

# CRUES SUBITES 2018

Étude mécanistique et fréquentielle des  
crues subites de 2018 au Luxembourg

En collaboration avec



LE GOUVERNEMENT  
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG  
Ministère de l'Environnement, du Climat  
et du Développement durable

Administration de la gestion de l'eau



# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>2</b>
1.1. Crues subites : définitions, propriétés et origines	2
1.1.1. Définitions	2
1.1.2. Propriétés et origines du phénomène de crues subites	2
1.2. Le phénomène des crues subites en Europe	3
1.3. Dégâts occasionnés par les crues subites en 2018	4
<b>2. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES</b>	<b>5</b>
2.1. Conditions générales	5
2.2. Les conditions météorologiques entre fin mai et mi-juin 2018	6
2.3. Les apports pluviométriques de mai à juin 2018	7
<b>3. DESCRIPTION DES CRUES DE 2018</b>	<b>9</b>
3.1. L'événement du 31 mai au 1 <sup>er</sup> juin 2018	9
3.2. L'événement du 9 au 10 juin 2018	10
3.3. Analyse fréquentielle des crues subites de 2018	11
3.3.1. Analyse fréquentielle des précipitations	11
3.3.1.1. Variabilité spatiale des cumuls pluviométriques journaliers maximums	11
3.3.1.2. Analyse statistique intensité-durée-fréquence (IDF)	12
3.3.2. Analyse fréquentielle des relevés hydrométriques	13
<b>4. MODÈLE PERCEPTUEL DES CRUES SUBITES</b>	<b>15</b>
<b>5. DISCUSSION ET CONCLUSION</b>	<b>16</b>
<b>LITTÉRATURE</b>	<b>18</b>
<b>GLOSSAIRE</b>	<b>20</b>

---

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Crues subites: définitions, propriétés et origines

#### 1.1.1. Définitions

Le phénomène des crues subites a été défini à de multiples reprises selon divers critères. Depuis 1974, les crues subites sont définies par l'AISH-UNESCO-WMO [Defrance et al., 2014] comme 'des crues dont l'apparition est soudaine, souvent difficilement prévisible, de temps de montée rapide et de débit spécifique relativement important. Ces crues éclair sont donc généralement liées à des épisodes pluvieux intenses et se manifestent souvent sur des bassins de taille modérée.'

Le National Weather Service des Etats-Unis [Gourley et al., 2011] conçoit les crues subites comme 'un débit rapide et extrême de hautes eaux dans une région normalement sèche, ou une augmentation rapide du niveau de l'eau dans un torrent ou un ruisseau supérieur à un niveau de crue prédéterminé commençant dans les 6 heures suivant l'événement déclencheur (pluies intenses, rupture de digue ou de barrage, embâcle de glace).'

En France [Ministère de l'Écologie, 2011], le SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations, France) définit ce phénomène comme 'des crues survenant sur des bassins versants dont le temps de réponse se situe entre 2 heures (délai en deçà duquel seuls des dispositifs locaux très spécifiques permettent une anticipation) et une demi-douzaine d'heures (délai au-delà duquel on entre dans le champ de la prévision des crues classique)'. D'après Douinot [2016], la caractérisation chiffrée de cette définition dépend de la zone géographique d'étude. En Europe, les crues subites observées sont majoritairement la conséquence de cumuls de précipitations dépassant **100 mm en quelques heures** [Gaume et al., 2009]. Les bassins versants concernés ont des superficies de l'ordre du **km<sup>2</sup> à quelques centaines de km<sup>2</sup>**.

#### 1.1.2. Propriétés et origines du phénomène de crues subites

Les précipitations susceptibles de générer des crues subites dépassent en règle générale des cumuls de 100 mm (ou litres par mètre carré) en quelques heures. Ces épisodes de pluie extrêmes sont typiquement liés à des événements dits 'convectifs', à extension spatiale très limitée, voire de méso-échelle. Parfois qualifiés de 'paroxystiques', ces événements sont caractérisés par des quantités de pluie sans commune mesure – notamment sous le climat méditerranéen, où les cumuls de pluie extrêmes mesurés en 24 heures ont pu atteindre jusqu'à 600 mm, voire plus. Pour la France métropolitaine, Météo-France utilise les critères suivants pour classer les intensités de pluie :

Pluie faible continue	1 à 3 mm par heure
Pluie modérée	4 à 7 mm par heure
Pluie forte	8 mm par heure et plus

Sources : <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/phenomenes-meteo/les-pluies-intenses>  
<http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Intensite-de-precipitations>

Par ailleurs, Météo-France préconise à l'échelle journalière les seuils suivants pour des précipitations intenses : 50 mm en 24 heures en plaine et 100 mm en 24 heures en montagne.

En Allemagne, le DWD (Deutscher Wetterdienst) utilise des seuils de caractérisation des intensités de pluie plus élevés :

Pluie intense (Starkregen)	15 à 25 mm en 1 heure 20 à 35 mm en 6 heures
Pluie très intense (Heftiger Starkregen)	25 à 40 mm en 1 heure 35 à 60 mm en 6 heures
Pluie extrême (Extrem heftiger Starkregen)	> 40 mm en 1 heure > 60 mm en 6 heures

Source : [https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen\\_aktuell/kriterien/warnkriterien](https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien)

Au Luxembourg, Meteolux préconise les seuils d'alerte suivants :

Avis de pluies fortes	31-45 l/mm <sup>2</sup> en 6 heures 41-60 l/mm <sup>2</sup> en 12 heures 51-80 l/mm <sup>2</sup> en 24 heures
Avis de pluies torrentielles	> 45 l/mm <sup>2</sup> en 6 heures > 60 l/mm <sup>2</sup> en 12 heures > 80 l/mm <sup>2</sup> en 24 heures

Source : [www.meteolux.lu/fr/vigilances/dangers-meteorologiques](http://www.meteolux.lu/fr/vigilances/dangers-meteorologiques)

Le cas échéant, la **topographie** peut influencer considérablement la réponse hydrologique; des bassins-versants aux fortes pentes, caractérisés par un taux de relief pouvant atteindre 0.1 (coefficient obtenu à l'aide de la différence entre l'altitude maximum et minimum du bassin divisé par la longueur du chenal, d'après Marchi et al., [2010]) offrent une énergie potentielle importante, tout comme ils contribuent à diminuer l'infiltration [Morbidelli et al., 2016]. Par ailleurs, les bassins-versants fortement chenalés tendent également à favoriser les phénomènes de type crue subite [Acosta-Coll et al., 2018].

Les **conditions antécédentes d'humidité du sol**, respectivement le niveau de stockage de l'eau dans le système bassin-versant, influent fortement sur la réponse hydrologique. La saturation des hydrosystèmes peut être générée soit :

- (i) par des précipitations à faible intensité mais continues sur une longue période, saturant progressivement les horizons supérieurs des sols et/ou entraînant une remontée progressive des eaux de nappe (saturation excess overland flow),
- (ii) par des précipitations très intenses mais à courte durée (et faible extension spatiale), dépassant de loin la capacité d'infiltration des sols (infiltration excess overland flow) [Smith & Goodrich, 2005].

En cas de crues subites, c'est avant tout ce deuxième type de processus qui domine. Souvent, l'écoulement de surface qui se développe suite à une saturation des horizons supérieurs des sols est également qualifié d'écoulement 'hortonien' ou 'hortonian overland flow' [Horton, 1933].

## 1.2. Le phénomène des crues subites en Europe

La description et l'étude des événements de crues subites sur le continent européen ont concerné jusqu'à récemment en majorité l'Europe méridionale (i.e. pourtour méditerranéen et région des Alpes et des Carpathes). Une recherche bibliographique (SCOPUS, critères de recherche TI=(flashflood) OR TI=(flash AND flood)) relatant le nombre d'études (publiées sur les 30 dernières années) ayant trait aux crues subites, révèle que l'Europe méridionale (115 études) est beaucoup plus fortement exposée que l'Europe septentrionale (24 études) à ces phénomènes extrêmes (Figure 1). Un trait commun à ces deux zones géographiques – aux climats très différents par ailleurs – est que le nombre d'études sur les crues subites a très fortement augmenté à partir de 2000 pour l'Europe méridionale et à partir de 2010 pour l'Europe septentrionale. Dans un rayon de quelques centaines de km autour du Luxembourg, on dénombre notamment quelques études récentes d'événements de type crue subite :

29/05/2008	Liège, Belgique [Van Campenhout et al., 2015]
02/06/2008	bassin du Starzel, Germany, [Ruiz-Villanueva et al., 2012]
26/08/2010	bassin du Hupsel Beek, Pays-Bas, 120 mm en 24h [Brauer et al., 2011]
02/06/2013	bassins-versants dans le sud-est de l'Allemagne [Raynaud et al., 2015]
29/05/2016 & 09/06/2016	Braunsbach, Allemagne [Piper et al., 2016; Bronstert et al., 2017]
22/07/2016	bassins-versants de l'Ernz Blanche et du Hallerbach [Pfister et al., 2018]

De cet inventaire ressort que les études ayant ciblé les crues subites se concentrent en majeure partie sur le pourtour méditerranéen, tandis que relativement peu de connaissances spécifiques sont disponibles pour la Grande Région et le Luxembourg en particulier.

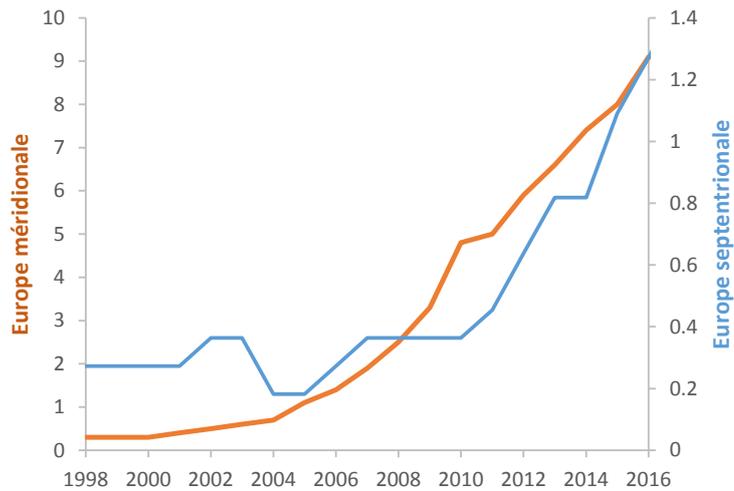


Figure 1

Nombre d'études sur les crues subites par année de publication entre 1998 et 2016 pour l'Europe septentrionale [ligne bleue] et l'Europe méridionale [ligne orange] (recherche via SCOPUS). Calcul : moyenne mobile décennale.

### 1.3. Dégâts occasionnés par les crues subites en 2018

Suite aux intempéries survenues entre le 31 mai et le 1<sup>er</sup> juin 2018, la Cellule de crise du Plan d'intervention d'urgence 'intempéries' s'est réunie à deux reprises endéans 24 heures. Plus d'une centaine d'interventions ont été assurées par près de 150 personnes (comprenant entre autres les corps de secours et d'incendie, l'armée, les groupes hommes grenouilles, logistique, ravitaillement et support psychologique). Dans le secteur de Larochette, de nombreux ruisseaux se sont ainsi transformés en torrents en l'espace de quelques minutes, comme par exemple le Bëlleger Baach, le Kaasselbaach, ou encore le Halerbaach. Des dégâts considérables ont également été occasionnés lors d'un épisode de pluies diluviennes, survenu en début d'après-midi du 1<sup>er</sup> juin 2018 dans le sud-est du pays à hauteur de la localité de Greiveldange. Entre le 31 mai et le 1<sup>er</sup> juin 2018, dix-neuf personnes piégées par les eaux ont ainsi dû être secourues.



Photo 1

Eboulements et destruction de la route CR 364 Vogelsmühle - Berdorf après les crues subites de juin 2018. Source : LIST.

En corollaire, et directement lié aux pluies diluviennes (notamment via l'infiltration rapide de l'eau et de contaminants potentiels via des chemins d'écoulement préférentiels), de nombreuses restrictions autour de l'utilisation de l'eau potable ont été imposées après analyses de la qualité des eaux par l'Administration de la gestion de l'eau. Par exemple, l'eau potable ne pouvait être utilisée qu'après avoir été bouillie pendant 10 minutes au minimum dans les communes de Waldbillig, Berdorf et Beaufort, ou encore dans les localités de Dillingen et Bech.

La Cellule de crise du Plan d'intervention d'urgence 'intempéries' a dû se réunir une deuxième fois en raison de nouvelles intempéries survenues le 9 juin 2018. Près de 500 appels d'urgence ont dû être traités entre 19:00 et 22:00 heures, débouchant sur plus de 200 interventions à travers tout le pays. Deux secteurs ont été particulièrement touchés : l'Est du pays, avec notamment le Mullerthal, Haller et Walbillig, puis en un deuxième temps également le centre du pays – avec des interventions concentrées sur les communes de Préizerdaul, Useldange, Bissen, Redange et la Ville de Luxembourg. Dans la localité de Bissen, les ruisseaux 'Viichtbaach', 'Huelbaach' et 'Kuedelacher Baach' se sont transformés en torrents endéans quelques minutes – inondant 33 maisons.



**Photo 2**

Dégâts occasionnés sur le CR 128 / OA 908 / Haller après les crues subites de juin 2018. Source : LIST.

Outre des chantiers de reconstruction conséquents sur divers tronçons de routes et des ponts, l'Administration de la nature et des forêts a contribué à la construction de 24 gués et 43 passerelles, la stabilisation de berges, l'implémentation de drains et rigoles, etc. L'Administration de la gestion de l'eau a contribué à déblayer près de 16.000 tonnes de boue, débris et sédiments, environ 500 m<sup>3</sup> de troncs d'arbres, ainsi que 5 tonnes de déchets divers provenant notamment des campings touchés par les intempéries. Ces interventions ont coûté à elles seules près de 6 millions d'euros, venant se rajouter aux plus de 11 millions d'euros de coûts de réparation des infrastructures routières.

## 2. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

### 2.1. Considérations générales

Les épisodes de pluie susceptibles de générer des crues subites sont communément associés avec des cellules dites 'convectives'. Celles-ci sont déterminées par l'humidité de l'air (élevée), l'instabilité de l'atmosphère, ainsi que des mécanismes d'élévation des masses d'air [Doswell et al., 1996]. Les masses d'air chaudes peuvent contenir des quantités de vapeur d'eau considérables. Au vu de la durée de vie très limitée d'une cellule orageuse extra-tropicale, on peut considérer que la vapeur d'eau est déjà présente dans la masse d'air quand la cellule se forme. Toutefois, de l'humidité additionnelle provenant d'une zone trois à cinq fois plus large que la cellule orageuse en elle-même peut intégrer le système et être soulevée en hauteur [Trenberth et al., 2003].

Des épisodes de pluie très intenses pouvant conduire à des crues subites sont couramment associés à des systèmes convectifs qui n'avancent que très lentement, voire des suites de cellules convectives qui passent au-dessus d'un même endroit [Doswell et al., 1996]. Des conditions de blocage atmosphérique peuvent être à l'origine de la stationnarité d'une cellule et conduire *in fine* à une intensification d'événements convectifs (p.ex. soulèvements de la masse d'air induits par les conditions topographiques locales) [Trenberth et al., 2003].

### 2.2. Les conditions météorologiques entre fin mai et mi-juin 2018

Dans un contexte synoptique favorable, marqué par un système convectif à méso-échelle remonté depuis l'Allemagne via le sud-est, une cellule convective profonde s'est développée sur le centre et l'est du Luxembourg. Début juin 2018, celle-ci a généré des précipitations localement très intenses [Mathias, 2019].

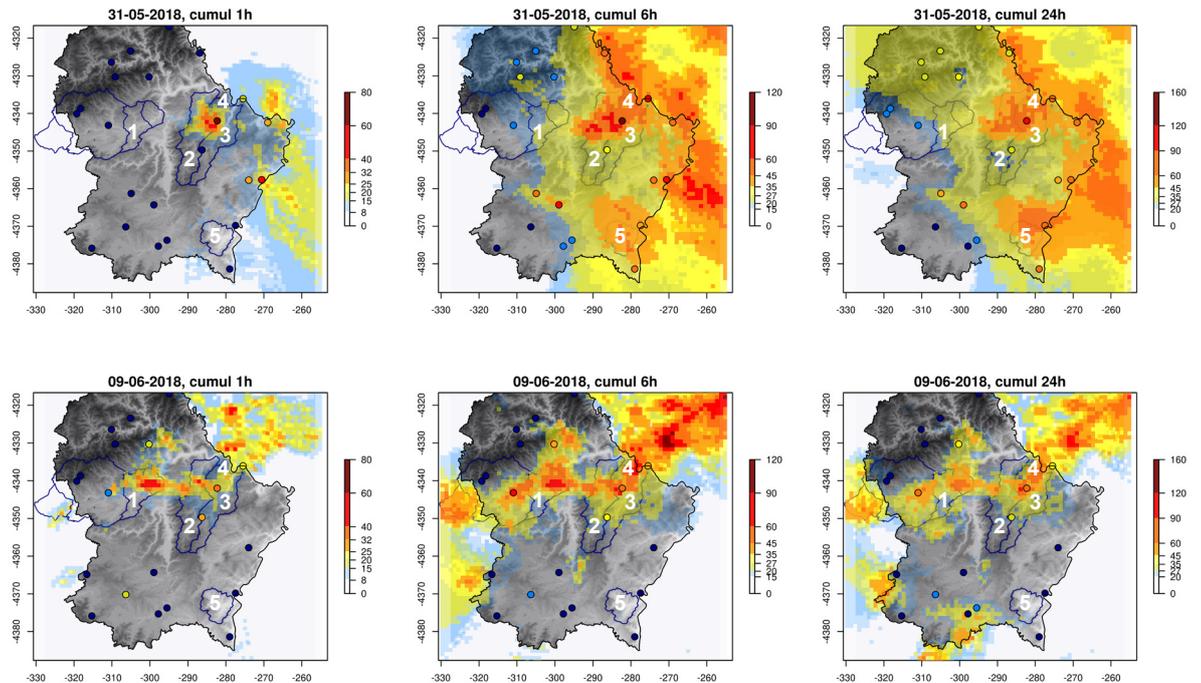
L'analyse à méso-échelle indique une convection profonde active sur le sud de l'Allemagne au cours de l'après-midi du 31 mai 2018. Avec l'approche depuis le sud-est en début de soirée d'un système convectif à méso-échelle (MCS) sur la Grande Région, des petites cellules convectives se sont formées vers 22:00 heures, pour se dissiper rapidement par la suite. Vers 23:00 heures UTC une cellule convective plus forte est apparue au-dessus de l'agglomération de Mersch, à l'ouest de la région du Mullerthal. Cette cellule a ensuite migré progressivement vers l'est et a fusionné avec une autre cellule vers 23:00 heures UTC. Dans la foulée cette cellule a été intégrée dans un champ de précipitations plus large appartenant au MCS en progression vers le nord-ouest. Tout en continuant à se renforcer, la cellule convective s'est trouvée localisée entre Mullerthal et Ermsdorf. Un noyau de précipitations particulièrement intenses est resté quasiment stationnaire dans ce secteur jusqu'à 00:30 heures UTC.

En parallèle, un élément convectif profond – intégré dans le MCS – s'est approché du Mullerthal depuis l'est. Ce segment a progressivement fusionné avec la cellule quasi stationnaire, occasionnant un léger déplacement des précipitations les plus intenses vers le nord du Mullerthal. Après 01:15 heures UTC, les intensités de précipitations ont entamé une baisse progressive sur le secteur. Le MCS a ainsi continué à progressivement traverser le Luxembourg et avancer en direction de la Belgique. Des précipitations plus légères ont continué à tomber sur le Mullerthal jusqu'en matinée du 1<sup>er</sup> juin 2018.

Les faibles différences de champs de pression se sont maintenues dans la première moitié du mois de juin 2018, permettant occasionnellement à des masses d'air instables – apportant leur lot de cellules convectives – de traverser le Luxembourg. Ainsi, des cellules orageuses ont abordé le pays depuis le sud le 9 juin 2018 à partir 17:00 heures UTC. Dès 18:00 heures UTC les précipitations très intenses associées à ces mêmes cellules ont touché les bassins-versants de l'Attert, de même que les bassins de l'Ernz Blanche et de l'Ernz Noire.

### 2.3. Les apports pluviométriques de mai à juin 2018

Les précipitations intenses du 31 mai, 1<sup>er</sup> juin et 9 juin 2018 ont été caractérisées par une extension spatiale très limitée – essentiellement concentrée sur le centre et le flanc oriental du Luxembourg (Figure 2). Entre le 31 mai et le 1<sup>er</sup> juin 2018, les intensités de pluie les plus élevées ont été enregistrées à la fois sur les secteurs aval de l'Ernz Blanche et de l'Ernz Noire), ainsi que sur l'extrême sud-est du pays (bassin-versant de l'Aalbach, en amont de Stadtbredimus). Le deuxième épisode de pluies extrêmes, mesuré le 9 juin 2018, a été confiné aux secteurs de l'Ernz Noire aval et du bassin de l'Attert compris entre les localités d'Useldange et de Bissen (Figure 2).



**Figure 2**

Répartition spatiale des précipitations du 31 mai, 1<sup>er</sup> juin 2018 et 9 juin 2018 (cumuls de 1, 6 et 24 heures) selon la couverture fournie par le radar météorologique de Neuheilenbach (DWD, Allemagne). 1 – Bassin de l'Attert (entre Useldange et Bissen) ; 2 – Bassin de l'Ernz Blanche ; 3 – Bassin de l'Ernz Noire ; 4 – Bassin du Hallerbach ; 5 – Bassin de l'Aalbach.

Le 1<sup>er</sup> juin 2018, les intensités de pluie les plus élevées ont été enregistrées dans l'est et le sud-est du pays, avec 15.5 mm tombés en 10 minutes à Waldbillig et 14 mm tombés en 10 minutes à Grevenmacher (Tableau 1). Sur Waldbillig ont également été enregistrés les cumuls de pluie les plus élevés en 1 heure (72.1 mm), 6 heures (100.6 mm), respectivement 24 heures (113.7 mm). D'après la classification des intensités de précipitations du DWD, ces valeurs correspondent à des pluies extrêmes au pas de temps de 1 heure et 6 heures. De même, selon la classification de MeteoLux, les cumuls relevés sur 24 heures dans la station de Waldbillig correspondent à des pluies 'torrentielles'.

Station	Max. 10 minutes [mm]	Heure*	Max. 1 heure [mm]	Heure	Max. 6 heures [mm]	Heure	Max. 24 heures [mm]
Waldbillig	15.5	1h10	72.1	1h-2h	100.6	1h-7h	113.7
Grevenmacher	14.0	1h10	46.5	0h50-1h50	67.2	0h-6h	77.0
Stadtbredimus	9.4	13h00	26.5	12h40-13h40	37.1	11h-17h	79.3
Merl	10.0	5h10	32.1	4h50-5h50	65.1	1h-7h	75.6
Mamer	8.4	4h50	37.5	4h40-5h40	55.5	0h-6h	59.0
Echternach	7.9	1h20	25.4	1h10-2h10	52.1	0h-6h	67.7
Remerschen	7.4	2h40	24.5	2h20-3h20	49.1	0h-6h	62.1
Mersch	2.1	0h20	6.9	5h20-6h20	26.3	0h-6h	31.8
Bollendorf	18.4	1h50	43.0	1h20 - 2h20	63.0	0h-6h	71.1
Potäschberg	11.9	1h20	27.9	1h00 - 2h00	46.9	0h-6h	52.5
Vianden	14.4	2h40	32.8	2h20 - 3h20	58.4	1h-7h	59.2

\* l'heure UTC+1 signifiant que le cumul maximal a été enregistré entre l'heure H-10min et H

**Tableau 1**

Intensités de pluie relevées sur 10 minutes, 1 heure, 6 heures et 24 heures dans 11 stations pluviométriques du Luxembourg le 1<sup>er</sup> juin 2018. Codes couleurs pour les intensités maximales enregistrées en 1 heure et 6 heures selon la classification du DWD [cf. section 1.1.2] : jaune – pluie intense, orange – pluie très intense, rouge – pluie extrême. [heure exprimée en UTC +1]

Le 9 juin 2018, les intensités de pluie les plus remarquables ont été relevées dans le bassin de l'Attert, avec notamment 53.3 mm tombés en 1 heure et 64.8 mm tombés en 6 heures à la station de Reichlange (Tableau 2). Au sud du pays, des intensités de pluie importantes ont également été relevées le 11 juin 2018, avec notamment 18.3 mm observés en 10 minutes et 48.9 mm en 1 heure à Roeser (Tableau 2). Le flanc oriental a connu une nouvelle fois des cumuls de pluie importants, avec 32.2 mm enregistrés en 1 heure et 69.2 mm en 24 heures à la station de Waldbillig (Tableau 2).

Station	Max. 10 minutes [mm]	Date Heure [UTC+1]	Max. 1 heure [mm]	Heure [UTC+1]	Max. 6 heures [mm]	Heure [UTC+1]	Max. 24 heures [mm]
Roeser	18.3	11 juin 14h20	48.9	14h00-15h00	51.6	12h-18h	62.0
Godbrange	14.3	09 juin 18h30	22.3	18h20-19h20	32.2	17h-23h	32.2
Waldbillig	12.9	09 juin 18h40	32.2	18h00-19h00	58.1	17h-23h	69.2
Obercorn	12.4	11 juin 13h30	34.2	13h00-14h00	42.4	12h-18h	48.2
Remerschen	10.1	11 juin 15h30	18.4	15h00-16h00	26.4	11h40-17h40	34.8
Reckange	9.8	09 juin 18h40	16.6	18h30-19h30	18.1	18h-24h	26.4
Dahl	8.1	09 juin 20h00	20.4	17h20-18h20	14.2	18h-24h	14.6
Clemency	7.8	11 juin 13h20	15.0	13h10-14h10	18.6	12h-18h	22.8
Esch/Sûre	7.1	11 juin 17h40	22.0	17h30-18h30	34.4	13h30-14h30	41.4
Stadtbredimus	7	10 juin 20h50	8.5	20h00-21h00	11.6	19h-01h	21.4
Merl	5.9	11 juin 14h20	13.6	14h00-15h00	19.1	12h-18h	24.3
Hosingen	5.2	11 juin 18h00	15.8	17h40-18h40	26.9	14h-20h	33.4
Roodt	5.2	11 juin 17h20	9.2	20h00-21h00	18.3	13h-19h	24.4
Eschdorf	5.1	11 juin 17h30	15.9	17h00-18h00	27	14h-20h	34.1
Bollendorf	7.6	09 juin 18h50	23.7	18h10-19h10	36.8	17h-23h	38.0
Livange	16.1	10 juin 13h30	30.7	12h50-13h50	31.9	11h-17h	35.8
Reichlange	14.2	09 juin 19h40	53.3	19h10-20h10	64.8	19h-01h	64.8
Welscheid	10.7	09 juin 19h30	37.5	19h00-20h00	41.2	18h-00h	43.4
Merzig (D)	N.A.	-	16.3	14h00-15h00	-	-	23.5
Oberstadtfeld (D)	N.A.	-	20.4	18h00-19h00	-	-	45.5

**Tableau 2**

Intensités de pluie relevées sur 10 minutes, 1 heure, 6 heures et 24 heures dans 20 stations pluviométriques du Luxembourg entre le 9 et le 11 juin 2018. Deux stations (Merzig et Oberstadtfeld) sont localisées en Allemagne. Codes couleurs pour les intensités maximales enregistrées en 1 heure selon la classification du DWD [cf. section 1.1.2] : jaune – pluie intense, orange – pluie très intense, rouge – pluie extrême. [heure exprimée en UTC +1]

### 3. DESCRIPTION DES CRUES DE 2018

Les crues de 2018 ont été caractérisées au moyen de plusieurs paramètres de référence, pouvant servir par la suite à comparer les réponses hydrologiques individuelles aussi bien à des événements antérieurs dans le même secteur, qu'à des crues subites observées dans d'autres contextes physiogéographiques à l'étranger.

#### 3.1. L'événement du 31 mai au 1<sup>er</sup> juin 2018

Les lames de pluie spatialisées dans les cinq bassins-versants touchés par des crues subites le 1<sup>er</sup> juin 2018 ont varié entre 41.4 mm (bassin de l'Ernz Blanche à hauteur de Larochette) et 63.2 mm (bassin de l'Ernz Noire à hauteur du sous-bassin du Hallerbach). Les intensités de pluie maximales estimées ont varié entre 0.8 et 3.6 mm.5min<sup>-1</sup>. En raison de l'absence de courbes de tarage suffisamment précises pour les hauts débits, les ondes de crue n'ont pu être quantifiées que pour l'Ernz Blanche à hauteur de Larochette, l'Ernz Noire à hauteur de Mullerthal, le Hallerbach et l'Aalbach (Figures 3 et 4 ; Tableau 3). Pour ces mêmes raisons, les coefficients d'écoulement n'ont pu être déterminés que pour l'Ernz Blanche à hauteur de Larochette (22%), l'Ernz Noire au Mullerthal (31%), le Hallerbach (35% ± 7%), et l'Aalbach (22% ± 3%). Les temps de montée au pic de crue ont varié entre 1 à 2 heures (Hallerbach & Ernz Noire au Mullerthal) et entre 3 à 5 heures (Ernz Blanche à Larochette & Reisdorf). Sur l'Aalbach, la montée de l'hydrogramme a pris 3 heures.

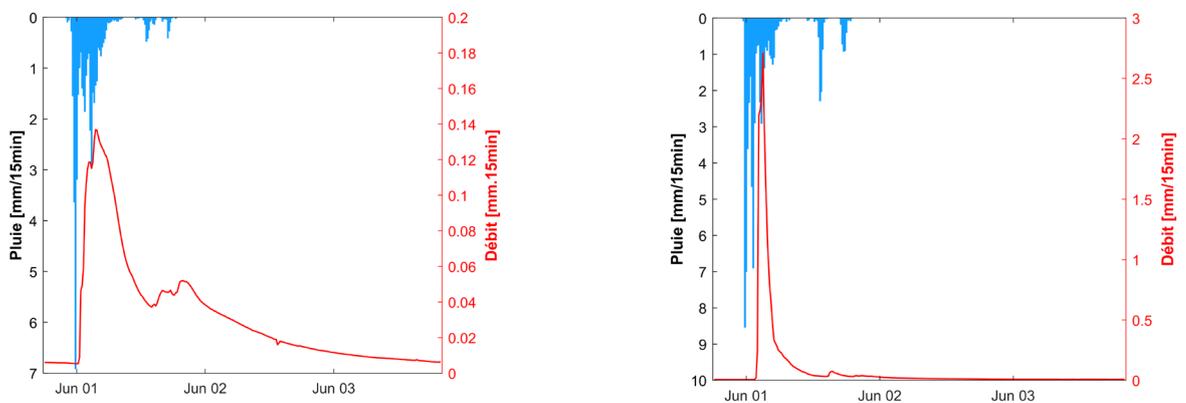


Figure 3

[Gauche] Précipitations et débits de l'Ernz Blanche à Larochette du 31 mai au 3 juin 2018. [Droite] Précipitations et débits du Hallerbach du 31 mai au 3 juin 2018.

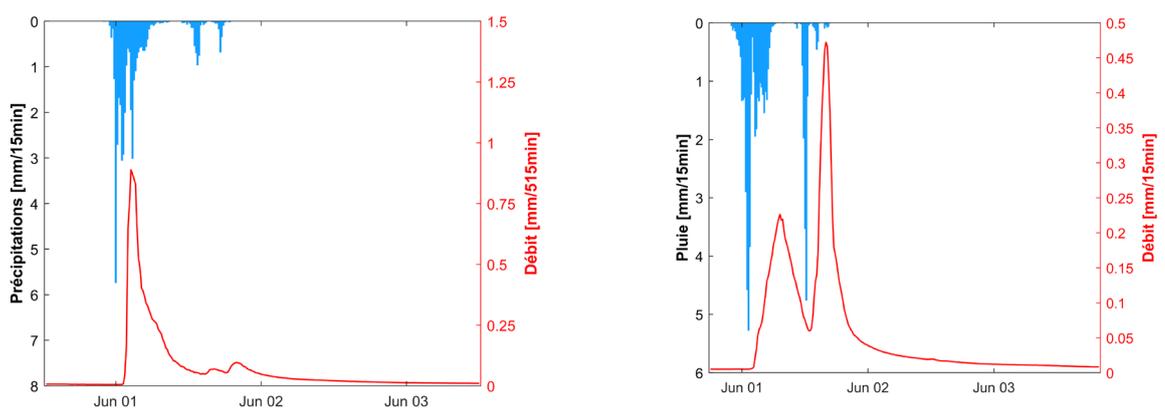


Figure 4

[Gauche] Précipitations et débits de l'Ernz Noire au Mullerthal du 31 mai au 3 juin 2018. [Droite] Précipitations et débits de l'Aalbach du 31 mai au 3 juin 2018.

Bassin	Station [Opérateur]	Superficie du bassin-versant [km <sup>2</sup> ]	Pluie cumulée [mm]	Intensité de pluie maximale [mm.5min. <sup>-1</sup> ]	Lame d'eau écoulée [mm]	Coeff. d'écoulement [%]	Temps de montée [hr:min]
Ernz Blanche	Larochette [AGE]	70.03	41.4	1.7	9.0	22	03:30
Ernz Blanche	Reisdorf [AGE]	100.7	46.7	2.0	-	-	05:00
Ernz Noire	Mullerthal [AGE]	68.9	42.3	2.4	12.9	31	01:15
Ernz Noire	Hallerbach [LIST]	19.4	63.2	3.6	22.3 ± 4.4	35 ± 7	01:45
Moselle	Aalbach [LIST]	40.9	56.6	0.8	12.5 ± 1.5	22 ± 3	03:00

Tableau 3

Pluie cumulée sur l'événement (spatialisée au moyen de stations pluviométriques et données radar de Neuheilenbach, DWD), intensité de pluie maximale observée en 5 minutes, lame d'eau écoulée sur l'événement, coefficient de ruissellement et temps de montée de l'hydrogramme pour l'épisode de crues subites du 31 mai au 1<sup>er</sup> juin 2018 dans les bassins-versants de l'Ernz Blanche, de l'Ernz Noire et de l'Aalbach.

### 3.2. L'événement du 9 au 10 juin 2018

L'événement convectif observé entre le 9 et le 10 juin 2018 a une nouvelle fois touché la bordure orientale du pays, ainsi qu'un secteur du bassin de l'Attert compris entre les localités d'Useldange et Bissen. Les précipitations ont été abondantes sur le bassin de l'Ernz Noire, avec une lame spatialisée de 27.3 mm et une intensité de pluie maximale de 1.5 mm.5min<sup>-1</sup> (Tableau 4). Sur le sous-bassin du Hallerbach une lame spatialisée de 43.3 mm et une intensité maximale de 2.9 mm.5min<sup>-1</sup> ont été relevées. Ces cumuls et intensités sont nettement supérieurs aux valeurs observées dans les autres bassins-versants de la zone d'étude, à l'exception du bassin de l'Attert (entre Useldange et Bissen) où la lame de pluie spatialisée a atteint 32.4 mm, avec une intensité maximale de 2.1 mm.5min<sup>-1</sup> (Figures 5 & 6, Tableau 4).

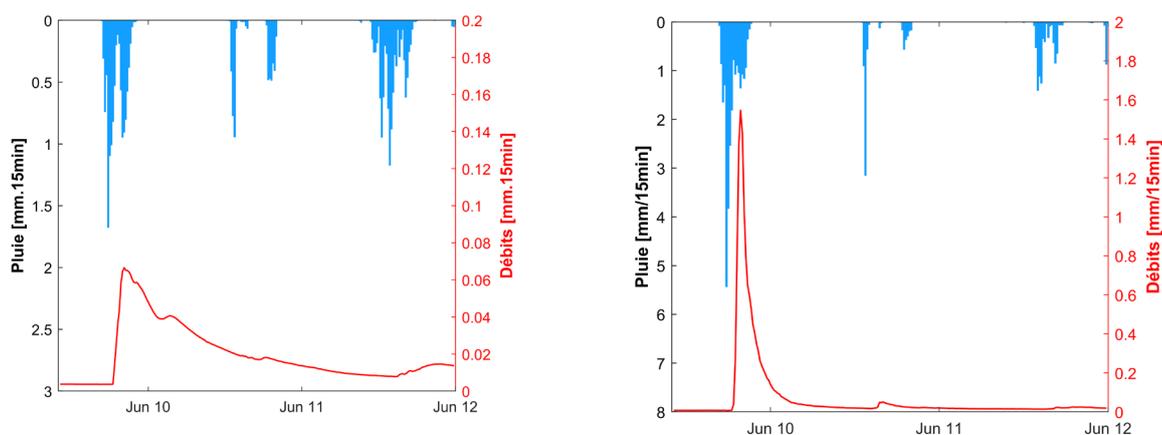


Figure 5

[Gauche] Précipitations et débits de l'Ernz Blanche à Larochette du 9 au 11 juin 2018. [Droite] Précipitations et débits du Hallerbach du 9 au 10 juin 2018.

Le coefficient d'écoulement déterminé pour le Hallerbach est de 32% ± 5%. Cette valeur est très supérieure aux coefficients d'écoulement déterminés pour l'Ernz Noire à Mullerthal (18%) et l'Ernz Blanche à Larochette (19%). A hauteur du sous-bassin de l'Attert (compris entre les localités d'Useldange et de Bissen), l'intensité de pluie maximale de 2.1 mm.5min<sup>-1</sup> a été proche de celle déterminée pour le bassin du Hallerbach. Le coefficient d'écoulement déterminé pour le sous-bassin de l'Attert n'a toutefois été que de 12% - pour un cumul de pluie inférieur d'environ 10 mm en comparaison avec le bassin du Hallerbach.

A noter que les temps de montée de crue sur l'Ernz Blanche ont été légèrement inférieurs à ceux observés durant l'épisode du 31 mai au 1<sup>er</sup> juin 2018.

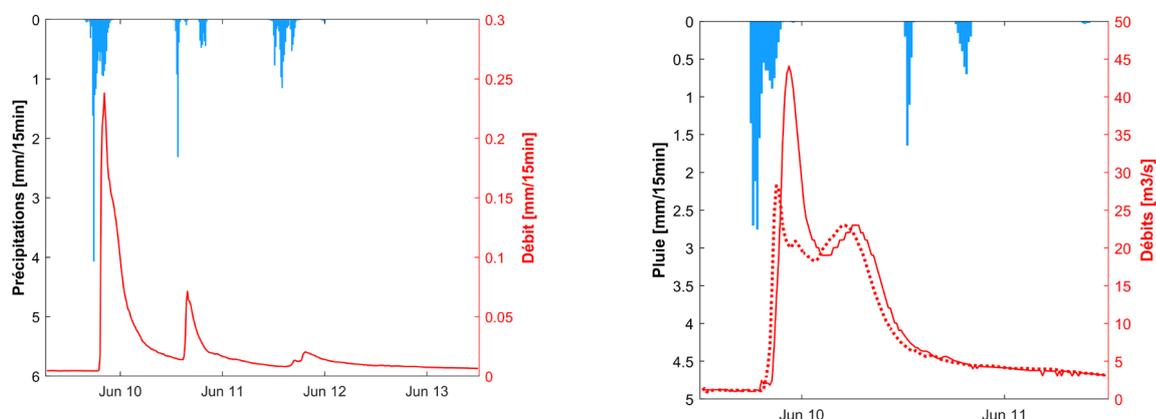


Figure 6

[Gauche] Précipitations et débits de l'Ernz Noire au Mullerthal du 9 au 13 juin 2018. [Droite] Précipitations et débits de l'Attert à Useldange [ligne pointillée] et à Bissen [ligne continue] du 9 au 11 juin 2018.

Bassin	Station [Opérateur]	Superficie du bassin-versant [km <sup>2</sup> ]	Pluie cumulée [mm]	Intensité de pluie maximale [mm.5min. <sup>-1</sup> ]	Lame d'eau écoulee [mm]	Coeff. d'écoulement [%]	Temps de montée [hr:min]
Ernz Blanche	Larochette [AGE]	70.03	20.8	0.9	4.0	19	01:45
Ernz Blanche	Reisdorf [AGE]	100.7	22.7	1.5	-	-	02:30
Ernz Noire	Mullerthal [AGE]	68.9	27.3	1.5	4.9	18	01:30
Ernz Noire	Hallerbach [LIST]	19.4	43.3	2.9	14 ± 2	32 ± 5	02:45
Moselle	Aalbach [LIST]	40.9	5.7	0.5	0.6	11	03:15
Attert	Bissen [AGE]	46.8*	32.4	2.1	3.8	12	03:15

Tableau 4

Pluie cumulée sur l'événement (spatialisée au moyen de stations pluviométriques et données radar de Neuheilenbach (DWD)), intensité de pluie maximale observée en 5 minutes, lame d'eau écoulee sur l'événement, coefficient de ruissellement et temps de montée de l'hydrogramme pour l'épisode de crues subites du 9 au 10 juin 2018 dans les bassins-versants de l'Ernz Blanche, de l'Ernz Noire et de l'Aalbach. NB: Intensités de pluie maximales observées sur 6 heures inférieures aux seuils d'alerte Meteolux. \*Superficie du bassin de l'Attert compris entre Useldange et Bissen.

### 3.3. Analyse fréquentielle des crues subites de 2018

#### 3.3.1. Analyse fréquentielle des précipitations

Afin de placer les événements de l'été 2018 dans un contexte fréquentiel aussi large que possible, nous avons réalisé une analyse statistique au moyen de séries d'observations aux résolutions spatiales et temporelles variables.

##### 3.3.1.1. Variabilité spatiale des cumuls pluviométriques journaliers maximums

La distribution spatiale des cumuls pluviométriques journaliers maximums (i.e. supérieurs à 50 mm.jour<sup>-1</sup>) observés sur les 50 dernières années sur le secteur étudié est caractérisée par une hétérogénéité marquée. Ainsi, les cumuls les plus importants (> 80 mm.jour<sup>-1</sup>) relevés dans près de 30 stations pluviométriques se concentrent sur un couloir s'étirant le long de la bordure orientale du Luxembourg (Figure 7). Tous les bassins-versants ayant été touchés par les crues subites de 2016 et 2018 (à l'exception de la localité de Bissen) sont situés à l'intérieur de cette zone.

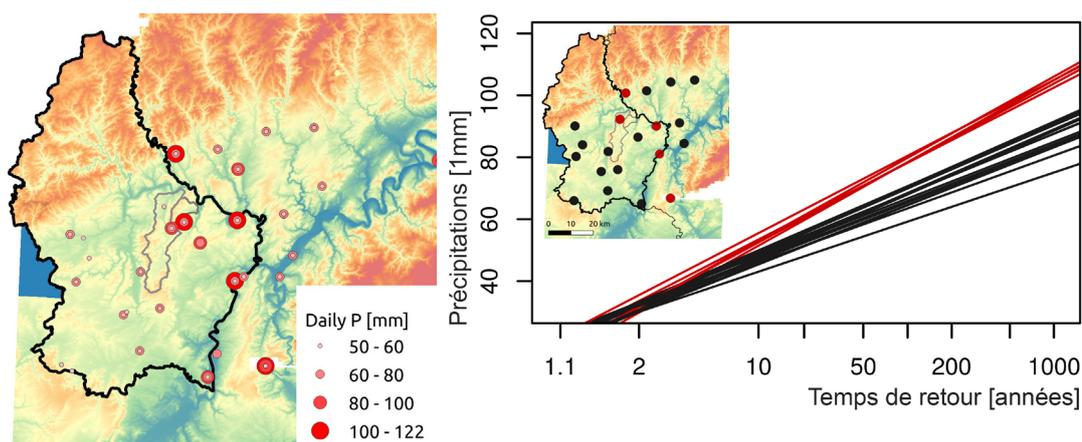


Figure 7

[Gauche] Pluie journalière maximale annuelle supérieure à 50 mm.jour<sup>-1</sup>. [Droite] Périodes de retour pour 30 stations pluviométriques avec localisation des sites [droite]. Les stations aux périodes de retour plus courtes à cumuls pluviométriques équivalents sont marquées en rouge.

Par ailleurs, l'analyse fréquentielle des séries pluviométriques journalières révèle de manière systématique des périodes de retour plus courtes (pour des cumuls identiques) dans les stations situées dans cette bordure orientale (Figure 7). Ainsi, dans ce couloir une pluie à période de retour de 50 ans équivaldra à un cumul journalier compris entre 70 et 75 mm, contre seulement 50 à 60 mm en-dehors de cette zone.

### 3.3.1.2. Analyse statistique intensité-durée-fréquence (IDF)

Dans notre secteur d'étude, les stations de Remerschen et Altrier-Hersberg offrent des séries pluviométriques journalières longues de près de 70 ans (1954–2018). Ces stations sont donc représentatives des conditions climatiques propres à la zone d'étude d'une part et susceptibles de renseigner sur d'éventuelles tendances dans les séries pluviométriques d'autre part.

Station	Maximum journalier été 2018 [mm]	Période de retour été 2018 [années]	Maximum journalier absolu [mm]	Cumul maximal sur 7 jours été 2018 [mm]	Cumul maximal sur 7 jours absolu [mm]
Remerschen	49.9	14.8	92.3	68.3	133.9
Remerschen (cumul 24 hrs)	62.1	~70	-	-	-
Aalbach (lame spatialisée)	53.8	~25	-	-	-
Altrier-Hersberg	38.3	6	81.1	75.4	131.4
Hallerbach (lame spatialisée)	63.2	>100	-	-	-

Tableau 5

Cumuls de pluie journaliers maximums (été 2018 & absolu), périodes de retour correspondantes et cumuls de pluie sur 7 jours d'affilée (été 2018 & absolu) dans les stations de Remerschen et Altrier-Hersberg (période 1954–2018). Maximums pluviométriques journaliers (été 2018) spatialisés et période de retour correspondante pour les bassin-versants de l'Aalbach et du Hallerbach (sur base des séries de référence des stations de Remerschen et Altrier-Hersberg). Classification des cumuls de pluie sur 24 heures selon MeteoLux.

L'analyse fréquentielle des cumuls journaliers de pluie observés dans les stations de Remerschen et Altrier-Hersberg sur la période 1954–2018 fournit des temps de retour compris entre 6.5 et 15 ans, respectivement (Tableau 5). Les cumuls pluviométriques fournis par les images radar, tout comme les cumuls obtenus au moyen de pluviographes enregistreurs permettant de couvrir des événements étalés sur deux journées successives, suggèrent toutefois des temps de retour nettement plus longs. Ainsi, aux 62.1 mm de pluie relevés dans la station de Remerschen entre le 31 mai et le 1<sup>er</sup> juin 2018 correspondrait un temps de retour d'environ 70 ans. La lame de pluie spatialisée sur le bassin de l'Aalbach – donc dans le même secteur géographique – équivaldrait (toujours sur base de la série de référence de Remerschen) à un temps de retour de 25 ans. La lame de pluie spatialisée sur le Hallerbach de 63.2 mm en 24 heures (événement du 31 mai au 1<sup>er</sup> juin 2018) serait caractérisée par un temps de retour supérieur à 100 ans (sur base de la série de référence d'Altrier-Hersberg). A noter que les 113.7 mm relevés en 24 heures (entre le 31 mai et le 1<sup>er</sup> juin 2018) à la station de Waldbillig dépasseraient de très loin cette période de retour.

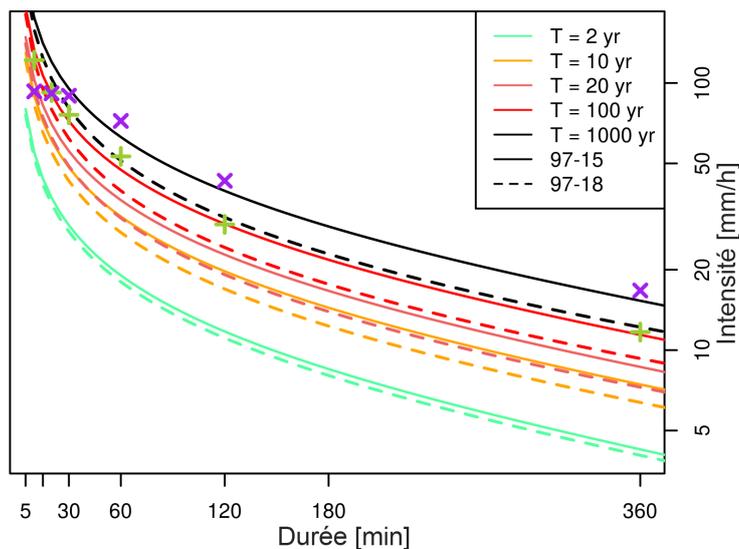


Figure 8

Courbes intensité-durée-fréquence (IDF) – Station de Bollendorf. Lignes pointillées : calcul sur la période 1997 – 2018. Lignes pleines : calcul sur la période 1997 – 2015. Croix vertes : intensités relevées en 2016. Croix magenta : intensités relevées en 2018.

Pour l'analyse fréquentielle des précipitations cumulées sur 5 minutes et 6 heures, nous avons eu recours à la station de Bollendorf – couvrant 21 années d'observations pluviométriques à haute résolution temporelle (Figure 8). Les intensités de pluie maximales relevées en 2018 sur des pas de temps courts (<15 minutes) ont eu des périodes de retour comprises entre 20 et 100 ans. Les cumuls de pluie relevés sur des intervalles de temps plus longs (compris entre 60 et 360 minutes) avaient des temps de retour nettement plus longs (>1000 ans). Il est à noter qu'au vu de la série d'observations relativement courte (~20 ans), toute extrapolation vers des périodes de retour plus longues que la série d'observation en elle-même reste entachée d'incertitudes considérables.

### 3.3.2. Analyse des temps de retour des relevés hydrométriques

L'analyse fréquentielle sur les stations hydrométriques a été limitée aux stations de Reisdorf (Ernz Blanche), Hallerbach (Ernz Noire) et Aalbach (Moselle) – essentiellement en raison de l'extension relativement limitée de la plupart des séries d'observations. Ainsi, les pics de crue observés sur l'Ernz Noire (au niveau du sous-bassin du Hallerbach) et sur l'Aalbach ont eu des périodes de retour de l'ordre de 30 ans (Tableau 6). A noter que pour le Hallerbach, l'analyse des temps de montée de crue (exprimée en  $\text{cm} \cdot 30\text{min}^{-1}$ ) a révélé des temps de retour compris entre 100 et 2000 ans (Figure 9). Sur l'Ernz Blanche, la hauteur d'eau maximale observée en 2018 n'aurait eu qu'une période de retour de 3 ans.

Bassin	Station	Période d'observations	Hauteur maximale [cm]	Débit maximum [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]	Période de retour [années]
Ernz Blanche	Reisdorf*	2009 – en cours	121.6	-	3
Ernz Noire	Hallerbach	2006 – en cours	183.5	-	34
Moselle	Aalbach**	2006 – en cours	-	21.46	27

Tableau 6

Périodes de retour pour les débits et hauteurs d'eau max. observés en 2018 (période estivale ; ajustement par la méthode de Gumbel). \*Hauteur maximale observée pour la station de Reisdorf = 311.5cm (2016), période de retour 45 ans. \*\*Débit maximal observé pour la station de l'Aalbach = 22.07 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (2013), période de retour de 30 ans.

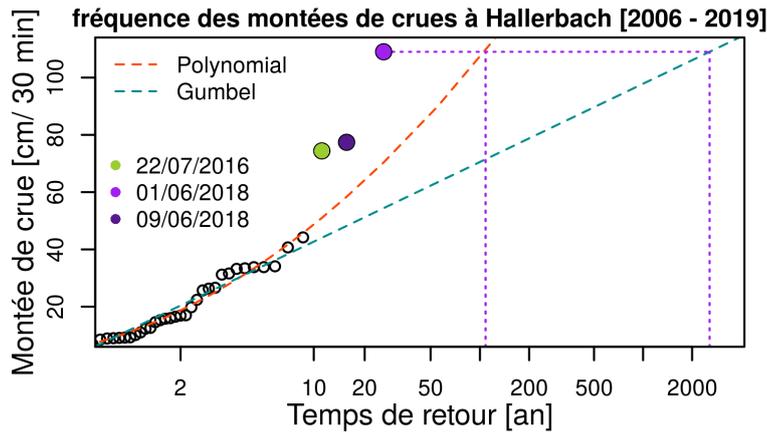


Figure 9

Période de retour correspondant au rythme de montée des crues dans le ruisseau du Hallerbach (période 2006–2019).

Bien que la série d'observations hydrométriques trop courte de la station de Larochette ne permette pas une analyse fréquentielle complète (avec période de retour des pics de crue), une juxtaposition des neuf plus grandes ondes de crue observées entre 2015 et 2019 illustre le caractère exceptionnel des événements de 2016 et 2018 – tout comme l'envergure moindre (pour cette station) de l'onde de crue de 2018 par rapport aux pics de crue observés en mai et juillet 2016 (Figure 10).

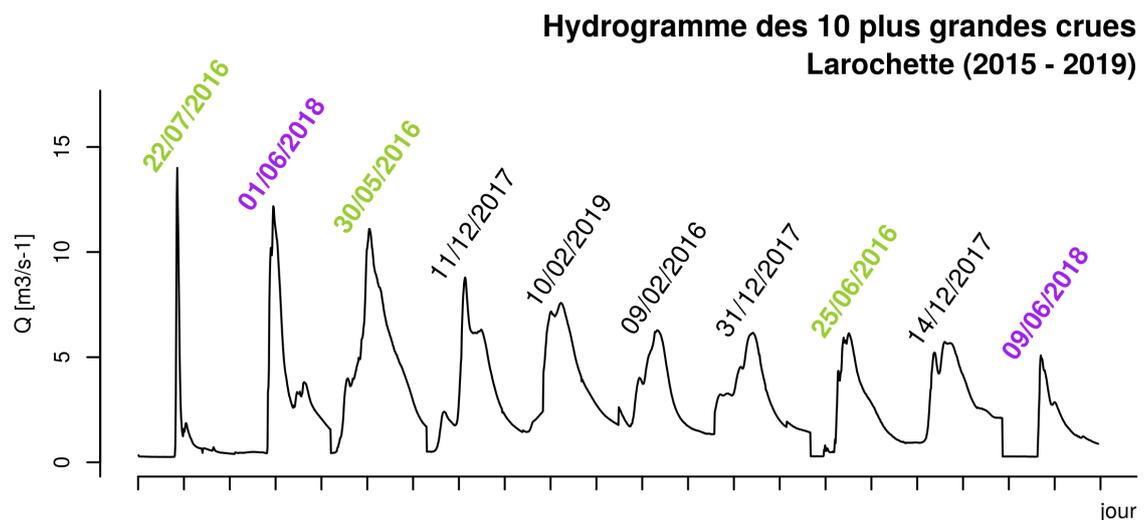


Figure 10

Juxtaposition de neuf ondes de crue majeures sur l'Ernz Blanche à hauteur de la station de Larochette (période d'observation 2015–2019). [vert] événements de 2016 ; [violet] événements de 2018. Pic de l'onde de crue 2019 non-validé.

#### 4. MODÈLE PERCEPTUEL DES CRUES SUBITES

Sur base de l'analyse des données hydro-météorologiques rassemblées au cours de plusieurs années, en plus de l'analyse mécanistique détaillée des événements de crue subites dans les bassins-versants de l'Ernz Noire, de l'Ernz Blanche, de l'Attert et de l'Aalbach, nous sommes en mesure de proposer une ébauche de modèle perceptuel autour du fonctionnement de ces hydrosystèmes.

Ainsi, tous les bassins étudiés sont caractérisés par un seuil de déclenchement de l'écoulement – pour certains légèrement différent entre été et hiver – consistant en une certaine quantité de précipitations préalables (Figure 11). Selon les bassins, la saison et leurs caractéristiques physiographiques, cette quantité de précipitations varie entre 5 et 50 mm. Le substrat géologique en place influence grandement la capacité de stockage d'un hydrosystème, tout comme le niveau du déficit de stockage [Pfister et al., 2002] – largement dépendant des précipitations antécédentes et des pertes par évapo-transpiration [Pfister et al., 2017].

Au-delà du seuil de précipitations déclenchant l'écoulement, les hydrosystèmes sont caractérisés par une augmentation très sensible de leur rendement (Figure 11). Correspondant au rapport entre la lame écoulee et la hauteur totale des précipitations pour un même événement, ce rapport tend à augmenter très sensiblement dès l'automne – notamment en raison de la diminution rapide des pertes par évapo-transpiration. Le déficit de stockage tend à se réduire très rapidement, conduisant à l'occurrence de plus en plus fréquente d'écoulements de surface et de sub-surface (saturation excess overland flow – SEOF).

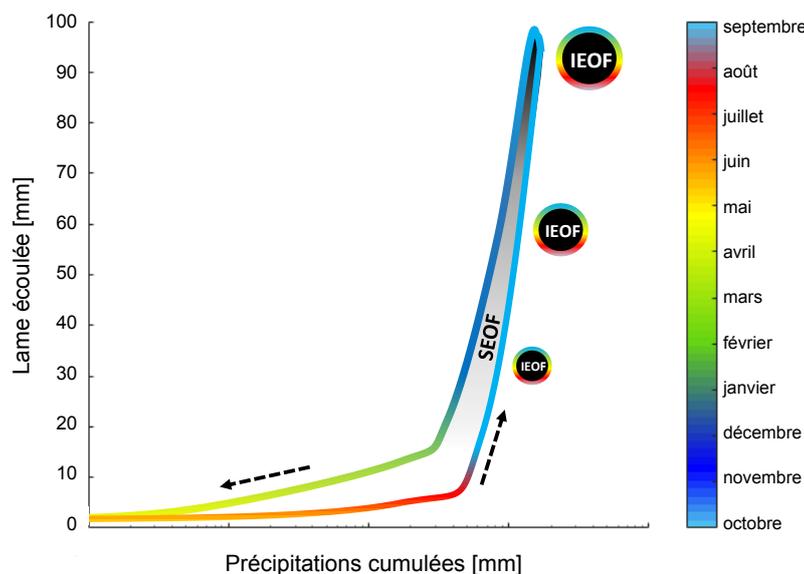


Figure 11

Modèle perceptuel du fonctionnement des hydrosystèmes étudiés. Relation hystérétique entre précipitations cumulées et lames écoulées au fil des saisons (représentant le niveau de saturation du système). SEOF = Saturation Excess Overland Flow ; IEOF = Infiltration Excess Overland Flow (contrôlé avant tout par l'intensité de pluie).

Un processus à part dans ce schéma mécanistique propre à tous les bassins-versants étudiés est lié aux précipitations caractérisées par des intensités exceptionnelles. Bien que le niveau du déficit de stockage antécédent aux précipitations reste un élément clé dans la réponse hydrologique du système bassin-versant, ce sont les intensités de pluie – localement et très brièvement d'un niveau exceptionnel – qui peuvent conduire à l'apparition du phénomène de battance et à l'occurrence d'un ruissellement de surface massif (infiltration excess overland flow – IEOF), capable de développer une force érosive hors normes (Figure 11). Selon notre analyse, c'est clairement la combinaison de volumes de pluie très importants (dans tous les cas bien supérieurs au déficit de stockage restant) et d'intensités de pluie localement très importantes, qui ont conduit aux crues éclair dans les bassins-versants de l'Ernz Blanche, de l'Ernz Noire, de l'Attert et de l'Aalbach. Les débits de pointe exceptionnels propres aux crues subites trouvent ainsi leur origine dans l'apparition d'un écoulement de surface par déficit d'infiltration d'une part et la connectivité momentanée de ces foyers d'écoulement de surface avec le réseau hydrographique principal d'autre part.

## 5. DISCUSSION ET CONCLUSION

Au niveau des précipitations, l'analyse statistique des longues séries d'observations pluviométriques a mis en évidence l'existence d'un 'couloir' le long du flanc oriental du Luxembourg, marqué par des périodes de retour plus courtes pour des quantités de pluie équivalentes en comparaison aux stations environnantes. A l'exception de l'événement de Bissen, tous les épisodes de crue subite de 2018 se sont produits dans ou à proximité immédiate de ce couloir.

Les temps de retour de ces événements de pluie, suggérés au moyen de corrections de cumuls journaliers à partir d'images radar, sont nettement plus importantes que celles indiquées sur base des stations pluviométriques du réseau d'observation conventionnel. Ainsi, la période de retour du cumul pluviométrique journalier serait *a priori* supérieur à 100 ans pour le Hallerbach.

L'estimation des débits de pointe est très difficile, voire impossible, en raison du caractère exceptionnel et très court des événements d'une part et de la difficulté technique à jauger dans cette gamme de débits d'autre part. L'estimation d'une lame écoulée à l'échelle d'un épisode entier est déjà moins assujettie à ces erreurs. Les temps de retour (très incertains) ainsi déterminés sont de l'ordre de 100 ans, voire beaucoup plus, pour le Hallerbach.

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 <sup>-1</sup>	30 min.	
18 juil. 1985	Mont Lozère (F)		90 mm.h <sup>-1</sup>	30 min.	1.3-1.5 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
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 <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
22 sept. 1992	Mont Lozère (F)		144 mm.h <sup>-1</sup>	30 min.	7.5 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
8-9 sept. 2002	Gard & Vidourle (F)	600-700 mm		24 hrs.	5-10 (20 localement) m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
26 août 2010	Hupsel brook (NL)	160 mm	111 mm.h <sup>-1</sup>	24 hrs.	0.77 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
29 mai 2016	Orlacher Bach (Braunsbach, D)	100-140 mm	100 mm.h <sup>-1</sup>	75 min.	8-25 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
22 juillet 2016	Ernz Blanche (Larochette)	20.3 mm+	122 mm.h <sup>-1</sup>	4 hrs.	0.14-0.18 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
22 juillet 2016	Hallerbach	38.9 mm+			0.74-1.13 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
1 juin 2018	Ernz Blanche (Larochette)	42 mm+	30 mm.h <sup>-1</sup> +	11 hrs.	0.17 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
1 juin 2018	Ernz Noire (Mullerthal)	42 mm+	57 mm.h <sup>-1</sup> +	11 hrs.	1.03 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
1 juin 2018	Hallerbach	63 mm+	57 mm.h <sup>-1</sup> +	9 hrs.	1.94-3.33 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
1 juin 2018	Aalbach	54 mm+	72 mm.h <sup>-1</sup> +	19 hrs.	0.79-1.17 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
9 juin 2018	Ernz Blanche (Larochette)	20.8 mm+	45.4 mm.h <sup>-1</sup> +	5 hrs.	0.07 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
9 juin 2018	Ernz Noire (Mullerthal)	27.3 mm+	17 mm.h <sup>-1</sup> +	6 hrs.	0.27 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
9 juin 2018	Hallerbach	43.3 mm+	52 mm.h <sup>-1</sup> +	5 hrs.	1.30-2.13 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>
9 juin 2018	Attert (Bissen)	32.4 mm+	89 mm.h <sup>-1</sup> +	6 hrs.	0.15 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup>

**Tableau 7**

Caractéristiques pluviométriques et débitométriques d'épisodes de crues subites. Les valeurs marquées [+] correspondent à des cumuls de pluie spatialisés sur tout le bassin-versant. Codes couleurs pour les intensités maximales enregistrées le 1<sup>er</sup> et 9 juin 2018 en 1 heure selon la classification du DWD [cf. section 1.1.2] : jaune – pluie intense, orange – pluie très intense, rouge – pluie extrême.

L'analyse mécanistique a révélé que les événements de juin 2018 ont été caractérisés par une combinaison d'au moins deux facteurs : (i) les valeurs de déficit de stockage plutôt faibles juste avant les pluies exceptionnelles représentaient un pouvoir tampon considérable ( $>100$  mm) dans tous les bassins-versants étudiés ; (ii) malgré ce pouvoir tampon, les pluies ont été localement si intenses qu'elles ont dépassé la capacité d'infiltration locale des sols, générant un écoulement de surface de type 'infiltration excess overland flow', doté d'un pouvoir érosif et destructif considérable. En de multiples endroits, des rigoles d'érosion profondes d'un mètre, voire largement plus, ont été creusées. Souvent localisées en milieu ou bordure des plateaux de grès typiques de la région de Larochette et du Mullerthal, ces 'hot spots' ont été très temporairement connectés par des ravines, voire cascades, au réseau hydrographique conventionnel dans les vallées de l'Ernz Blanche et de l'Ernz Noire.

Dans un contexte plus large, les débits de pointe spécifiques relevés en 2018 ont été plus importants que ceux observés en 2016 sur le Hallerbach. Seul autre cours d'eau de comparaison, l'Ernz Blanche à Larochette n'a pas connu des débits de pointe très différents et en tous cas bien en-deça des débits spécifiques observés dans le Hallerbach. Les débits de pointe spécifiques de ces événements (jusqu'à  $\sim 3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ ) sont comparables à ceux observés dans des bassins-versants exposés aux crues cévenoles (p.ex. Mont Lozère ; Tableau 7), mais restent néanmoins encore bien en-deça de certaines autres crues subites, observées notamment dans le Gard, ou encore en Allemagne (jusqu'à  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  ; Tableau 7).

L'occurrence rapprochée de ces événements de crues subites au Luxembourg (en 2016 et 2018), impose une analyse encore plus poussée des conditions météorologiques et climatologiques. Sous divers scénarios de changement climatique, les précipitations extrêmes devraient augmenter en intensité. Avec la montée des températures, la pression de vapeur d'eau saturante augmente en suivant l'équation de Clausius-Clapeyron. Par conséquent, plus de vapeur d'eau peut être contenue dans l'atmosphère – vapeur d'eau qui peut *in fine* condenser et aboutir à des précipitations très intenses [Pfahl et al., 2017 ; Tandon et al., 2018 ; Trenberth et al., 2003]. Plutôt qu'une augmentation généralisée de l'intensité des pluies [Giorgi et al., 2019], l'intensité moyenne des précipitations devrait augmenter pour certains temps de retour [Giorgi et al., 2019 ; Tandon et al., 2018]. Pour l'Europe de l'Ouest, Müller et Pfister [2011] ont démontré une augmentation des épisodes de pluie courts avec de fortes intensités au cours des dernières années – en particulier durant la période estivale. Kunz et al. [2009] ont détectés une augmentation dans l'occurrence et les dommages liés aux chutes de grêle, tandis que le nombre d'orages est resté inchangé dans le sud-ouest de l'Allemagne. Malgré cette tendance globale, des variétés locales existent, où les tendances peuvent même être opposées ou incertaines [Pfahl et al., 2017]. Ceci est largement lié aux grands types de flux atmosphériques et à des forçages locaux (p.ex. occupation du sol, topographie) qui affectent les flux d'eau et d'énergie à l'échelle locale et par conséquent également la convection [Daniels et al., 2016 ; Giorgi et al., 2019 ; Thackeray et al., 2018].

En guise de conclusion, il reste à noter que les crues subites dans les régions septentrionales restent à ce jour un phénomène encore relativement rare, peu étudié et compris au niveau mécanistique. Au vu de l'augmentation des intensités de pluie extrêmes prévues par les modèles climatiques pour les décennies à venir, il est urgent d'étudier les processus en jeu dans la genèse des réponses hydrologiques à ce type d'événements. Les outils d'observation et de prévision conventionnels actuellement en service ont été développés pour des crues à large échelle – typiquement générées en période hivernale par des précipitations abondantes et peu intenses ('saturation excess overland flow'), étalées sur de vastes étendues et générant avant tout des inondations en plaine alluviale. Le caractère très ponctuel et difficilement prévisible des épisodes convectifs nécessitera quant à lui des outils d'observation à couverture spatiale et temporelle plus dense et flexible, de même que des outils de modélisation et de prévision prenant en compte la dynamique et connectivité de processus de type 'infiltration excess overland flow' à des échelles très locales.

**LITTÉRATURE**

- Acosta-Coll M., Ballester-Merelo F., Martinez-Peiró M., De la Hoz-Franco E. 2018. Real-time early warning system design for pluvial flash floods – A review. *Sensors* 18. doi:10.3390/s18072255.
- Brauer C., Teuling A., 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
- Daniels E., Lenderink G., Hutjes R., Holtslag A. 2016. Relative impacts of land use and climate change on summer precipitation in the Netherlands. *Hydrology and Earth System Sciences* 20: 4129–4142. doi:10.5194/hess-20-4129-2016.
- Defrance D. 2014. Adaptation et évaluation d'un système d'anticipation de crues éclair sur des bassins de montagne non-jaugés. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie & IRSTEA. 244 pp.
- Douinot A. 2016. Analyse des processus d'écoulement lors de crues à cinétique rapide sur l'arc méditerranéen. Université Paul Sabatier - Toulouse III. 223 pp.
- Doswell C.A., Brooks H.E., Maddox R.A. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Weather and forecasting* 11: 560-581. doi:10.1175/1520-0434.
- Gaume E., Bain V., Bernardara P., Newinger O., Barbuc M., Bateman A., Blaskovicova L., Blöschl G., Borga M., Dumitrescu A., Daliakopoulos I., Garcia J., Irimescu A., Kohnova S., Koutroulis A., Marchi L., Matreata S., Medina V., Preciso E., Sempere-Torres D., Stancalie G., Szolgay J., Tsanis I., Velasco D., Viglione A. 2009. A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology* 367: 70–78.
- Giorgi F., Raffaele F., Coppola E. 2019. The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections. *Earth System Dynamics* 10: 73–89. doi:10.5194/esd-10-73-2019.
- Gourley J.J., Erlingis J.M., Hong Y., Wells E.B. 2011. Evaluation of tools used for monitoring and forecasting flash floods in the United States. *Weather and Forecasting* 27: 158–173.
- Horton R.E. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 14: 446-460. doi:10.1029/TR014i001p00446.
- Kunz M., Sander J., Kottmeier C. 2009. Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. *International Journal of Climatology* 29: 2283–2297. doi:10.1002/joc.1865.
- Marchi L., Borga M., Preciso E., Gaume E. 2010. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology* 394: 118–133.
- Mathias L. 2019. Major flood event in the Mullerthal region on 1 June 2018: event analysis and predictability. *MeteoLux*. 17 pp.
- Ministère de l'Écologie. 2011. Plan submersions rapides. Submersions marines, crues soudaines et ruptures de digues. 79 pp.

- Morbidelli R., Corradini C., Saltalippi C., Flammini A., Brocca L., Govindaraju R.S. 2016. An investigation of the effects of spatial heterogeneity of initial soil moisture content on surface runoff simulation at a small watershed scale. *Journal of Hydrology* 539: 589-598. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.05.067.
- Müller E.N., Pfister A. 2011. Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. *Journal of Hydrology* 411: 266-278. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.10.005.
- Pfahl S., O’Gorman P.A., Fischer E.M. 2017. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change* 7: 423-428. doi:10.1038/NCLIMATE3287.
- Pfister L., Martínez-Carreras N., Hissler C., Klaus J., Carrer G.E., Stewart M.K., McDonnell J.J. 2017. Bedrock geology controls on catchment storage, mixing, and release: A comparative analysis of 16 nested catchments. *Hydrological Processes* 31: 1828-1845. doi:10.1002/hyp.11134.
- Piper D., Kunz M., Ehmele F., Mohr M., Mühr B., Kron A., Daniell J.E. 2016. Exceptional sequence of severe thunderstorms and related flash floods in May and June 2016 in Germany. Part I: Meteorological background. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16: 2835-2850.
- Raynaud D., Thielen J., Salamon P., Burek P., Anquetin S., Alfieri L. 2015. A dynamic runoff coefficient to improve flash flood early warning in Europe: evaluation on the 2013 central European floods in Germany. *Meteorological Applications* 22: 410-418. doi:10.1002/met.1469.
- Ruiz-Villanueva V., Borga M., Zoccatelli D., Marchi L., Gaume E., Ehret U. 2012. Extreme flood response to short-duration convective rainfall in South-West Germany. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16: 1543-1559. doi:10.5194/hess-16-1543-2012.
- Smith R.E., Goodrich D.C. 2005. Rainfall excess overland flow. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. doi:10.1002/0470848944.hsa117.
- Thackeray C.W., DeAngelis A.M., Hall A., Swain D.L., Qu X. 2018. On the connection between global hydrologic sensitivity and regional wet extremes. *Geophysical Research Letters* 45: 343-351. doi:10.1029/2018GL079698.
- Tandon N.F., Zhang X., Sobel A.H. 2018. Understanding the dynamics of future changes in extreme precipitation intensity. *Geophysical Research Letters* 45: 2870-2878. doi:10.1002/2017GL076361.
- Trenberth K.E., Dai A., Rasmussen R.M., Parsons D.B. 2003. The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 84: 1205-1217. doi:10.1175/BAMS-84-9-1205.
- Van Campenhout J., Hallot E., Houbrechts G., Peeters A., Levecq Y., Gérard P., Petit F. 2015. Flash floods and muddy floods in Wallonia: recent temporal trends, spatial distribution and reconstruction of the hydrosedimentological fluxes using flood marks and sediment deposits. *Belgeo – Revue Belge de Géographie* 1/2015. doi:10.4000/belgeo.16409.

**GLOSSAIRE**

Bassin versant	Ensemble d'une région ayant un exutoire commun pour ses écoulements de surface
Capacité d'infiltration	Quantité maximale d'eau qu'un sol dans des conditions données, peut absorber par unité de surface
Coefficient d'écoulement	Rapport entre le volume de pluie tombé et le volume de crue écoulé
Crue subite	Crue de courte durée avec un débit de pointe relativement élevé
Écoulement hortonien	Écoulement d'eau sur la surface du sol avant d'atteindre un cours d'eau
Évapotranspiration	Processus combinés par lesquels de l'eau est transférée à l'atmosphère du sol par évaporation et de la végétation par transpiration
Hydrogramme	Représentation graphique de la variation au cours du temps de certaines variables hydrologiques telles que niveau, débit, vitesse ou transport en suspension
Infiltration	Mouvement de l'eau pénétrant dans un milieu poreux depuis la surface du sol
Lame de pluie	Volume de pluie tombé sur un bassin, pendant un temps donné, divisé par la superficie de ce bassin
Lame écoulée	Volume total écoulé en provenance d'un bassin, pendant un temps donné, divisé par la superficie de ce bassin
Limnigraphe	Appareil enregistrant automatiquement le niveau de l'eau mesuré par un capteur, soit en continu soit à intervalles de temps régulier
Paroxystique	Le moment le plus extrême d'un phénomène
Pluviographe	Pluviomètre comportant un dispositif d'enregistrement des hauteurs de précipitation en fonction du temps
Précipitation convective	Précipitation due à des mouvements convectifs dans l'atmosphère
Ruissellement	Partie des précipitations qui s'écoule vers un cours d'eau à la surface du sol (ruissellement ou écoulement de surface) ou dans le sol (écoulement hypodermique ou ruissellement retardé)
Septentrional	Qui est situé au nord par rapport à un point donné
Temps de retour	Moyenne à long terme du temps ou du nombre d'années séparant un événement hydrologique ou météorologique d'un second événement d'une grandeur égale ou supérieure.



## 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]  
Audrey Douinot [contribution via le projet FNR-PPP Flashflood]  
Renaud Hostache  
Jean François Iffly  
Patrick Matgen  
Frank Minette

#### **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  
Christophe Gilbertz  
Daniel Göhlhausen  
Claude Meisch  
Noémie Patz

#### **Contact AGE**

1, Avenue du Rock'n'Roll  
L-4361 Esch-sur-Alzette  
Luxembourg

Une version détaillée de ce rapport est disponible sur le site web de l'Administration de la gestion de l'eau : [https://eau.public.lu/cours\\_eau/cruet\\_subites/index.html](https://eau.public.lu/cours_eau/cruet_subites/index.html)

© LIST, Esch-sur-Alzette | Juillet 2020