

CRUE ECLAIR DU 22 JUILLET 2016 DANS LA REGION DE LAROCHETTE

Étude mécanistique et fréquentielle
réalisée en 2018 pour le compte de
l'Administration de la gestion de l'eau

1. INTRODUCTION

1.1. Définition du phénomène des crues éclair

Une crue éclair est caractérisée par une montée très soudaine du niveau d'eau et du débit en un point donné du réseau hydrographique. Les crues éclair sont générées par des phénomènes météorologiques très localisés (p.ex. orages), accompagnés de précipitations exceptionnellement intenses et abondantes. L'intensité des pluies dépassant la capacité d'infiltration des sols, le ruissellement de surface finit par s'étendre bien au-delà du réseau hydrographique – générant des dégâts considérables en quelques heures seulement (à commencer par l'érosion des sols).

Les crues éclair se distinguent des crues plus conventionnelles, générées par des pluies de plus faible intensité et affectant des secteurs beaucoup plus vastes. En règle générale, la montée du niveau d'eau et des débits affecte d'abord le lit mineur, s'étendant ensuite vers le lit majeur, voire le lit d'inondation. Ce phénomène s'étale sur une durée beaucoup plus longue (potentiellement plusieurs jours) que pendant une crue éclair (quelques heures seulement).

1.2. Difficultés propres à l'observation des crues éclair

Les difficultés inhérentes à l'observation et la prévision des crues éclair découlent directement de trois caractéristiques propres à celles-ci :

- [1] la localisation précise, l'extension spatiale et l'intensité de la plupart des épisodes convectifs (p.ex. orages) sont extrêmement difficiles à prévoir ;
- [2] la plupart des réseaux d'observation hydro-météorologiques conventionnels ne sont en règle générale pas assez denses pour rendre compte de l'extension spatiale très limitée de ces épisodes pluvieux extrêmes [p.ex. White et al., 2013] ;
- [3] la plupart des systèmes de prévision des crues ont été élaborés pour des phénomènes d'inondations dans de larges plaines alluviales (générées essentiellement par des épisodes pluvieux se produisant au-dessus de larges étendues au cours d'événements d'advection) et ne sont donc pas adaptés aux échelles spatiales et temporelles très réduites qui caractérisent les crues éclair [Le Lay et Saulnier, 2007 ; Douinot et al. 2016].

1.3. La prévision des crues et inondations dans le bassin de la Sûre

En réponse aux crues et inondations du milieu des années 1990 dans le bassin de la Sûre, les principaux cours d'eau du Luxembourg ont été progressivement équipés d'un réseau de surveillance météorologique et hydrologique moderne. Intégré à un système de prévision des crues et inondations, ce réseau fournit des observations de multiples paramètres météorologiques et hydrologiques à haute résolution spatiale et temporelle sur l'intégralité du réseau hydrographique du bassin de la Sûre. Ces instruments de mesure transmettent en temps réel de multiples variables vers un modèle de prévision des crues. Le modèle LARSIM (Large Area Runoff Simulation) calcule la propagation des ondes de crue à travers de multiples sous-bassins emboîtés, connectés au moyen de divers éléments de routage [Ludwig et Bremicker, 2006]. Les prévisions de crues sont basées sur un réseau de 40 stations limnimétriques, dont 24 proposent une prévision automatique de 24 heures sur le site www.inondations.lu. Ce dispositif est complété par un réseau de stations opéré par le Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) essentiellement en amont des grands cours d'eau.

En 2016, la couverture du réseau de stations hydro-météorologiques – toutes institutions confondues – comprenait ainsi 66 limnigraphes et 55 stations météorologiques, fonctionnant au pas de temps de 15 minutes pour la plupart. Parfaitement adapté aux crues et inondations générées par des précipitations pendant des événements d'advection, propres à la période hivernale, ce dispositif est moins adapté aux crues de type éclair, générées par des épisodes de pluie 'convectifs' (ou 'cévenols'). Caractérisés par des intensités de pluie extraordinaires, ces événements sont la plupart du temps également marqués par une extension spatiale très limitée – ce qui rend leur prise en compte par les réseaux d'observation conventionnels d'autant plus aléatoire.

1.3.1. Le radar météorologique de Neuheilenbach (D)

Le service météorologique allemand (Deutscher Wetterdienst, DWD) opère un réseau de radars météorologiques (système RADOLAN – Radar-Online-Aneichung). Situé dans l'Eifel, l'instrument de Neuheilenbach (à ~30km au nord-est de Larochette) couvre intégralement le Luxembourg et fournit ainsi des cartes détaillées des champs pluviométriques au pas de temps de 5 minutes. Lors de l'épisode de crue éclair du 22 juillet 2016 les données radar du DWD ont permis de délimiter avec précision l'étendue géographique des précipitations (cf. Figure 5).

1.3.2. Stations de mesure de hauteurs d'eau et de débits sur l'Ernz Blanche

La station de Larochette

Sur l'Ernz Blanche un limnigraphe a été installé en avril 2014 à hauteur de Larochette (Figure 1). Le site a également été équipé d'une échelle limnimétrique. En juillet 2016, un nouveau limnigraphe installé dans un puits en retrait du cours d'eau est venu remplacer ce dernier, quelques jours avant l'épisode du 22 juillet 2016. Lors de cet événement les berges ont été endommagées, mais le matériel de mesure est resté indemne.



Figure 1 Localisation du limnigraphe sur l'Ernz Blanche à Larochette (cercle rouge).
Source carte : map.geoportail.lu

La station de Reisdorf

Une station de mesure de hauteur d'eau de l'Administration de la gestion de l'eau (AGE) est venue compléter l'échelle historique installée à l'après-guerre sur l'Ernz Blanche à Reisdorf (Figure 2). Elle a été pourvue en 2009 d'une sonde qui mesure la hauteur d'eau et la température de l'eau.

Habituellement, les ondes de crue de la Sûre n'affectent pas l'hydrogramme de l'Ernz Blanche. Lors de l'épisode de crue du 22 juillet 2016, le fond du lit de l'Ernz Blanche a été fortement modifié. La partie bétonnée du lit a subi un important travail de sape par les eaux, créant un trou béant en-dessous du pont du CR128.



Figure 2 Localisation du limnigraphe sur l'Ernz Blanche à Reisdorf (cercle rouge). Photo prise après l'événement de crue éclair du 22 juillet 2016. Source carte : map.geoportail.lu

1.3.3. Stations de mesure de hauteurs d'eau et de débits sur l'Ernz Noire

La station de Grundhof

Une station de mesure de hauteur d'eau a été installée par l'AGE sur l'Ernz Noire au Grundhof en complément à l'échelle historique en place depuis l'après-guerre (Figure 3). Depuis 2009, cette station est pourvue d'une sonde qui enregistre la hauteur d'eau et la température de l'eau.

Le lit est canalisé (murs en pierres de taille sur plus de 4 m de haut) sur les 2 berges vers l'aval jusqu'à la route nationale 10 (N10) (environ 120 m), puis l'Ernz Noire conflue avec la Sûre 30 m plus loin. Le niveau d'eau est fréquemment impacté par les ondes de crues de la Sûre.

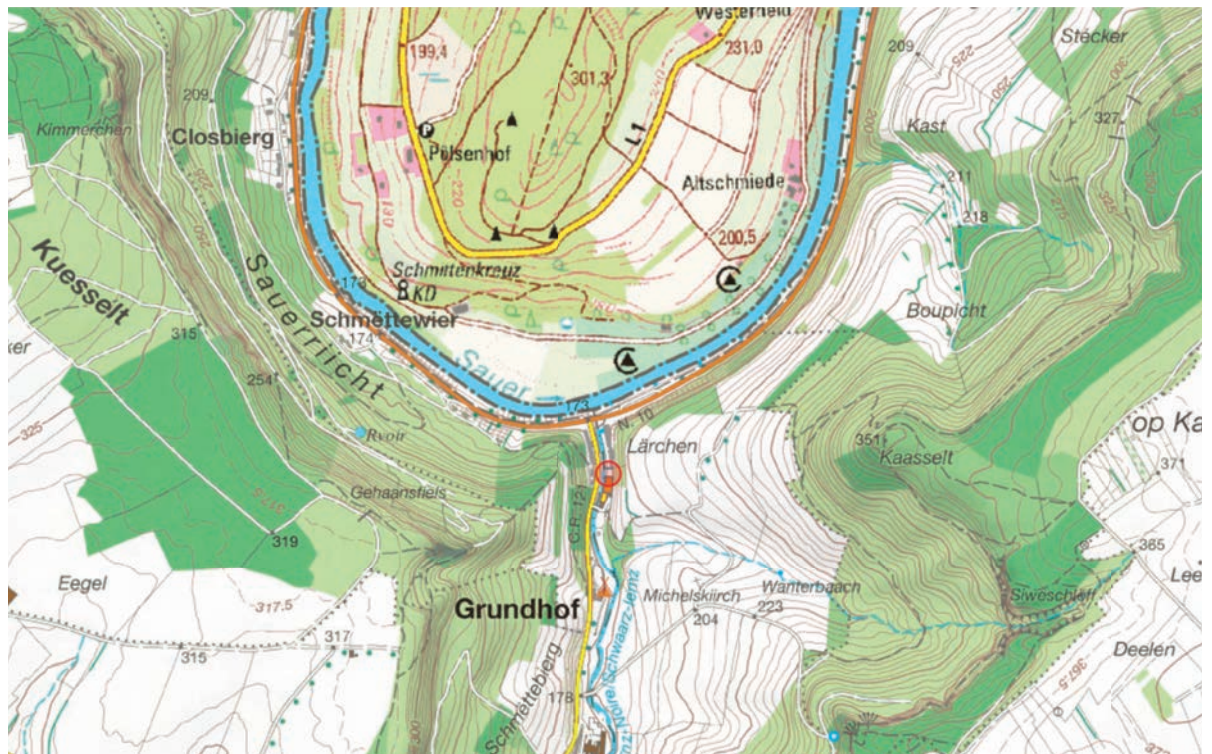


Figure 3 Localisation du limnigraphe sur l'Ernz Noire à Grundhof (cercle rouge). Source carte : map.geoportail.lu

La station du Hallerbach au Château de Grondhaff

Un limnigraphe a été installé par le LIST en septembre 2006 sur le pont donnant accès au Château de Grondhaff, en parallèle d'une échelle limnimétrique. La sonde est fixée au pont, côté aval, et se situe à environ 300 m à l'amont de la confluence avec l'Ernz Noire. Malgré un fond sableux, le lit est resté stable (aucune dérive du zéro de référence constatée sur une dizaine d'années) jusqu'à l'événement du 22 juillet 2016, qui a érodé de grosses quantités de matériaux et les a redistribués à l'aval.



Figure 4 [Haut] Site du limnigraphe du Hallerbach au Château de Grondhaff (cercle rouge). Source carte : map.geoportail.lu
[Droite] La station de mesure limnimétrique du Hallerbach en mars 2012 (photo en bas) et août 2016 (photo en haut).

2. LA CRUE ÉCLAIR DU 22 JUILLET 2016

2.1. Contexte saisonnier

Les cumuls de précipitations enregistrés au cours du printemps 2016 ont été supérieurs à ceux mesurés pendant les périodes de référence (variables en fonction de l'ancienneté de la station météorologique). Tandis que le mois de mars a été peu arrosé, les précipitations du mois d'avril furent abondantes et supérieures aux moyennes pluriannuelles. La première moitié du mois de mai a été caractérisé par des cumuls de pluie très faibles. Ce déficit pluviométrique a été compensé par les précipitations localement très abondantes et intenses conduisant occasionnellement même à des surplus de près de 50% par rapport aux moyennes pluriannuelles. Le 27 mai 2016 avait notamment été marqué par un afflux d'air subtropical, conduisant à la genèse d'une dépression quasi stationnaire au-dessus de la Grande Région. Le 30 mai des pluies très intenses cumulaient jusqu'à 83 mm en 24 heures (p.ex. à la station de Roeser), conduisant localement à des inondations. Au cours des mois de juin et juillet, les totaux pluviométriques observés à la station météorologique de Findel furent très largement supérieurs aux moyennes (+70 et 100% respectivement par rapport à la période de référence 1981-2010).

2.2. Répartition spatiale de l'événement du 22 juillet 2016

Grâce aux informations spatialisées obtenues au moyen des images fournies par le radar de Neuheilenbach (D), l'épisode convectif du 22 juillet 2016 a pu être délimité de manière très précise (Figure 5). Tout au long de l'après-midi de cette journée, des épisodes convectifs se sont succédés sur un axe sud-ouest nord-est. En fin d'après-midi le signal radar a transmis la formation très rapide d'un champ pluviométrique aux intensités exceptionnelles, compris entre les localités d'Echternach au sud et Bettendorf au nord – essentiellement (mais pas uniquement) centré sur la vallée de l'Ernz Blanche (Figure 5).

Les précipitations ont été mesurées au sol grâce aux pluviographes de l'Administration des services techniques de l'agriculture (ASTA) et de l'AGE. Tandis que la station de Christnach était située à proximité de l'épicentre de l'épisode tel que reproduit par l'imagerie radar, les stations de Bleesbruck et Bettendorf étaient situées en périphérie de l'événement.

Les intensités de pluie maximales observées au moyen du réseau de pluviographes ont été mesurées à la station de Christnach : 20.3 mm.10min⁻¹, 53.1 mm.60min⁻¹, 70.1 mm.360min⁻¹. Ces valeurs sont nettement plus élevées que les lames de pluie suggérées pour ce site par le radar météorologique : 9.6 mm.10min⁻¹, 31 mm.60min⁻¹, 46.3 mm.360min⁻¹. Une différence similaire a pu être constatée entre les intensités de pluie mesurées au sol par le pluviographe de Bettendorf et les quantités de pluie suggérées par l'imagerie radar. La différence entre les intensités de pluie suggérées par le radar météorologique et les pluviographes a néanmoins tendance à se réduire légèrement en considérant des pas de temps plus longs.

Malgré des avancées technologiques considérables, les mesures de précipitations au moyen de radars météorologiques requièrent toujours encore une quantité importante de données de calibration obtenues au seul moyen de mesures ponctuelles réalisées via des réseaux de stations pluviométriques traditionnelles. La technologie radar peut donc être considérée comme très utile, mais néanmoins et avant tout complémentaire aux dispositifs conventionnels de mesure des précipitations.

En considérant des facteurs de correction entre les hauteurs de pluie obtenues via le radar météorologique et les précipitations mesurées à la station météorologique de Christnach (où les cumuls de pluie les plus importants avaient été mesurés), nous avons estimé des intensités de pluie hypothétiques basées sur l'intensité maximale mesurée par le radar. Les intensités ainsi reconstruites seraient de 47.6 mm sur 10 minutes (i.e. 22.5 mm.10min⁻¹ x 2.11), 98 mm sur 60 minutes (i.e. 57.2 mm.60min⁻¹ x 1.71) et 117,2 mm sur 360 minutes (i.e. 77.6 mm.360min⁻¹ x 1.51).

Sur l'ensemble de l'épisode pluvieux du 22 juillet 2016, la lame de pluie – moyenne – tombée sur l'intégralité du bassin-versant de l'Ernz Blanche (à l'amont de Larochette) était de 20.3 mm. Sur l'ensemble du bassin-versant de l'Ernz Blanche (jusqu'à l'exutoire à hauteur de Reisdorf) la lame de pluie moyenne était de 33 mm. Pour le bassin-versant du Hallerbach, la pluie moyenne a été estimée à 38.9 mm. A noter qu'en raison du biais important entre observations réalisées par pluviographe d'une part et radar météorologique d'autre part, ces pluies moyennes par bassin-versant ont été obtenues en appliquant un facteur de correction de 1.5 aux hauteurs de pluie mesurées initialement via le radar météorologique. Ces valeurs constituent des moyennes sur l'ensemble de la superficie du bassin-versant et ne reflètent donc en aucun cas les très grands écarts entre intensités faibles, voire l'absence de précipitations, et les intensités de pluie exceptionnelles.

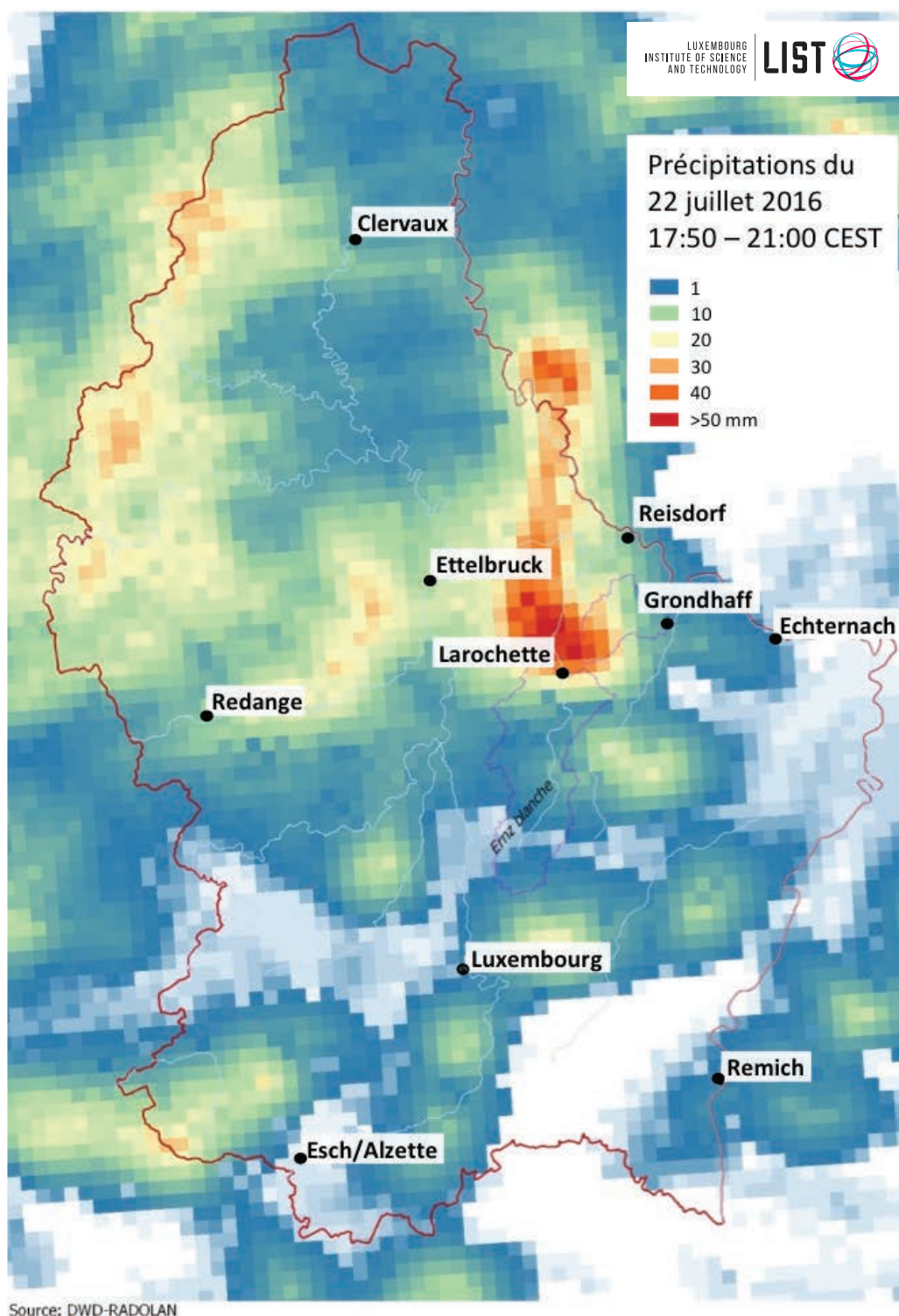


Figure 5 Cumuls pluviométriques horaires mesurés le 22 juillet 2016 [gauche] entre 17h50 et 21h50 (heure d'été), [droite] entre 22h50 et 01h50 (heure d'été), déduites de l'imagerie radar (RADOLAN, DWD). Valeurs non-corrigées.

2.3. Évolution temporelle de l'événement du 22 juillet 2016

Pour le secteur étudié, les enregistrements de pluie propres aux trois stations pluviométriques de Bleesbruck, Bettendorf et Christnach soulignent le caractère à la fois très court et exceptionnellement intense de l'épisode pluviométrique qui a conduit aux inondations catastrophiques dans la région de Larochette. Ainsi, des cumuls pluviométriques de 50 à 70 mm ont été enregistrés en à peine 6 heures.

Étalé pour l'essentiel entre 18h40 (22 juillet 2016) et 0h30 (23 juillet 2016), l'épisode pluvieux a été caractérisé par deux séquences. Les cumuls les plus importants ont été enregistrés au cours de la première phase – comprise entre 18h40 et 20h30 – avec des totaux pluviométriques compris entre 50 et 60 mm dans les trois stations de mesure. Au cours de la deuxième phase, moins violente, des cumuls de 5 à 10 mm ont été observés entre 23h00 et 0h30.

Les intensités les plus élevées ont été relevées dans la station de Christnach, atteignant jusqu'à 20 mm en 10 minutes, au début de l'épisode, vers 19h30 heures. En une heure, près de 64% de la lame d'eau précipitée durant tout l'épisode auront ainsi été mesurés au niveau de cette station.

Entre 19h15 et 19h43 heures, les intensités de pluie mesurées au pas de temps de la minute étaient presque sans interruption comprises entre 1 et 2 mm à la station de Bleesbruck. L'épisode y avait démarré à 19h09 heures et avait duré jusqu'à 19h43 heures – totalisant 38.2 mm (soit 66% de la pluie totale tombée en 6 heures, i.e. 58 mm).

En comparaison avec les intensités pluviométriques mesurées par ailleurs au cours de l'été 2016 au Luxembourg, l'épisode du 22 juillet limité au secteur de Larochette se démarque très nettement – en particulier au niveau des cumuls sur 10, respectivement 60 minutes (Tableau 1).

Tableau 1 Cumuls pluviométriques maximums mesurés sur 10 minutes, 1 heure, 6 heures et 24 heures dans diverses stations au Luxembourg au cours de l'été 2016.

Station	Gestionnaire	Pmax 10 min. [mm]	Date	Pmax 1 heure [mm]	Date	Pmax 6 heures [mm]	Date	Pmax 24 heures [mm]	Date
Bettendorf	ASTA	16.4	22.07 19h00-19h10	43.7	22.07 19h00-20h00	48.7	22-23.07 18h40-00h40	51.5	22-23.07 02h20-02h20
Bleesbreck	AGE	12.7	22.07 19h20-19h30	51.4	22.07 19h14-20h14	58.0	22-23.07 19h06-01h06	70.2	22-23.07 14h48-14h48
Christnach	ASTA	20.3	22.07 19h20-19h30	53.1	22.07 18h50-19h50	70.1	22-23.07 18h30-00h30	71.3	22-23.07 17h50-17h50
Findel	MeteoLux	-	-	30.0	21.07	60.4	21.07	69.6	21.07
Holtz	AGE	11.0	21.07	26.5	22.07	56.0	22.07	66.2	22.07
Reichlange	AGE	17.9	22.07	26.0	18.08	47.6	22.07	60.2	22.07
Roodt	LIST	12.8	22.07	29.0	22.07	59.7	22.07	75.8	22.07
Useldange	ASTA	10.5	04.06	21.3	18.08	52.7	22.07	62.6	22.07

2.4. Analyse fréquentielle de l'événement du 22 juillet 2016

L'estimation du temps de retour d'un cumul de pluie ou d'un débit d'un cours d'eau est réalisée au moyen d'une analyse fréquentielle. Celle-ci est basée sur un modèle fréquentiel qui décrit le comportement statistique de la variable étudiée. Le modèle a vocation à estimer la probabilité d'occurrence d'un événement (p.ex. pluie ou débit) d'une valeur donnée. On peut ainsi associer une période de retour théorique (exprimée en années) à un événement donné (p.ex. une lame de pluie, ou un débit de crue). Le choix du modèle fréquentiel va influencer très largement la validité des estimations réalisées par le biais de l'analyse fréquentielle.

2.4.1. Analyse fréquentielle de l'épisode pluvieux

La représentation cartographique des périodes de retour individuelles de chaque élément raster de l'image radar du maximum d'intensité observé de 19h50 à 20h50 heures – réalisée sur base de l'analyse fréquentielle effectuée pour la station de Bleesbruck – souligne l'extension spatiale très limitée du phénomène météorologique exceptionnel du 22 juillet 2016 (Figure 6). Les périodes de retour les plus importantes (i.e. supérieures à 10 ans) sont situées dans une zone centrée sur l'Ernz Blanche, délimitée par les localités de Larochette et Ermsdorf.

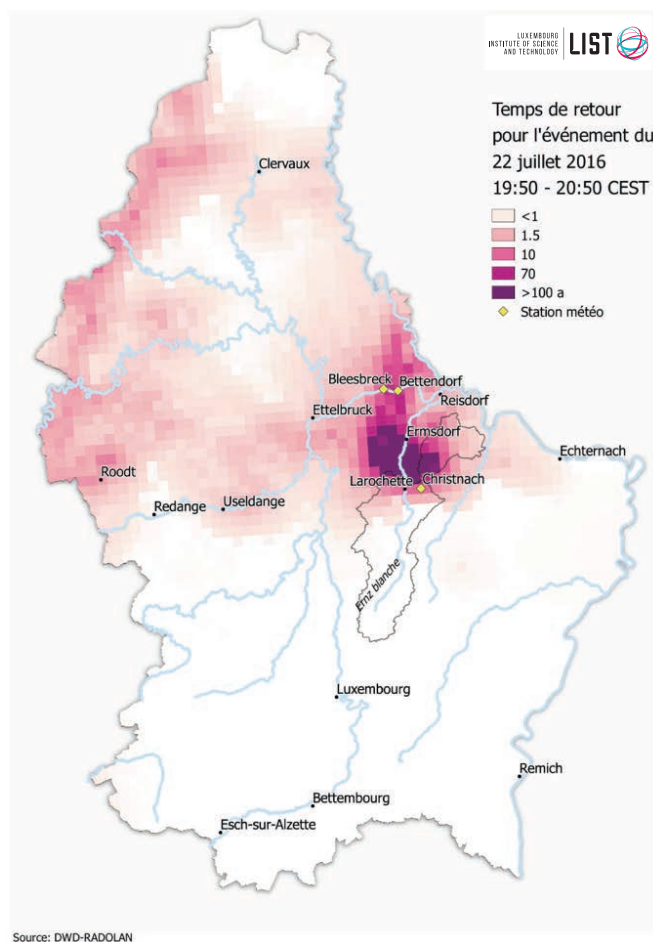


Figure 6 Représentation cartographique de l'analyse fréquentielle des précipitations au moment du pic d'intensité observé le 22 juillet 2016 entre 19h50 et 20h50 heures. La station pluviométrique de Bleesbruck a servi à l'analyse fréquentielle des précipitations. Les cumuls radar ont été multipliés par un facteur 1.5 afin de tenir compte de la sous-estimation systématique. Polygones noirs : limites des bassins-versants de l'Ernz Blanche (amont) et du Hallerbach. Les temps de retour sont exprimés en années.

Dans le cas de l'événement de crue éclair du 22 juillet 2016, l'imagerie radar du secteur concerné suggère très clairement une forte hétérogénéité de l'épisode pluvieux – avec des contrastes importants entre secteurs soumis à des cumuls de pluie exceptionnels et d'autres secteurs ayant subi des cumuls très faibles. Une analyse fréquentielle des pixels de l'image radar cumulative pour la fenêtre de temps de 17h50 à 21h00 CEST souligne la très grande hétérogénéité des apports pluvieux (Figure 5 et Figure 6). Tandis que les parties amont et aval du bassin de l'Ernz Blanche, ainsi que le bassin du Hallerbach, ont subi localement des cumuls de pluie compris entre 75 et 95 mm (en près de trois heures), l'étendue spatiale de ces cumuls maximums a été limitée. Ainsi, en amont de Larochette seuls environ 4% des pixels radar ont été supérieurs à 60 mm de pluie (Figure 7). Sur le secteur compris entre Larochette et Reisdorf (bassin aval de l'Ernz Blanche) près de 45% des pixels radar ont connu des cumuls équivalents ou supérieurs à 60 mm (Figure 7). Toujours en amont de Larochette, la valeur médiane des cumuls de pluie sur l'ensemble de l'image radar était d'environ 2 mm. En aval de Larochette, cette même valeur médiane était de 56 mm. Dans le bassin du Hallerbach, 17% des pixels étaient supérieurs à 60 mm – pour une valeur médiane de 31 mm. Ces chiffres soulignent le caractère très localisé des apports de pluie exceptionnels et susceptibles d'avoir généré des ruissellements de surface (ou de type 'hortonien') – limités aux environs immédiats de Larochette, à la vallée de l'Ernz Blanche entre Larochette et Reisdorf, ainsi qu'à la partie amont du bassin du Hallerbach.

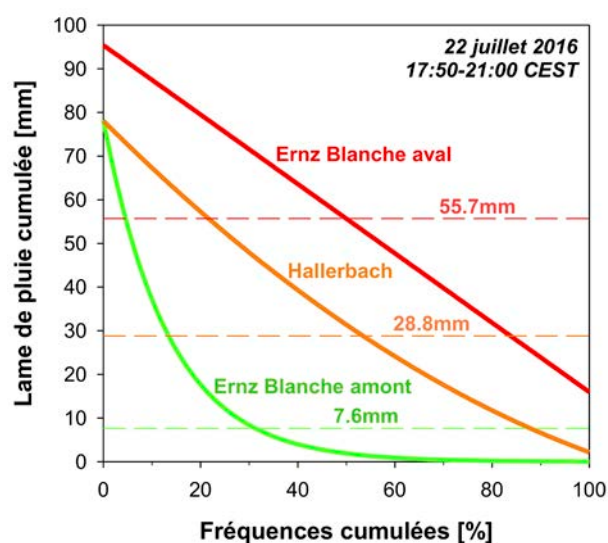


Figure 7 Fréquences cumulées des lames de pluie enregistrées en première phase de l'épisode de pluie du 22 juillet 2016 (17h50 hrs – 21h00 hrs) sur l'ensemble des pixels radar pour les bassins-versants de l'Ernzy Blanche (en amont et aval de Larochette) et du Hallerbach. Lignes horizontales : cumul de pluie moyen sur l'ensemble du bassin-versant. Les cumuls radar ont été multipliés par un facteur 1.5 afin de tenir compte de la sous-estimation systématique.

2.4.2. Analyse fréquentielle des hauteurs d'eau et débits

L'analyse fréquentielle des hauteurs d'eau et/ou débits observés dans les quatre stations de mesure hydrométriques ne peut être que partielle, essentiellement en raison (i) des séries d'observations relativement courtes (11 ans au mieux pour le Hallerbach) et (ii) des courbes de tarage incomplètes (surtout au vu de l'impossibilité technique de réaliser un jaugeage en conditions de crue éclair).

Certaines stations ont également subi des dégâts substantiels durant l'événement et la modification du lit majeur suite à un processus d'érosion important nécessite la reconstruction complète des courbes de tarage.

Avant l'épisode du 22 juillet 2016, le Hallerbach était caractérisé par un régime hydrologique pluvio-évaporal pondéré – avec un rapport entre débit maximal observé et débit minimal observé égal à 120 (classification selon Lambert [1996]). Suite à la crue éclair, ce rapport est désormais de 367 – caractéristique d'un régime hydrologique de type 'excessif'.

L'analyse fréquentielle basée sur la méthode de Gumbel des débits maximums instantanés annuels du Hallerbach souligne le caractère très exceptionnel du phénomène observé le 22 juillet 2016 (Figure 8). Ainsi, avec un débit de pointe de 14.000 l.s^{-1} (limite inférieure de l'intervalle de confiance) la période de retour de l'événement serait au bas mot centennale, voire même très au-delà.

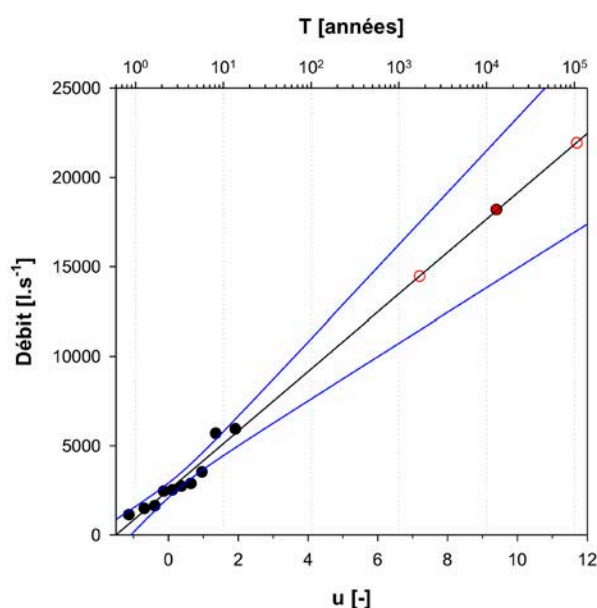


Figure 8 Analyse fréquentielle des débits maximums instantanés annuels observés à la station du Hallerbach entre 2006 et 2016.

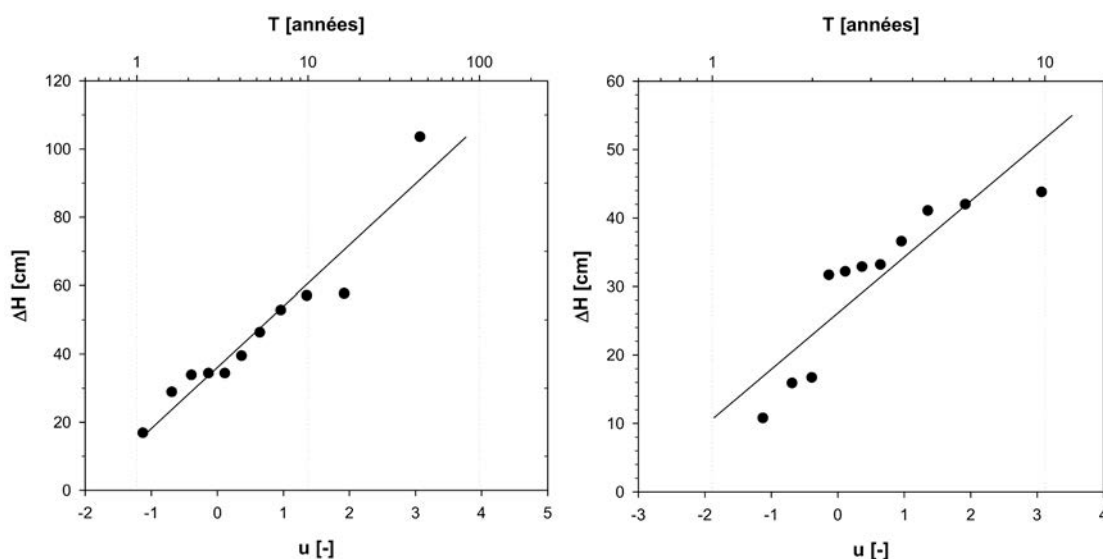


Figure 9 Analyse fréquentielle des variations de hauteur d'eau maximales observées sur l'ensemble d'un événement de crue [gauche] et sur une durée de 15 minutes [droite] à la station du Hallerbach sur la période 2006-2016.

En raison des grandes incertitudes liées à la mesure des débits de pointe et à l'extrapolation conséquente, nous avons eu recours aux hauteurs d'eau maximales observées suite à un épisode de pluie pour chacune des années d'observations entre 2006 et 2016. Entre 2006 et 2015 la montée de crue maximale observée sur un événement isolé était de près de 60 cm sur le Hallerbach. Le 22 juillet 2016, une montée totale de 103.6 cm a été observée, soit près du double. L'analyse fréquentielle basée sur la méthode de Gumbel suggère une période de retour de près de 50 ans pour cet événement (Figure 9 [gauche]).

Sur les montées de crue observées sur 15 minutes, l'événement de 2016 atteint environ 42 cm – équivalant à une période de retour de l'ordre de 10 ans, donc pas exceptionnelle (Figure 9 [droite]). Cependant les laisses de crues à l'amont du pont montrent que la barrière à vaches située juste au droit du pont, côté amont, a eu un effet de barrage. Cette dernière, après avoir été complètement étanchéifiée par les débris charriés, a fonctionné en surverse.

3. LA CRUE ÉCLAIR DU 22 JUILLET 2016 EN RÉSUMÉ

Les intensités de pluie relevées le 22 juillet 2016 ont localement atteint jusqu'à $20 \text{ mm} \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ (Christnach), pour dépasser 50 mm en cumul horaire, voire 70 mm en 6 heures (Tableau 2). Alors que l'intensité de pluie observée à la station de Bleesbruck (seule site de mesure avec une série d'observations pluviométriques suffisamment longue pour réaliser une analyse statistique) sur 10 minutes aurait une période de retour de 8 ans, le cumul horaire aurait une période de retour d'environ 185 ans (valeur très incertaine au vu d'une série d'observations longue de 'seulement' vingt ans). Comprises entre 20.3 et 38.9 mm, les lames de pluie moyennes déterminées pour les bassins-versants de l'Ernz Blanche et du Hallerbach lissent en grande partie la forte hétérogénéité spatiale – et tout particulièrement les intensités de pluie exceptionnelles observées localement – de l'épisode convectif du 22 juillet 2016.

Tableau 2 Cumuls pluviométriques maximums mesurés sur 10 minutes, 1 heure, 6 heures et 24 heures dans diverses stations au Luxembourg au cours de l'été 2016.

Station	Gestionnaire	Pmax 10 min. [mm]	Date	Pmax 1 heure [mm]	Date	Pmax 6 hrs [mm]	Date	Pmax 24 hrs [mm]	Date
Bettendorf	ASTA	16.4	22.07 19h00-19h10	43.7	22.07 19h00-20h00	48.7	22-23.07 18h40-00h40	51.5	22-23.07 02h20-02h20
Bleesbreck	AGE	12.7	22.07 19h20-19h30	51.4	22.07 19h14-20h14	58.0	22-23.07 19h06-01h06	70.2	22-23.07 14h48-14h48
Christnach	ASTA	20.3	22.07 19h20-19h30	53.1	22.07 18h50-19h50	70.1	22-23.07 18h30-00h30	71.3	22-23.07 17h50-17h50
Findel	MeteoLux	-	-	30.0	21.07	60.4	21.07	69.6	21.07
Holtz	AGE	11.0	21.07	26.5	22.07	56.0	22.07	66.2	22.07
Reichlange	AGE	17.9	22.07	26.0	18.08	47.6	22.07	60.2	22.07
Roodt	LIST	12.8	22.07	29.0	22.07	59.7	22.07	75.8	22.07
Useldange	ASTA	10.5	04.06	21.3	18.08	52.7	22.07	62.6	22.07

En réponse à cet épisode météorologique convectif exceptionnel, les hydrosystèmes ont localement généré des ondes de crue considérables (Tableau 3). Les temps de montée de crue observés ont été particulièrement rapides dans les stations hydrométriques étudiées – atteignant à peine 90 minutes sur l'Ernz Blanche à Larochette ou encore le Hallerbach. Bien que les incertitudes inhérentes aux courbes de tarage des stations de l'Ernz Blanche à Larochette et du Hallerbach demeurent considérables, nous avons pu estimer des coefficients d'écoulement compris entre 10 et 27% sur les réseaux hydrographiques étudiés. En plus de l'incertitude des courbes de tarage, il est de mise de considérer la grande difficulté inhérente à l'estimation d'une lame de pluie précipitée sur des superficies de bassins-versants comprises entre 20 et 100 km^2 .

Tableau 3 Caractéristiques hydrologiques de l'épisode de crue du 22 juillet 2016 sur l'Ernz Blanche à Larochette, l'Ernz Blanche à Reisdorf et le Hallerbach.

	Ernz Blanche (Larochette)	Ernz Blanche (Reisdorf)	Hallerbach (Château de Grondhaff)
Série d'observations	2014-2016	2009-2016	2006-2016
Superficie du bassin	70.03 km^2	100.78 km^2	19.4 km^2
Temps de montée depuis le début des précipitations	1:30 hrs	3:00 hrs	1:45 hrs
Temps de montée de l'hydrogramme	1:30 hrs	1:30 hrs	1:00 heure
Montée maximale (en 15')	63.3 cm	108.9 cm	42.0 cm
Montée totale	175.9 cm	293.9 cm	103.6 cm
Débit maximal instantané	$14.81 - 18.02 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	-	$14.46 - 21.93 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Débit spécifique max.	$0.21 - 0.26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$	-	$0.74 - 1.13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$

Bien que considérables dans le contexte local, les débits spécifiques estimés (jusqu'à $1.13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) restent encore modérés au vu des estimations débitométriques réalisées par ailleurs en France ou en Allemagne lors d'épisodes de crues éclair (débits spécifiques rapportés jusqu'à $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). L'analyse fréquentielle de la montée de crue maximale observée sur le Hallerbach lors de l'épisode du 22 juillet 2016 suggère une période de retour de près de 50 ans pour cet événement. La montée de crue maximale observée sur 15 minutes n'aurait par contre pas été exceptionnelle, avec une période de retour de 'seulement' 10 ans.

4. MISE EN PERSPECTIVE DE L'ÉVÉNEMENT DU 22 JUILLET 2016

Malgré des incertitudes inhérentes aux mesures de précipitations et débits de pointe au cours d'événements hydro-météorologiques extrêmes, il est néanmoins possible de placer les données observées dans la région de Larochette le 22 juillet 2016 dans un contexte plus large.

Ainsi, les relevés pluviométriques et débitmétriques enregistrés dans des bassins-versants autour du Mont Lozère (F), du Gard et du Vidourle (F), ou encore du Braunsbach (D) et du Hupsel brook (NL) au cours des trois décennies écoulées caractérisent les pluies et crues éclair comme événements hydro-météorologiques exceptionnels à de multiples égards (Tableau 4). D'abord, les cumuls de pluie observés sur 1 à 2 journées ont atteints, voire dépassés, 400 mm – avec des pointes d'intensités de pluie atteignant jusqu'à 144 mm.h⁻¹ (22 septembre 1992 dans la région du Mont Lozère).

Tableau 4 Caractéristiques pluviométriques et débitmétriques d'épisodes de crues éclair. Valeurs marquées [*] correspondent à des cumuls de pluie spatialisées sur tout le bassin-versant.

Date	Lieu	Cumuls de pluie	Intensité de pluie max.	Durée	Débit de pointe spécifique
6-8 nov. 1982	Mont Lozère (F)	> 400 mm		24 hrs	
30 juil. 1982	Mont Lozère (F)		78 mm.h ⁻¹	30 min.	
18 juil. 1985	Mont Lozère (F)		90 mm.h ⁻¹	30 min.	1.3-1.5 m ³ .s ⁻¹ .km ⁻²
23 août 1985	Mont Lozère (F)	110 mm		7 hrs	
13-15 nov. 1986	Mont Lozère (F)	389 mm		48 hrs	
10 oct. 1987	Mont Lozère (F)	36 mm		6 hrs	2 m ³ .s ⁻¹ .km ⁻²
22 sept. 1992	Mont Lozère (F)		144 mm.h ⁻¹	30 min.	7.5 m ³ .s ⁻¹ .km ⁻²
8-9 sept. 2002	Gard & Vidourle (F)	600-700 mm		24 hrs	5-10 (20 localement) m ³ .s ⁻¹ .km ⁻²
26 août 2010	Hupsel brook (NL)	160 mm	111 mm.7hrs ⁻¹	24 hrs	0.77 m ³ .s ⁻¹ .km ⁻²
29 mai 2016	Orlacher Bach (Braunsbach, D)	100-140 mm	~100 mm.h ⁻¹	75 min.	8-25 m ³ .s ⁻¹ .km ⁻²
22 juillet 2016	Ernz Blanche (Larochette)	20.3 mm*	122 mm.h ⁻¹	4 hrs	0.14-0.18 m ³ .s ⁻¹ .km ⁻²
22 juillet 2016	Hallerbach	38.9 mm*			0.74-1.13 m ³ .s ⁻¹ .km ⁻²

La réponse hydrologique à ces épisodes de pluie particulièrement intenses s'est traduite par des débits spécifiques compris entre 1 et 10 m³.s⁻¹.km⁻², voire localement 20 m³.s⁻¹.km⁻² (Tableau 4). Les coefficients d'écoulement observés lors de ces événements ont fréquemment été supérieurs à 0.7. Selon Cosandey [1994] ces rendements sont néanmoins très variables en fonction de l'état de saturation préalable des sols, de l'intensité maximale des précipitations et de leur étendue spatiale.

Les intensités de pluie maximales observées dans la région de Larochette au cours de l'épisode du 22 juillet 2016 sont comparables à celles observées dans d'autres hydrosystèmes au cours de crues éclair. Ainsi, à la station de Christnach des intensités de pluie d'environ 120 mm.h⁻¹ sont largement comparables à celles qui ont pu générer des crues éclair par le passé dans les bassins-versants de la région du Mont Lozère (F), sur les réseaux hydrographiques du Gard et du Vidourle (F), ou encore dans le bassin-versant du Orlacher Bach (D) (Tableau 4). Pour l'épisode de crue éclair observé dans le bassin du Orlacher Bach (près de Braunsbach), il est à noter que Bronstert et al. [2017] suggèrent l'augmentation de l'intensité des épisodes convectifs extrêmes [Molnar et al., 2015] – sous l'impulsion du changement climatique – comme étant une des principales causes de la genèse de ce type d'événement hydrologique exceptionnel.



Figure 10 [Haut] Traces de ruissellement de surface 'hortonien' et [bas] traces d'écoulement de subsurface dans la région de Larochette suite à la crue éclair du 22 juillet 2016.

Les rendements hydrologiques de l'épisode du 22 juillet 2016 dans les bassins de l'Ernz Blanche et du Hallerbach sont néanmoins faibles (~10% et 22-27%, respectivement), comparés aux valeurs reportées par Cosandey [1994] ou encore Bronstert et al. [2017]. Pour un bassin-versant expérimental de 6.5 km² situé aux Pays-Bas, Brauer et al. [2011] ont rapporté un rendement intermédiaire de 50% (pour un cumul de pluie de 160 mm sur 24 heures, dont la période de retour a été estimée largement au-delà de 1000 ans).

Tableau 5 Intensité horaire de la pluie enregistrée à Christnach le 22 juillet 2016.

Heure	Intensité de la pluie [mm.h ⁻¹]
19h40	8.4
19h50	21.6
20h00	15
20h10	43.8
20h20	62.4
20h30	121.8
20h40	39.6
20h50	36

Du ruissellement de type hortonien a été généré durant l'épisode du 22 juillet 2016, entraînant *in fine* localement des phénomènes d'érosion considérables sur les versants et plateaux dans la zone touchée (Figure 10). L'apparition de ce phénomène très rare – de surcroît dans nos contrées – peut avoir de multiples causes : [1] des intensités de pluie supérieures à la capacité d'infiltration des sols, [2] des pentes fortes, [3] des horizons de saturation intermédiaires. En prenant comme référence des taux d'infiltration de 30 mm.h⁻¹ pour un sol sableux [source : FAO], les

intensités de pluie mesurées à la station de Christnach auraient ainsi été supérieures à la capacité d'infiltration des sols pendant près de 50 minutes (Tableau 5). La lame de pluie cumulée sur ce laps de temps est d'environ 51 mm. Ces propos sont à nuancer par le fait que Wrede et al. [2015] ont reporté pour des sols sableux du Grès de Luxembourg dans le Huewelerbach (vallée de l'Attert) des taux d'infiltration largement supérieurs ($\sim 1200 \text{ cm.j}^{-1}$). Mais ces sols étaient forestiers et purement sableux, profonds ($> 5 \text{ m}$) et ne comportaient pas d'horizon de limitation d'infiltration (cf. descriptif des sols en section 2). Nous ne disposons pas de données locales d'humidité du sol pour la région de Larochette.

Au vu de l'hétérogénéité qui est propre aux caractéristiques physiogéographiques du secteur étudié, en plus du caractère très local de l'épisode convectif étudié (et bien inférieur à la superficie des bassins-versants étudiés – Figure 4 & Figure 5), il est très probable que le phénomène de ruissellement hortonien soit resté restreint à des secteurs bien délimités – largement documentés par ailleurs au moyen des cartes et photographies. Le caractère très ponctuel du ruissellement de type hortonien expliquerait également les coefficients de ruissellement finalement assez modérés de l'épisode de juillet 2016 (27% au maximum) – car calculés pour des bassins-versants entiers et non pas pour des secteurs isolés, où le rendement a pu être significativement plus élevé. De plus, les temps de montée au pic de crue depuis le début des précipitations ont été relativement longs – laissant supposer une infiltration importante des eaux de pluie au début de l'épisode dans les zones le permettant.

Gaume [2002] a observé des temps de réaction relativement longs pour des épisodes de crue éclair – *a priori* largement imputables à des capacités d'infiltration encore élevées en début de phénomène. Dans le cas spécifique des crues éclair, la genèse des écoulements par saturation des sols constituerait ainsi un mécanisme dominant par rapport aux mécanismes d'écoulement de surface (dit 'hortonien').

Une implication majeure de ce constat serait le fait que la réponse hydrologique des bassins-versants touchés par des pluies exceptionnelles (au vu des cumuls et intensités observés) est fortement non-linéaire. Dans un premier temps, l'infiltration domine et contribue à des coefficients d'écoulement faibles. Dans un deuxième temps, ce coefficient va augmenter très rapidement (pour en principe pouvoir atteindre 100%). Selon Gaume [2002] cette non-linéarité serait à l'origine de la grande variabilité spatiale des écoulements observés lors de crues éclair – caractéristique également observée lors de l'épisode du 22 juillet dans la région de Larochette. Une autre implication directe concernerait l'application des lois de probabilités des débits de pointe de crue, avec les approches conventionnelles (p.ex. Gumbel) se révélant très probablement fortement sensibles à cette non-linéarité dans les réponses hydrologiques propres aux crues éclair.

Il convient de noter que ces interprétations sont fondées sur les données disponibles pour les bassins de l'Ernz Blanche et du Hallerbach – seuls hydrosystèmes pour lesquels nous disposons de mesures débitmétriques (bien que largement incertaines pour les hauteurs d'eau du pic de crue).

5. DÉFIS LIÉS AU CHANGEMENT GLOBAL – GESTION DES HYDROSYSTÈMES SOUMIS AU CHANGEMENT GLOBAL

De par leur nature, les systèmes hydrologiques sont continuellement soumis à des changements (p.ex. succession des saisons météorologiques, fluctuations climatiques à l'échelle décennale) [Montanari et al., 2013]. Cette variabilité détermine la grande diversité qui caractérise les bassins-versants, de même que leur qualité intrinsèque de systèmes changeants. Celle-ci rend la gestion d'événements extrêmes (type crue éclair) avec des mesures structurales techniques d'autant plus difficile – p.ex. le choix de l'implantation d'ouvrages de rétention étant très aléatoire en raison des difficultés inhérentes à la prévision de l'endroit exact et des intensités de pluie maximales pendant un épisode convectif.

Au vu du caractère exceptionnel du phénomène des crues éclair, le maintien du réseau d'observation hydrologique et météorologique actuel doit rester une priorité absolue. Ce dernier fournit en effet les données de base qui serviront – d'ici quelques décennies – à améliorer de manière inégale les analyses fréquentielles portant sur les précipitations et débits extrêmes. En attendant, l'identification de zones propices à générer les crues éclairs, respectivement de zones particulièrement exposées à ce type d'événement, doit constituer une priorité. L'élaboration de cartes identifiant ce type de 'hot spots' permettra ainsi d'améliorer le ciblage de certaines mesures visant à réduire autant que possible le phénomène du ruissellement de surface (type 'hortonien') par la réduction de l'imperméabilisation des sols, la promotion de toitures vertes, l'utilisation de dalles gazon béton sur les parkings, etc.

Tandis que la variabilité naturelle des hydrosystèmes continue à constituer une difficulté majeure pour les gestionnaires des ressources en eau, nous sommes confrontés à un autre défi encore plus important – celui de la

prévision et de la prédiction de signaux hydrologiques extrêmes en réponse à des forçages anthropiques grandissants (p.ex. changement climatique, modification de l'utilisation du sol). Le réseau d'observation hydro-météorologique actuel n'est pas adapté au suivi des ondes de crue de type 'éclair'. Outre le maintien du réseau actuel – voire son extension – l'exploration de nouvelles technologies et stratégies d'observations de crues éclair (p.ex. capteurs hydro-météorologiques connectés par LPWAN, tels que préconisés dans le projet de recherche PPP FLASHFLOOD cofinancé par le Fonds National de la Recherche) devrait permettre une meilleure compréhension mécanistique du phénomène. Combinée à une meilleure résolution spatiale et temporelle des données d'entrée utilisées par les modèles de prévision, celles-ci devrait aboutir *in fine* à une amélioration progressive des systèmes de préalerte de ce type d'événements extrêmes. Ainsi, ces nouveaux outils viendront compléter les progrès réalisés dans le cadre de la directive européenne sur l'évaluation et la gestion des risques d'inondation – dont l'atlas des précipitations extrêmes, actuellement en préparation, est un élément clé.

Références bibliographiques

- Brauer C., Teuling A.J., Overeem A., van der Velde Y., Hazenberg P., Warmerdam P.M.M., Uijlenhoet R., 2011. Anatomy of extraordinary rainfall and flash flood in a Dutch lowland catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* 15: 1991-2005. DOI: 10.5194/hess-15-1991-2011
- Bronstert A., Agarwal A., Boessenkool B., Fischer M., Heistermann M., Köhn-Reich L., Moran T., Wendi D., 2017. Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“. Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung* 61: 150-162. doi: 10.5675/HyWa_2017,3_1
- Cosandey C., 1994. Formation des crues «cévenoles» dans des bassins élémentaires du Mont Lozère. *Journal of Water Science* 74: 377–393. doi: 10.7202/705207ar
- Douinot A., Roux H., Garambois P.-A., Larnier K., Labat D., Dartus D., 2016. Accounting for rainfall systematic spatial variability in flash flood forecasting. *Journal of Hydrology* 541: 359-370. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.08.024
- Gaume E., 2002. Eléments d'analyse sur les crues éclair. Thèse de doctorat, ENGREF AgroParisTech. 359 p.
- Lambert R., 1996. Géographie du cycle de l'eau. Presses Universitaires du Mirail. 430 pages.
- Le Lay M., Saulnier G.M., 2007. Exploring the signature of climate and landscape spatial variabilities in flash flood events: Case of the 8–9 September 2002 Cévennes-Vivarais catastrophic event. *Geophysical Research Letters* 34: L13401. doi:10.1029/2007GL029746
- Molnar P., Fatichi S., Gaál L., Szolgay J., Burlando P., 2015. Storm type effects on super Clausius–Clapeyron scaling of intense rainstorm properties with air temperature. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 1753-1766. doi:10.5194/hess-19-1753-2015
- Montanari A., Young G., Savenije H.H.G., Hughes D., Wagener T., Ren L.L., Koutsoyiannis D., Cudennec C., Toth E., Grimaldi S., Blöschl G., Sivapalan M., Beven K., Gupta H., Hipsey M., Schaefli B., Arheimer B., Boegh E., Schymanski S.J., Di Baldassarre G., Yu B., Hubert P., Huang Y., Schumann A., Post D.A., Srinivasan V., Harman C., Thompson S., Rogger M., Viglione A., McMillan H., Characklis G., Pang Z., Belyaev V., 2013. "Panta Rhei-Everything Flows": Change in hydrology and society—The IAHS Scientific Decade 2013–2022. *Hydrological Sciences Journal* 58: 1256-1275. doi:10.1080/02626667.2013.809088
- White A.B., Anderson M.L., Dettinger M.D., Ralph F.M., Hinojosa A., Cayan D.R., Hartman R.K., Reynolds D.W., Johnson L.E., Schneider T.L., Cifelli R., Toth Z., Gutman S.I., King C.W., Gehrke F., Johnston P.E., Walls C., Mann D., Gottas D.J., Coleman T., 2013. A twenty-first-century California observing network for monitoring extreme weather events. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 30: 1585-1603. doi:10.1175/JTECH-D-12-00217.1
- Wrede S., Fenicia F., Martínez-Carreras N., Juilleret J., Hissler C., Krein A., Savenije H.H.G., Uhlenbrook S., Kavetski D., Pfister L., 2015. Towards more systematic perceptual model development: A case study using 3 Luxembourgish catchments. *Hydrological Processes* 29: 2731–2750. doi: 10.1002/hyp.10393.

IMPRESSUM

Ce rapport a été réalisé par les chercheurs du Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST), en collaboration avec et pour le compte de l'Administration de la gestion de l'eau (AGE).

Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST)

Laurent Pfister [coordination]

Olivier Faber

Renaud Hostache

Jean François Iffly

Patrick Matgen

Frank Minette

Ivonne Trebs

Contact LIST

Département "Environmental Research and Innovation"

41, rue du Brill

L-4408 Belvaux

Luxembourg

Administration de la gestion de l'eau (AGE)

Christine Bastian

Daniel Göhlhausen

Claude Meisch

Noémie Patz

Contact AGE

1, Avenue du Rock'n'Roll

L-4361 Esch-sur-Alzette

Luxembourg