19 - 4 ans * - 287	Urbain et péri-urbain (30%), agricole et naturel (70%)	Argile et limon	Tropical – 1441 mm	Q (1 min.), P (1 min.), MES (1 min.)	Q et MES sur parcelles par simulation de pluie	Ruissellement de subsurface et concentration en bas de versant

Mayotte – Dzoumougné (Dzou.)	3.43 - 4 ans * - 401	Agriculture (80%) et Naturel (85.8%) badlands (14.2%)	Argile et limon	Tropical – 1756 mm	Q (1 min.), P (1 min.), MES (1 min.)	Q et MES sur parcelles par simulation de pluie	Ruissellement de subsurface et concentration en bas de versant
Mayotte - Salim Bé (Salim.)	5.34 – 4 ans * - 273	Mixte - Agriculture et Forêt (97.1%), urbain (1.4% à l'exutoire), badlands (0.7%)	Argile et limon	Tropical – 1441 mm	Q (1 min.), P (1 min.), MES (1 min.)	Q et MES sur parcelles par simulation de pluie	Ruissellement de subsurface et concentration en bas de versant
Egoutier (Egout.)	3.8 – 2 ans * - 24	Forêt et péri-urbain	Argilo-sableux	Tempéré – 637 mm	Q (3 min.), P (6 min.), MES (6 min.)	Mesures contaminants (ETM, Pharmaceutiques et HAP) + géochimie organique et minérale	Saturation (+ hortonien)
Bourville (BRVL)	10.45 – 11 ans * - 227	Agriculture	Limons	Tempéré – 765 mm	Q (1 à 15 min.), P (1 à 15 min.), MES (Événementielle)	Mesures de pesticides	Hortonien (+saturation)
Bourville – Fond du tilleul (FDTL)	1.45 – 7 ans * - 237	Agriculture	Limons	Tempéré - 765 mm	Q (1 à 15 min.), P (1 à 15 min.), MES (Événementielle)	Emboîté dans BRVL, mesures de pesticides	Hortonien (+saturation)

Tableau 1: Principales caractéristiques des observatoires. Q indique le débit ( $m^3.s^{-1}$ ), P le cumul de pluie (mm) et MES la concentration en Matières En Suspension ( $mg.l^{-1}$ ). HAP indique les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques. Les pluies moyennes annuelles sont issues des archives climatologiques de Météo France sur la période 1981-2010. La classification climatique est issue de Beck et al. (2018). Les astérisques \* indiquent des observatoires dont les mesures sont encore en cours d'acquisition actuellement. A noter que l'Egoutier dispose de trois stations, mais qu'une seule d'entre elles a été utilisée dans l'analyse. Les processus indiqués entre parenthèses dans la colonne « Processus dominant la genèse du ruissellement » indiquent un processus soupçonné d'intervenir dans la dynamique du bassin versant, mais dans un faible nombre de cas.

Il s'agit globalement de bassins versants anthropisés, que ce soit du fait d'activités agricoles (Louroux, Bonnée, Bourville, Mayotte) ou d'activités industrielles/occupations urbaines (Egoutier). Ces bassins versants présentent des pentes variées, qui peuvent être importantes (Mayotte : 15% à Salim Be, 16% à Dzoumougné, 22% à Mtsamboro) faibles (Bourville et Bonnée : médiane inférieure à 2%) à très faibles (Louroux et Egoutier : médiane de l'ordre de 0.5 %).

L'acquisition de données se base sur une mesure en continu de la hauteur d'eau et de la turbidité, l'utilisation d'un pluviomètre à auget, ainsi que d'un préleveur séquentiel permettant d'extraire, en crue et hors crue, des échantillons d'eau et de matières en suspension. La chronique de hauteur d'eau est convertie en chronique de débit par utilisation d'une courbe de tarage expérimentale, exception faite de la station de Mtsamboro dont le temps de réponse très court (inférieur à 15 min) a imposé l'utilisation d'une loi hydraulique sur section contrôlée. Puis la part du ruissellement est extraite par utilisation d'un filtre numérique de type Chapman (1991), en supposant qu'il est représenté par la partie rapide de l'écoulement. Si le choix d'un filtre numérique pour extraire la part du ruissellement depuis un signal de débit total porte souvent à débat (Pelletier et Andréassin, 2020), il est à noter que la même méthodologie a été strictement appliquée sur chacun des bassins versants analysés, permettant une comparaison relative des résultats. La chronique de turbidité est convertie en chronique de concentration en matières en suspension par tarage à l'aide d'échantillons d'eaux brutes acquis par des préleveurs automatiques puis traités en laboratoire (filtration à 0.45  $\mu\text{m}$  et séchage à 105° pendant au moins 24 heures). Seuls des prélèvements de MES intégrés à l'échelle de l'évènement ont été effectués au sein du bassin versant de Bourville.

Les évènements pluvieux sont extraits sur des critères de quantité de pluie et de durée entre chaque évènement. Ils sont ensuite couplés aux évènements de crues identifiés sur la base d'un rapport entre écoulements rapides et écoulements lents. Ces critères et seuils sont propres à chaque bassin versant et déduits d'une procédure d'essais-erreurs basée sur le temps de réponse mesuré sur les chroniques. Ainsi, pour chaque observatoire, des chroniques haute fréquence sont disponibles, auxquelles est couplée une identification des évènements pluvio-ruisselants. Les variables décrivant ces évènements, calculées sur la base de cette identification, sont les suivantes : volume de ruissellement et lame d'eau ruisselée ( $\text{m}^3$  et mm), débit de pointe et débit de pointe spécifique ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ ), durée de l'évènement ruisselant (h), cumul de pluie (mm), durée de la pluie (min.), intensité de pluie maximale et moyenne ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ), précipitations sur 48 heures antécédentes (mm), coefficient de ruissellement (%). La pluie antécédente a été sommée sur 48h sur la base d'une étude antérieure ayant démontré son utilité pour l'analyse de la dynamique ruisselante de versants (Cerdan et al., 2001). Cette valeur est une indication de l'humectation de l'horizon supérieur du sol, favorisant la genèse de ruissellement hortonien. Il est par ailleurs à noter que cette méthodologie implique que les cumuls de pluie analysés dans le texte sont ceux ayant généré des évènements de crue.

Par ailleurs, la dynamique érosive des bassins versants du Louroux et de la Bonnée a été étudiée en détail, ainsi que celle d'éléments chimiques associés à l'érosion au sein du bassin versant de l'Egoutier. Les lecteurs intéressés par ces thématiques sont renvoyés aux publications correspondantes (Grangeon et al., 2017 ; Grangeon et al., en révision ; Ledieu et al., 2020, respectivement).

## RESULTATS ET DISCUSSION

### *Réponse ruisselante générale et processus impliqués*

Les observatoires sont déployés sur des échelles de temps, d'espace et dans des conditions climatiques et pédologiques variées. Ils présentent des coefficients de ruissellement variant de plusieurs ordres de grandeur (Figure 2), de moins de 10<sup>-30</sup>% à près de 70%, reflétant la diversité des facteurs morphologiques, pédologiques ou encore climatiques des bassins versants.



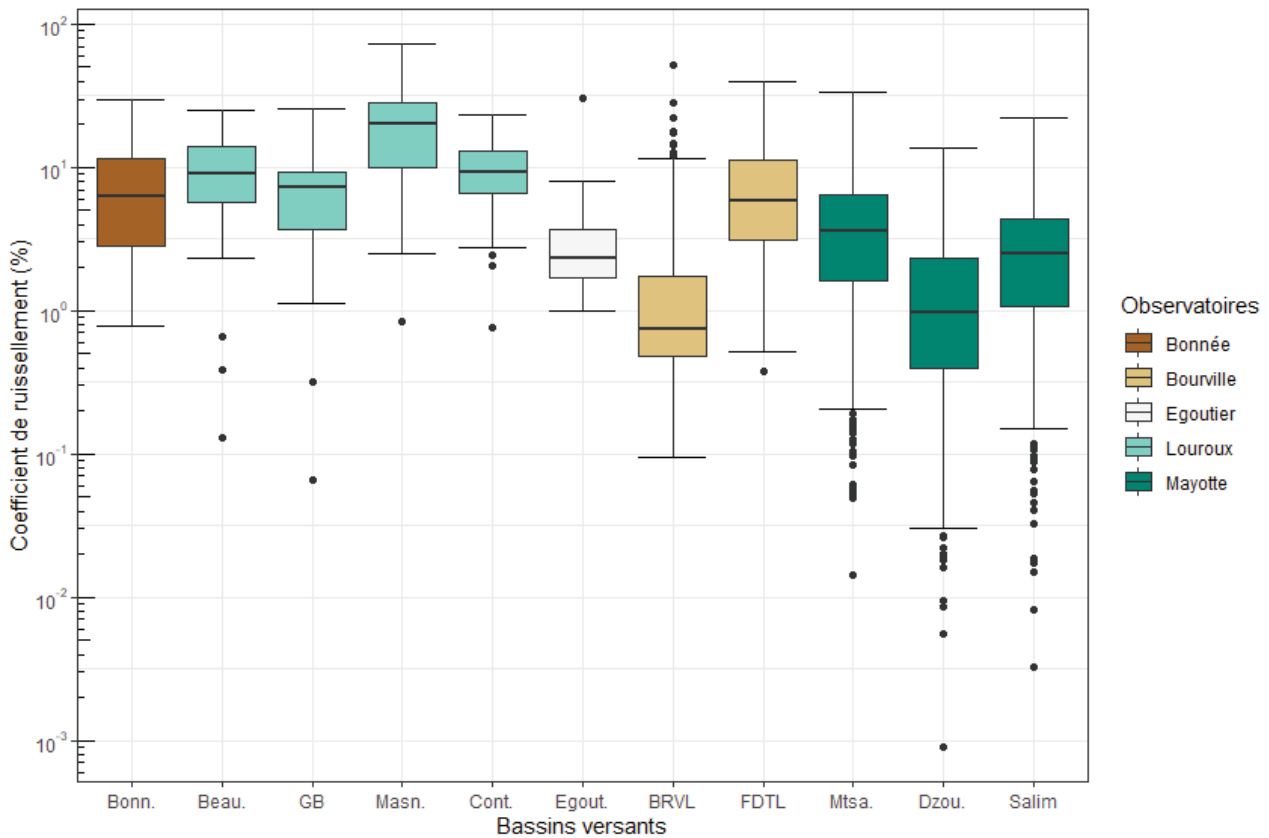


Figure 2 : Coefficients de ruissellements calculés sur chaque bassin versant. Les acronymes des bassins versants sont définis dans le Tableau 1. L'axe y est logarithmique.

On observe qu'une forte variabilité subsiste en restreignant l'analyse aux quatre bassins versants du Louroux. Ils présentent des morphologies et pluviométries similaires, mais des occupations et des natures de sols variables : trois sont occupés par des cultures de plaines tandis qu'un sous bassin versant (celui de la Conteraye) est majoritairement forestier. Les superficies de ces bassins s'étendent de 2 à 6 km<sup>2</sup> et les pentes y sont globalement faibles, inférieures au pourcent. Même si le bassin versant plutôt forestier présente un coefficient de ruissellement plus faible (sa médiane est de 8% contre 10% à 14% pour les bassins versants cultivés), en lien avec une infiltration plus élevée favorisée par la végétation, les coefficients de ruissellement présentent des gammes semblables, allant de 0.1% à 30%, avec six observations allant même au-delà. Les différences entre médianes ne sont pas significatives (test de Mood), suggérant que les variations de caractéristiques de ces petits bassins versants induisent des différences de réponse ruisselantes limitées. Par ailleurs, l'ampleur de ces coefficients de ruissellement est également à mettre au regard de faibles intensités de pluie maximales, de médiane 5 mm.h<sup>-1</sup>. Il a été montré que ces coefficients de ruissellement s'expliquent par une combinaison de saturation des sols en hiver contribuant à une forte restitution de l'eau précipitée, mais également à une connectivité augmentée par l'utilisation massive de réseau de drainage au sein des parcelles cultivées de ce bassin versant et, enfin, à des orages de printemps (Grangeon et al., 2017). L'état des sols, ainsi que les caractéristiques des précipitations sont donc des caractéristiques primordiales à prendre en compte dans la compréhension du fonctionnement du ruissellement.

Le bassin versant de la Bonnée, également drainé et de superficie environ dix fois supérieure, a enregistré des cumuls de pluie médians supérieurs de 30% à ceux enregistrés sur le Louroux, mais ne présente pas de différence significative de coefficient de ruissellement avec ce dernier. Il est en revanche intéressant de noter que le même test conduit sur le bassin versant de l'Egoutier, localisé dans un contexte climatique semblable, majoritairement couvert de forêts (à 74%), de taille et de topographie similaires présente des coefficients de ruissellement significativement différents de ceux mesurés sur les bassins-versants du Louroux : également compris entre 1% et 30%, mais de médiane 2%. Cette différence peut s'expliquer par l'absence de réseau de drainage sur ce terrain, mais également à des cumuls de pluies enregistrés sur les périodes d'étude deux fois plus faibles que ceux observés sur le Louroux en termes de cumul médian, suggérant l'importance du forçage pluviométrique sur la réponse ruisselante des bassins versants.



Dans un autre contexte, on note par ailleurs une différence nette entre le sous bassin versant de Fond Du Tilleul et celui de Bourville au sein duquel il se situe. La médiane du coefficient de ruissellement chute ainsi de 6%, à environ 1%. En revanche, les gammes de variations restent semblables entre les deux échelles d'observations, comprises entre 0.1% et 50%. Ces coefficients de ruissellement, très importants pour des climats sous lesquels l'intensité de pluie médiane ne dépasse pas 10 mm.h<sup>-1</sup> sur la période d'étude, sont attribués à la combinaison de deux facteurs : la saturation de l'horizon de surface, mais également l'encroûtement des sols. Ce dernier est en effet courant sur les sols limoneux et résulte en une capacité d'infiltration qui peut être réduite de plusieurs dizaines à quelques millimètres par heure (Evrard et al., 2008). L'importance de l'état de surface du sol dans ce type de contexte, représenté dans ce cas par l'encroûtement, la rugosité et le couvert végétal, est telle qu'il s'agit d'une variable utilisée directement en entrée de modélisations (Cerdan et al., 2001 ; Evrard et al., 2009), illustrant l'importance d'une caractérisation de la surface des sols. Ces paramètres sont par ailleurs aisés à relever de manière robuste et avec une haute fréquence temporelle, facilitant une description temporelle précise des états de surface au sein des modèles.

Finalement, il est intéressant de noter que l'unique bassin versant situé en zone tropicale et soumis aux intensités de pluie maximales les plus importantes, avec une médiane de 48 mm.h<sup>-1</sup>, est paradoxalement celui qui produit les coefficients de ruissellement parmi les plus faibles, de médiane 2% et de maximum 33%. Si les valeurs extrêmes les plus faibles s'expliquent par une configuration du site plus favorable à l'enregistrement des événements de très faible amplitude, ces coefficients maximums d'amplitude faible s'expliquent par des sols volcaniques très infiltrants en surface, du fait d'une forte structuration du sol dans l'horizon superficiel du sol, notamment sous l'effet de la macrofaune, qui limite le ruissellement hortonien, bien qu'il puisse être observé sur certaines occupation de sols, typiquement les jardins urbains et les padzas. Cette variabilité spatiale des occupations du sol, couplée à la présence d'une couche peu perméable sous la couche filtrante induit une dynamique complexe du ruissellement sur ce type de terrain. Il a par ailleurs été montré que des coefficients plus importants peuvent être mesurés sur des sols volcaniques dans d'autres contextes (Gratiot et al., 2011), ce qui montre que les valeurs mesurées sur ce bassin versant impliquent d'autres processus de transfert de l'eau. Ainsi, l'effet du type de sol est important à prendre en compte lorsque ses caractéristiques diffèrent radicalement d'un bassin versant à l'autre. Il convient néanmoins de souligner que, pour ces bassins versants sur sol volcanique, une forte variabilité des coefficients de ruissellement est observée, à la fois intra- et inter-bassins. Les cumuls de pluie enregistrés sur ces différents bassins versants ne diffèrent pas significativement. Une part non-négligeable de la variabilité de la réponse ruisselante est donc attribuable aux propriétés du sol, à la couverture du sol et à son état hydrique.

#### *Variabilité temporelle et influence de la saisonnalité*

La variabilité du ruissellement induite par les caractéristiques du sol et de la pluie est retranscrite par la relation pluie-débit de chaque bassin versant, qui est extrêmement dispersée (Figure 3).

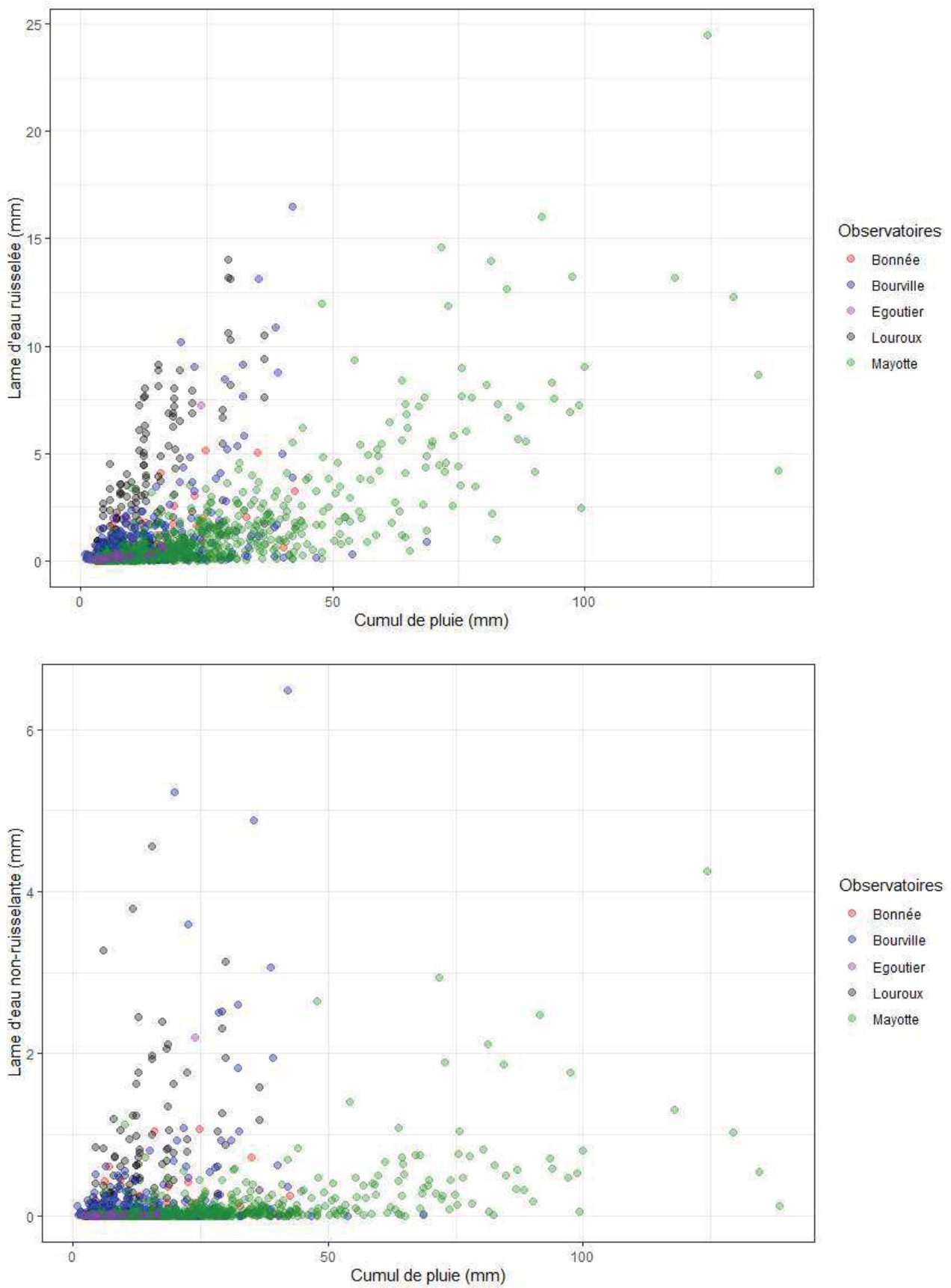


Figure 3 : Relation entre la lame d'eau précipitée et la lame d'eau a) ruisselante et b) correspondant à la partie non-ruisselante (au sens de la séparation d'hydrogramme), par observatoire. Chaque point représente un évènement pluvio-ruisselant.

Ainsi, chaque bassin versant peut répondre à un cumul de pluie donné par une lame d'eau ruisselée qui peut varier de zéro à plus de 10 mm. On observe par ailleurs une dispersion relative plus importante entre événements pluvieux qu'entre bassins versants. Ainsi, pour des pluies comprises entre 3.4 et 36.4 mm, les lames d'eaux ruisselées sur le bassin versant du Louroux sont comprises entre  $10^{-2}$  et 14 mm. Pour un cumul de pluie comparable, les lames d'eaux ruisselées sont comprises entre 0.1 et 5.1 mm pour le bassin versant de la Bonnée,  $10^{-2}$  à 13.1 mm pour le bassin versant de Bourville et  $10^{-3}$  à 7 mm pour les bassins versants de Mayotte. A une gamme de pluie donnée, la lame d'eau ruisselée est répartie sur une plage pouvant couvrir jusqu'à trois ordres de grandeur. Ceci souligne à nouveau l'importance de l'état du sol, à savoir sa composition, son état hydrique mais également son état de surface.

Les bassins versants de Mayotte montrent des ruissellements plus faibles que les autres bassins versants pour un cumul de pluie donné. Inversement, les bassins versants du Louroux et de Bourville peuvent présenter des réponses ruisselantes pour de très faibles averses : le premier décile des cumuls de pluie provoquant un ruissellement supérieur à 1 mm est respectivement de 7 mm et 13 mm pour ces deux bassins versants, tandis qu'il est près de deux fois plus élevé pour les bassins versants de Mayotte : 24 mm. Ceci souligne les différences que peuvent engendrer les caractéristiques des sols sur la genèse et l'amplitude du ruissellement, ici au travers des phénomènes d'encroûtement et de saturation des sols, d'une part, et par les fortes capacités infiltrantes des sols volcaniques, d'autre part.

L'analyse de l'influence de l'état hydrique du sol peut être réalisée en comparant les variations saisonnières du coefficient de ruissellement (Figure 4).

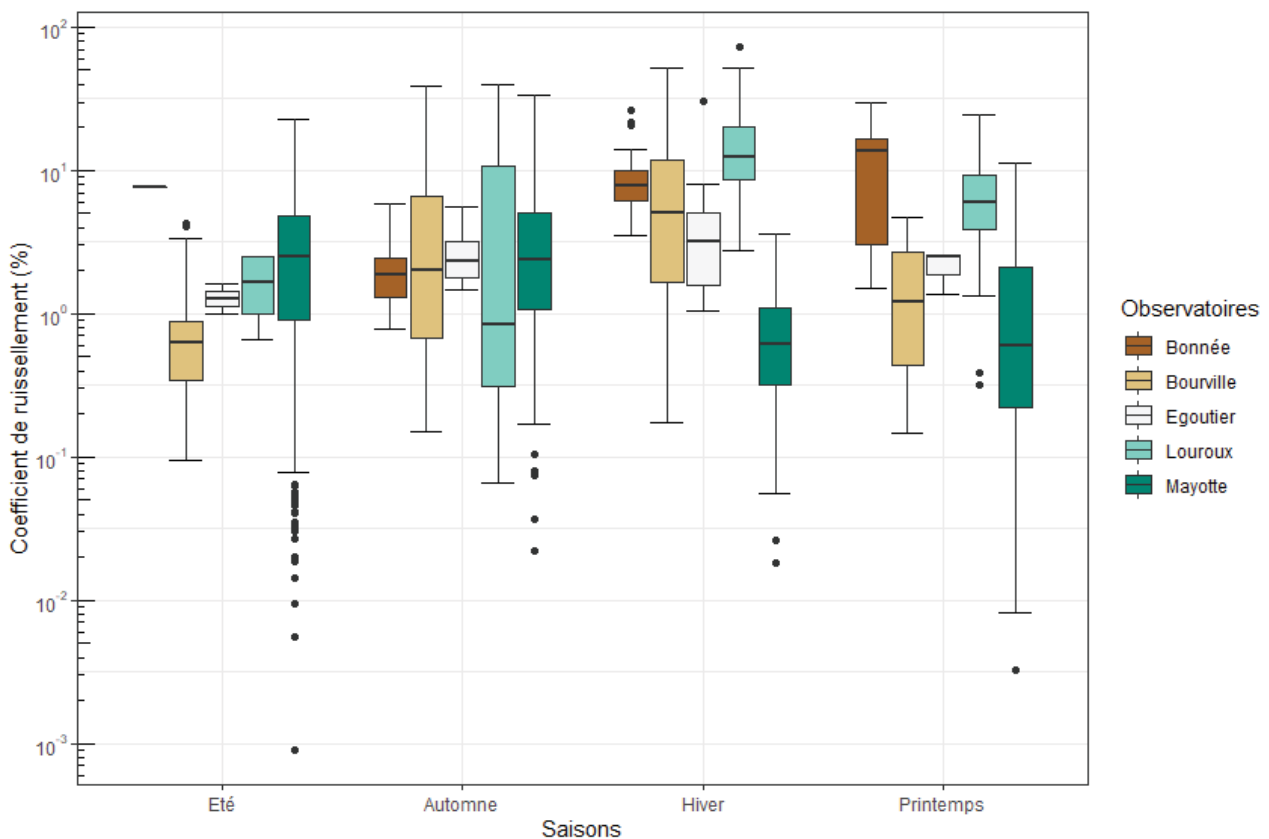


Figure 4 : Saisonnalité des coefficients de ruissellement mesurés sur chaque bassin versant. Les saisons indiquées pour les observatoires de Mayotte correspondent aux saisons australes (la saison des pluies s'y étend de novembre à avril), les autres aux saisons boréales.

La saison hivernale se distingue particulièrement pour les bassins versants situés en métropole. Dans ces environnements, elle est propice à l'enchaînement d'événements pluvieux, à de faibles valeurs d'évapotranspiration et donc à la saturation des sols. Elle correspond aussi à la période de battance, et donc à de faibles infiltrabilités des sols. Il s'agit donc naturellement d'une période privilégiée d'occurrence du ruissellement. Ainsi, le coefficient de ruissellement pour le bassin versant de la Bonnée passe, en médiane, de

près de 2% en automne à plus de 8% en hiver et au printemps. Sur le bassin versant de Bourville, l'hiver enregistre un coefficient de ruissellement médian de 8%, qui chute à 1% au printemps, notamment suite aux récoltes et au travail du sol, qui le rend beaucoup plus infiltrant. La même évolution saisonnière est constatée pour le bassin versant du Louroux, également situé dans un contexte agricole. Le bassin versant de l'Egoutier, moins soumis à l'activité agricole (vergers, 7%), présente des variations saisonnières de plus faible amplitude, entre 2% et 3% en médiane en automne et en hiver, contre 1% à 2% en médiane pour l'été et le printemps.

Les coefficients de ruissellement des observatoires situés à Mayotte sont plus importants lors de l'automne et de l'été austral, du fait notamment de l'importance de la période de la mousson propice aux événements de forts cumuls et de forte intensité ; le coefficient de ruissellement médian passe ainsi en hiver et au printemps (saisons australes) de 0.6% à 2.6% lors de l'automne et de l'été austraux.

## CONCLUSIONS ET IMPLICATIONS POUR LA MODELISATION

L'instrumentation de différents observatoires, localisés dans des contextes environnementaux et climatiques variés, montre une variabilité très importante du coefficient de ruissellement qui peut s'étendre, selon les processus impliqués dans la genèse du ruissellement, de 0 à plus de 70%, notamment lorsque les précipitations se produisent sur un sol saturé, tel qu'observé dans des contextes de plaine agricoles du centre de la France. A l'inverse, les observatoires localisés à Mayotte, ayant enregistré les précipitations les plus intenses mais dont les caractéristiques des sols sont extrêmement contrastées, présentent des coefficients de ruissellement globalement moins importants. Cette comparaison entre terrains d'études montre la variabilité de la réponse ruisselante des bassins versants, et notamment l'importance d'une prise en compte adaptée du type de sol dans une démarche de modélisation du ruissellement.

Les coefficients de ruissellement significativement plus élevés mesurés sur les observatoires soumis au phénomène de saturation des sols suggèrent par ailleurs l'importance de ce processus de ruissellement dans l'amplitude de la réponse ruisselante des bassins versants. Cette hypothèse est soutenue par l'évolution saisonnière des coefficients de ruissellement, globalement plus importants en hiver et notamment sur les bassins versants agricoles de plaine. La prise en compte du stock hydrique au début de l'évènement et son évolution est donc primordiale à considérer dans les modélisations du ruissellement.

Les mesures obtenues au sein de l'observatoire de Bourville, localisé sur des sols lœssiques et dont la topographie est peu marquée, montrent des coefficients de ruissellements importants. Les études menées sur ce type de terrains ont abouti à la création de modélisations basées sur les types de cultures couvrant les sols ainsi que sur l'évolution des états de surface associés. L'installation d'observatoires a donc souligné la nécessité de considérer l'occupation des sols ainsi que son état de surface, tout en ayant contribué à son incorporation dans des modèles par le biais de variables aisément dérivées de relevés de terrain.

La variabilité observée au sein même de bassins versants relativement homogènes en terme de type de sol, de culture et de précipitation (par exemple ceux de l'observatoire du Louroux) montre néanmoins que les caractéristiques des précipitations et d'état hydrique du sol sont importantes à considérer à l'échelle de l'évènement. Cette importance est confirmée par l'étude de la relation entre lame d'eau précipitée et lame d'eau ruisselée entre observatoires, qui montre une variabilité supérieure pour un même bassin versant pour différents évènements pluvieux, plutôt qu'entre bassins versants.

La diversité des réponses observées tant entre observatoires qu'à l'échelle de la saison et même de l'évènement pluvieux souligne l'importance de réaliser des mesures continues et à long terme, dans une optique de compréhension et de quantification des processus dominant la dynamique ruisselante des bassins versants. De telles mesures permettent de développer des modélisations appropriées aux domaines étudiés, en y incluant les processus les plus pertinents.

Finalement, en complément de l'analyse de données, des modélisations ont été ou sont en cours de réalisation sur les différents bassins versants présentés dans cet article. Elles visent à quantifier les processus dominant la dynamique ruisselante et érosive de ceux-ci ainsi que leurs évolutions temporelles, mais également à analyser la dynamique spatiale des flux hydro-sédimentaires au sein des bassins versants. De telles approches, complétées par des réseaux de mesures plus denses qu'un unique point situé à l'exutoire, tel que celui mis en place sur le bassin versant du Louroux, mais également dans d'autres études (Dehotin et al. 2015), permettent

en effet de cartographier les zones de production, de transfert et d'infiltration au sein des bassins versants, offrant des clés pour la gestion de l'aléa ruissellement au sein des bassins versants.

## REFERENCES

- Beck H.E., Zimmermann N.E., McVicar T.R., Vergopolan N., Berg A., Wood E.F., 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, **5**:180214.
- Beven K. (1983) Surface water hydrology - runoff generation and basin structure. *Reviews of geophysics and space physics* **21(3)**: 721–730.
- Blöschl G., Sivapalan M. (1995) Scale issues in hydrological modelling - a review. *Hydrological Processes*, **9**:251–290
- Cerdan O., Souchère V., Lecomte V., Couturier A., Le Bissonnais Y. (2001) Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and Transfers by Runoff and Erosion related to Agricultural Management. *Catena*, **46**:189-205
- Chapman T.G., 1991. Comment on “Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses”. *Water Resources Research*, **27**:1483-1484
- Dehotin J., Breil P., Braud I., de Lavenne A., Lagouy M., Sarrazin B. (2015) Detecting surface runoff location in a small catchment using distributed and simple observation method. *Journal of Hydrology*, **525**:113-129.
- Desprats J.F., Chowanski E., Landemaine V., Colas B., Dectot G., Rinaudo J.D., Said K., Vignerot B., Vitter M., Bailby E. (2018) - Projet LESELAM 2 (Lutte contre l’Erosion des Sols et l’Envasement du LAGon à Mayotte) Rapport Avancement n°1 – Décembre 2018 BRGM/RP- 68559-FR, 71 pages, 48 illustrations
- Dunne T. (1978) *Field studies of hillslope flow processes* (Wiley éd.), pp. 227–293. M.J. Kirkby.
- Evrard O., Biielders C.L., Vandaele K., van Wesemael B. (2007) Spatial and temporal variation of muddy floods in central Belgium, off-site impacts and potential control measures. *Catena*, **70**:443-454.
- Evrard O., Vandaele K., Biielders C., van Wesemael B. (2008) Seasonal evolution of runoff generation on agricultural land in the Belgian loess belt and implications for muddy flood triggering. *Earth Surface Processes and Landforms* **33**:1285-1301.
- Evrard O., Cerdan O., van Wesemael B., Chauvet M., Le Bissonnais Y., Raclot D., Vandaele K., Andrieux P., Biielders C. (2009) Reliability of an expert-based runoff and erosion model: Application of STREAM to different environments. *Catena*, **78(2)**:129-141
- Garneau C., Sauvage S., Probst A., Sanchez-Perez J.M. (2014) Modelling of trace metal transfer in a large river under different hydrological conditions (the Garonne River in southwest France). *Ecological Modelling*, **306**:195-204.
- Gascuel-Oudoux C., Arousseau P., Cordier M.O., Durand P., Garcia F., Masson V., Salmon-Monviola J., Tortrat F., Trespos R. (2009) A decision-oriented model to evaluate the effect of land use and agricultural management on herbicide contamination in stream water. *Environmental Modelling and Software*, **24**:1433-1446
- Gomes T.F., van de Broek M., Govers G., Silva R.W.C., Moraes J.M., Camargo P.B., Mazzi E.A., Martinelli L.A. (2019) Runoff, soil loss and sources of particulate organic carbon delivered to streams by sugarcane and riparian areas: An isotopic approach. *Catena*, **181**, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104083>.
- Grangeon T., Manière L., Foucher A., Vandromme R., Cerdan O., Evrard O., Pene-Galland I., Salvador-Blanes S., 2017. Hydro-sedimentary dynamics of a drained agricultural catchment: A nested monitoring approach. *Vadose Zone Journal*, **16(12)**. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.05.0113>

- Grangeon T., Ceriani V., Evrard O., Grison A., Vandromme R., Gaillot A., Cerdan O., Salvador-Blanes S. (révisions modérées) Quantifying hydro-sedimentary transfers in a lowland drained agricultural catchment. *Catena*.
- Gratiot N., Duvert C., Collet L., Vinson D., Némery J., Saenz-Romero C. (2011) Increase in surface runoff in the central mountains of Mexico: lessons from the past and predictive scenario for the next century. *Hydrology and Earth System Science*, **14**:291-300.
- Horton R. (1933) The role of infiltration in the hydrologic cycle. *American Geophysical Union Transactions* **14**:446–460.
- Ledieu L., Simonneau A., Cerdan O., Négrel P., Laperche V., Grosbois C., Laggoun-Défarge F. (2020) Geochemical insights into spatial and temporal evolution of sediment at catchment scale (Egoutier stream, France). *Applied Geochemistry*, **122**:104743.
- Nord G., Boudevillain B., Berne A., Branger F., Braud I., Dramals G., Gérard S., Le Coz J., Legout C., Molinié G., van Balen J., Vandervaere J.P., Andrieu J., Aubert C., Calianno M., Delrieu G., Grazioli J., Hachani S., Horner I., Huza J., Le Boursicaud R., Raupach T.H., Teuling A.J., Uber M., Vincendon B., Wijbrans A. (2017) A high space-time resolution dataset linking meteorological forcing and hydro-sedimentary response in a mesoscale Mediterranean catchment (Auzon) of the Ardèche region, France. *Earth Systems Sciences Data*, **9**:221-249
- Pelletier A., Andréassian V. (2020). Hydrograph separation: an impartial parametrization for an imperfect method. *Hydrology and Earth System Sciences*, **24**:1171-1187.
- Saffarpour S., Western A.W., Adams R., McDonnell J.J., (2016) Multiple runoff processes and multiple thresholds control agricultural runoff generation. *Hydrology and Earth System Sciences*, **20**:4525-4545.
- Valentin C., Bresson L. (1992) Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma* **55(3-4)**:225–245.