



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de la protection de la population OFPP

National Centre for Climate Services NCCS

Protection de la population et changement climatique

Fortes précipitations et planification d'engagement du service de protection et de sauvetage de Zurich



Impressum

Éditeur

Office fédéral de la protection de la population OFPP

CH-3003 Berne

www.protopop.ch

info@babs.admin.ch

Étude réalisée dans le cadre du National Centre for Climate Services (NCCS)

Élaboration

geo7 AG, geowissenschaftliches Büro

Neufeldstrasse 5–9

CH-3012 Berne

Peter Mani

Dr. Catherine Berger

Nicolas Lenz

Maike Schneider

Dr. Johannes Rempfer

Direction

Christoph Werner (OFPP)

Rainer Büchel (SRZ)

Oliver Kaupp (Stadtpolizei Zürich)

Markus Meile (SID Stadt Zürich)

Thomas Schlegel (MétéoSuisse)

Accompagnement

Norina Andres (WSL)

Prof. Dr. David Bresch (EPFZ, MétéoSuisse)

Jonas Eppler (AWEL canton ZH)

Dr. Michiko Hama (NCCS, MétéoSuisse)

Claudio Hauser (GVZ)

Dr. Roland Hohmann (OFEV)

Roberto Loat (OFEV)

Florian Mocka (GVZ)

Dr. Simon Scherrer (MétéoSuisse)

Image de titre : Schutz & Rettung Zürich, retravaillée par geo7 AG

Citation

OFPP publication (2019) : Fortes précipitations et planification d'engagement du service de protection et de sauvetage de Zurich – Étude réalisée dans le cadre du National Centre for Climate Services (NCCS). Office fédéral de la protection de la population (OFPP), Berne.

Mai 2019

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte.....	1
1.2	Objectifs et délimitation.....	1
1.3	Public cible.....	2
2	Modèle explicatif pour les interventions du SRZ	3
3	Données de base et préparation des données	4
3.1	Données relatives aux interventions.....	4
3.2	Données relatives aux précipitations	7
3.3	Données relatives aux dangers.....	8
3.3.1	Carte de dangers « eau »	9
3.3.2	Carte de dangers « ruissellement de surface »	10
3.4	Données relatives aux bâtiments.....	11
3.5	Données relatives à la population et aux zones d'habitation.....	11
4	Recherche d'une corrélation quantitative entre les interventions et les précipitations	12
4.1	Analyse exploratoire	14
4.1.1	Compilation des données d'intervention et de précipitations.....	14
4.1.2	Compilation des données d'intervention et de danger.....	17
4.1.3	Compilation des données d'intervention et de la densité de population.....	19
4.2	Analyse statistique.....	21
4.2.1	Transformation des axes principaux.....	21
4.2.2	Partitionnement des données.....	23
4.3	Catégorisation des interventions	24
4.4	Définition des évènements.....	26
4.5	Définition des seuils.....	28
4.6	Évaluation des seuils.....	32
5	Estimation de l'évolution du nombre d'interventions.....	37
5.1	Conséquences du changement climatique.....	37
5.2	Conséquences de la croissance démographique et de l'évolution des zones d'habitation.....	39

6	Résultats et aspects méthodologiques	42
6.1	Corrélation quantitative entre les interventions et les précipitations	42
6.2	Influence des processus de danger sur les interventions.....	43
6.3	Évolution future du nombre d'interventions.....	43
6.4	Aspects méthodologiques.....	44
6.4.1	Traitement d'une grande quantité de données.....	45
6.4.2	Synchronisation temporelle des données relatives aux précipitations.....	45
6.4.3	Prise en compte des aspects hydrologiques.....	45
7	Conclusions	46
7.1	Résultats.....	46
7.2	Travaux complémentaires envisageables.....	46
Annexe A	Données de base supplémentaires.....	48
Annexe A 1	Indications complémentaires sur les données d'intervention.....	48
Annexe A 2	Situations météorologiques.....	48
Annexe A 3	Subdivision de la Suisse en bassins versants	51
Annexe A 4	Revêtement du sol et coefficients d'écoulement.....	52
Annexe A 5	Carte de risques « inondations »	52
Annexe B	Aspects méthodologiques	55
Annexe B 1	Grandes quantités de données.....	55
Annexe B 2	Compilation géographique et temporelle des données.....	56
Annexe B 2.1	Compilation des données d'intervention et des données relatives aux précipitations	56
Annexe B 2.2	Compilation des données d'intervention et des données relatives aux bâtiments.....	57
Annexe B 2.3	Compilation des données d'intervention et des données relatives aux dangers.....	58
Annexe B 3	Analyse statistique.....	62
Annexe B 3.1	Transformation des axes principaux.....	62
Annexe B 3.2	Partitionnement des données.....	65

En bref

De nos jours, les événements naturels constituent un défi important pour les partenaires de la protection de la population (police, sapeurs-pompiers, services de santé publique, services techniques et protection civile) et cela pourrait encore s'accroître avec le changement climatique.

La présente étude, effectuée dans le cadre du National Centre for Climate Services (NCCS), analyse la corrélation entre les précipitations intenses et les interventions du service de protection et de sauvetage de Zurich (SRZ ; en allemand Schutz & Rettung Zürich). Elle permet également d'imaginer les modifications dérivant du changement climatique et des évolutions socioéconomiques auxquelles les forces d'intervention pourraient être confrontées à l'avenir. Les analyses se concentrent sur les événements majeurs pour les forces d'intervention et pas sur les interventions isolées. Cette étude crée les bases pour l'organisation des forces d'intervention et fournit des informations quant à leur sollicitation actuelle et future. Elle peut également servir pour l'estimation des moyens nécessaires.

Les analyses démontrent qu'il existe un lien quantitatif entre les précipitations et le nombre d'interventions de SRZ. Il faut cependant différencier les précipitations intenses de courte durée et les précipitations de longue durée. Un seuil au-delà duquel le SRZ peut s'attendre à une augmentation du nombre d'interventions (> 50 interventions en l'espace de 6 heures) a donc été établi pour chacun de ces scénarios. Le seuil pour les précipitations intenses de courte durée a été fixé à 15 mm durant les trois heures précédant l'intervention. Pour les précipitations de longue durée, le seuil a été fixé à 30 mm durant les 12 heures précédant l'intervention. Selon les données statistiques de différentes stations, il y a actuellement un événement tous les 2,33 ans. Ce sont donc les événements pluvieux majeurs pouvant survenir plus d'une fois par an qui ont été étudiés. Les seuils définis permettent au SRZ de se préparer de manière plus ciblée pour ces événements.

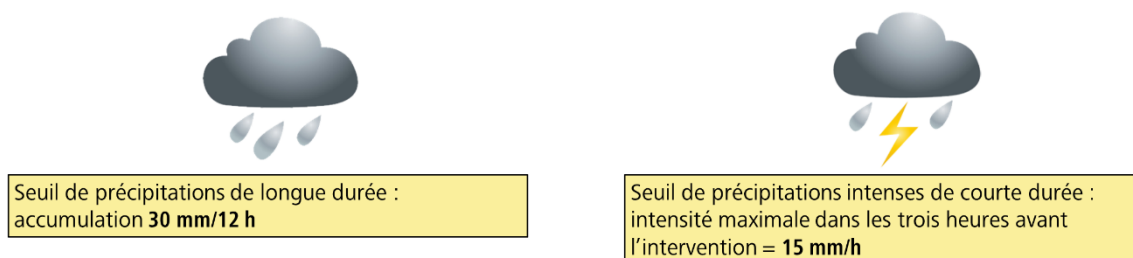


Illustration 1 : Rapport entre les fortes précipitations et les interventions du service de protection et de sauvetage de Zurich.

Environ 75 % des interventions du SRZ découlant de dangers relatifs à l'eau ont eu lieu dans des régions potentiellement menacées par le ruissellement de surface. Les 25 % restants concernent des régions menacées par des inondations par des cours d'eau ou des lacs. Les deux types de menaces peuvent également survenir simultanément. 20 % des interventions ont lieu en dehors des deux types de régions à risque.

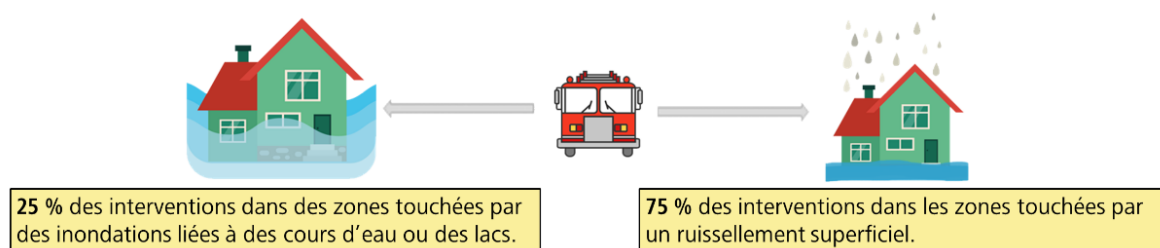


Illustration 2 : Rapport entre les interventions et les types de menace « inondation » et « ruissellement de surface ».

D'après les connaissances actuelles, le changement climatique devrait avoir une faible influence sur le nombre d'interventions du SRZ relatives à l'eau jusqu'en 2040. Les estimations indiquent en effet que le nombre d'événements dépassant les seuils de précipitations établis par la présente étude passera en moyenne de cinq à six par année parmi lesquels seuls 20 % constitueront un événement important pour le SRZ. Comparé aux variations interannuelles actuelles, ce changement est faible. À l'inverse, la période allant de 2070 à 2099 devrait amener une augmentation des précipitations intenses de 20 à 30 % sur le versant nord des Alpes et le nombre d'événements importants pour le SRZ devrait augmenter en conséquence.

L'augmentation du nombre d'interventions du SRZ prévue dans un futur proche est davantage liée à la croissance démographique et à l'évolution des zones d'habitation qu'au changement climatique. D'ici 2040, il faudra compter avec une nette augmentation du potentiel de dommages dans les régions à risque. La population devrait en effet y augmenter de 25 % d'ici 2030 et de 30 % d'ici 2040, ce qui entraînera une augmentation du nombre d'interventions.

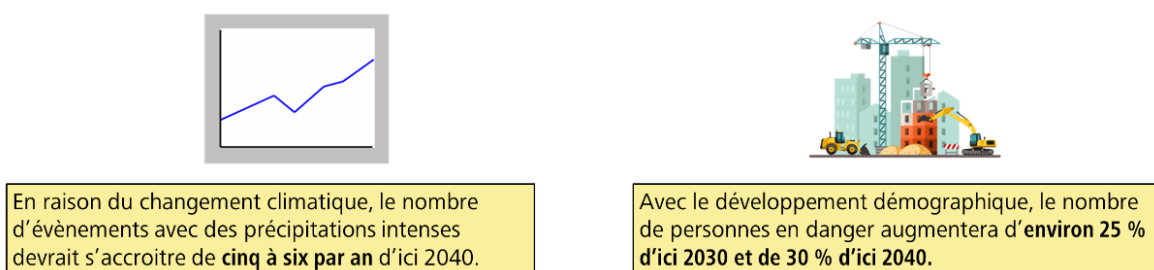


Illustration 3 : Évolution future du nombre d'interventions en raison du changement climatique, de la croissance démographique et de l'évolution des zones d'habitation.

Outre ces résultats, l'étude fournit une méthode d'analyse applicable à d'autres questionnements similaires ou à d'autres régions dans lesquelles le rapport entre les précipitations et les interventions des organisations de sauvetage doit être examiné. Les conclusions similaires peuvent également être transposées à d'autres dangers.

1 Introduction

1.1 Contexte

Les évènements naturels (p. ex. fortes intempéries, tempêtes, grêle et canicules) sont un défi majeur pour la protection de la population et en particulier pour ses partenaires (sapeurs-pompiers, protection civile et états-majors). En raison du changement climatique, le nombre et l'intensité des évènements climatiques extrêmes ([16], [25], [26]) devraient augmenter. On constate déjà une augmentation significative des précipitations intenses dans de nombreuses régions [25]. Cela aura des répercussions tant sur l'étendue des dommages que sur la fréquence et l'envergure des interventions des organisations d'urgence. Les inondations causent déjà de nombreux dégâts chaque année et nécessitent l'intervention du service de protection et de sauvetage de Zurich (ci-après SRZ).

Différentes publications (p. ex. [11], [12], [14]) ont déjà montré que le changement climatique est un défi pour la protection de la population. Les conséquences réelles ou les mesures à mettre en place pour les maîtriser n'ont cependant presque jamais été examinées. La présente étude analyse les rapports entre les précipitations intenses et les interventions du SRZ. Les modifications attendues et les exigences futures liées au changement climatique et à d'autres variables seront décrites en termes qualitatifs et si possible en termes quantitatifs pour un horizon de 15 à 20 ans.

1.2 Objectifs et délimitation

La présente étude « Fortes précipitations et planification d'engagement du service de protection et de sauvetage de Zurich » examine la corrélation entre les précipitations intenses et les interventions des sapeurs-pompiers en qualité d'étude pilote. Des connaissances concernant le rapport entre les précipitations et les évènements dommageables en lien avec des inondations ou le ruissellement de surface sont nécessaires pour pouvoir déclencher l'alarme et prendre des mesures préventives. Les « Flash flood guidances » [27] couramment utilisées aux États-Unis ou le système d'alarme NoePAL [24], actuellement développé par l'Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse), en sont deux exemples parlants. La présente étude ne met cependant pas l'accent sur le déclenchement du processus, mais sur le déclenchement d'un nombre important d'interventions pour le SRZ. Les points suivants seront examinés :

- Influence quantitative des précipitations sur les interventions :
Le seuil de précipitations à partir duquel il faut s'attendre à un nombre plus important d'interventions du SRZ est établi. L'influence de divers autres facteurs sur le déclenchement d'une intervention (p. ex. la mise en danger) est également prise en compte.
- Estimation des changements à venir pour les futures interventions :
Les modifications futures des interventions sont estimées de manière qualitative et si possible quantitative sur la base du rapport entre précipitations et interventions et au moyen de scénarios climatiques et de variables supplémentaires. L'horizon temporel de l'étude concerne les 15 à 20 prochaines années.

Les données relatives aux interventions du SRZ découlant de dangers liés à l'eau durant la période 2005–2018 ont servi de base pour la présente étude. Les scénarios futurs qui ont

été examinés se concentrent sur les 15 à 20 prochaines années et sur le territoire du canton de Zurich.

La présente étude doit servir de base pour des analyses similaires dans d'autres cantons ou pour d'autres types de dangers. C'est pourquoi, outre ses conclusions, elle présente en détail la procédure et la méthodologie utilisées.

Le chapitre deux présente un modèle explicatif permettant d'illustrer la procédure utilisée pour déterminer la corrélation actuelle et future entre les fortes précipitations et les interventions. Les chapitres trois à cinq décrivent sa mise en œuvre concrète, le chapitre six présente les résultats et l'évaluation de la méthodologie et le chapitre sept établit des conclusions et fournit des recommandations sur les étapes à venir. Les annexes contiennent des indications complémentaires concernant les données (7.2Annexe A) et la méthodologie (7.2Annexe B).

1.3 Public cible

Le présent rapport décrit d'une part les résultats de l'étude et d'autre part la méthodologie qui a été élaborée et utilisée. Il s'adresse donc à différents groupes cibles :

- Acteurs de la protection de la population :
Le SRZ et les organisations similaires, mais aussi les services cantonaux et divers offices fédéraux s'intéresseront avant tout aux résultats concrets de l'étude. Cela devrait également être le cas dans d'autres cercles (p. ex. les établissements d'assurance immobilière).
- Offices spécialisés et organisations :
Les offices spécialisés comme l'OFPP, MétéoSuisse ou le NCCS s'intéresseront non seulement aux résultats concrets, mais également aux aspects méthodologiques. Ceux-ci peuvent en effet servir de base pour traiter des questionnements similaires en relation avec les défis posés par le changement climatique.

2 Modèle explicatif pour les interventions du SRZ

Afin de rendre la présente étude, qui servira d'étude pilote (voir chap. 1.2), plus transparente et compréhensible, un modèle explicatif simple a été élaboré pour décrire les interventions du SRZ liées aux dangers relatifs à l'eau. Il se concentre sur le rapport entre les précipitations et le nombre d'interventions. Lorsque cela s'impose, différentes variables complètent ce modèle.

Un processus « par étapes » a été mis en place. Dans un premier temps, les données de base concernant les interventions du SRZ (🚒), les précipitations (☁️) et d'autres variables explicatives (📍) comme les informations relatives au danger ont été rassemblées dans une banque de données (🗄️), puis mises en relation (Illustration 4, en haut et en bas à gauche). Au moyen d'analyses exploratoires, des hypothèses ont été formulées avant d'être vérifiées à l'aide d'analyses statistiques (📊) et d'études approfondies dans un système d'information géographique (Illustration 4, en bas au milieu). La validité du modèle explicatif qui en ressort a ensuite été confirmée ou infirmée. Enfin, les modifications de la fréquence des interventions (📈) ont été estimées grâce à des scénarios climatiques et des variables évolutives comme l'augmentation de la population et de la surface des zones d'habitation (Illustration 4, en bas à droite).

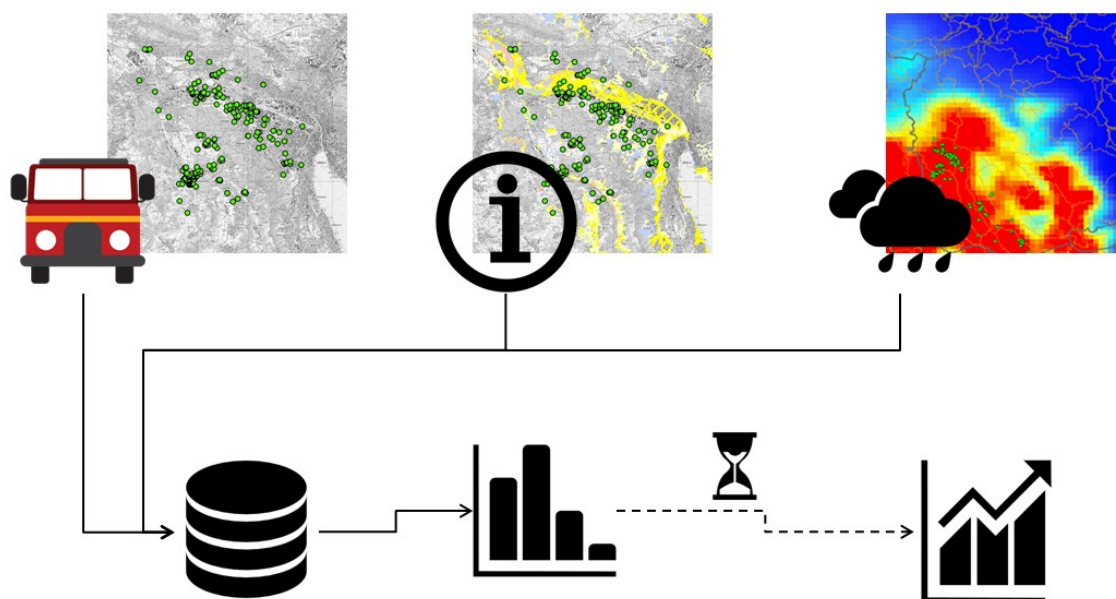


Illustration 4 : Structure du modèle explicatif et déroulement de l'étude : les données relatives aux interventions et aux précipitations et d'autres variables explicatives sont réunies dans une banque de données géographique. Le rapport entre les précipitations et les interventions du SRZ est examiné au moyen d'analyses statistiques et l'évolution du nombre d'interventions est estimée.

Afin de certifier la transparence et la clarté des différentes étapes de travail, ces dernières ont été conservées dans des scripts. Cela permet de garantir un traitement efficace, de sauvegarder la documentation relative aux procédures utilisées et de recalculer les résultats à plusieurs reprises.

3 Données de base et préparation des données

Ce chapitre décrit les données de bases qui ont été utilisées pour le modèle explicatif relatif aux interventions du SRZ (chap. 2). Les données qui ont été analysées mais qui n'ont finalement pas été retenues pour le modèle explicatif sont décrites dans l'Annexe A.

3.1 Données relatives aux interventions

La présente étude se base sur les données tirées de plus de 16 000 interventions du SRZ relatives à des intempéries ou des dangers liés à l'eau ayant eu lieu dans le canton de Zurich entre juillet 2005 et janvier 2018.

La présente étude se base sur les alertes reçues par le SRZ concernant des intempéries et/ou des dangers liés à l'eau. Par souci de simplification, ces alertes sont considérées ci-après comme des interventions concrètes du SRZ. Il s'agit de géodonnées avec divers attributs comme la date et l'heure de l'alerte, le type d'intervention et son urgence (Tableau 9 de Annexe A 1). Aucune information n'était disponible quant à la durée des diverses interventions ou au nombre de personnes engagées. 16 289 données relatives aux interventions ont été livrées, parmi lesquelles 16 237 se sont déroulées sur le territoire zurichois. Celles-ci constituent la base pour les analyses ultérieures (Illustration 5).

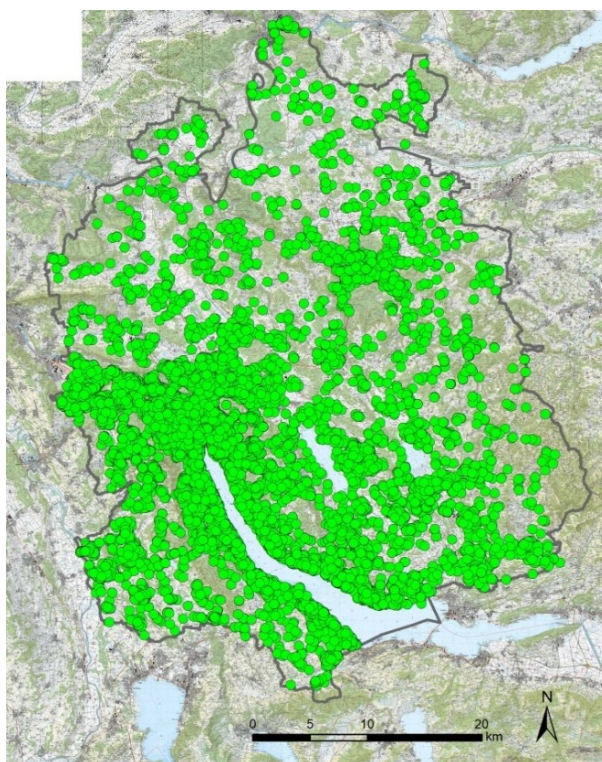
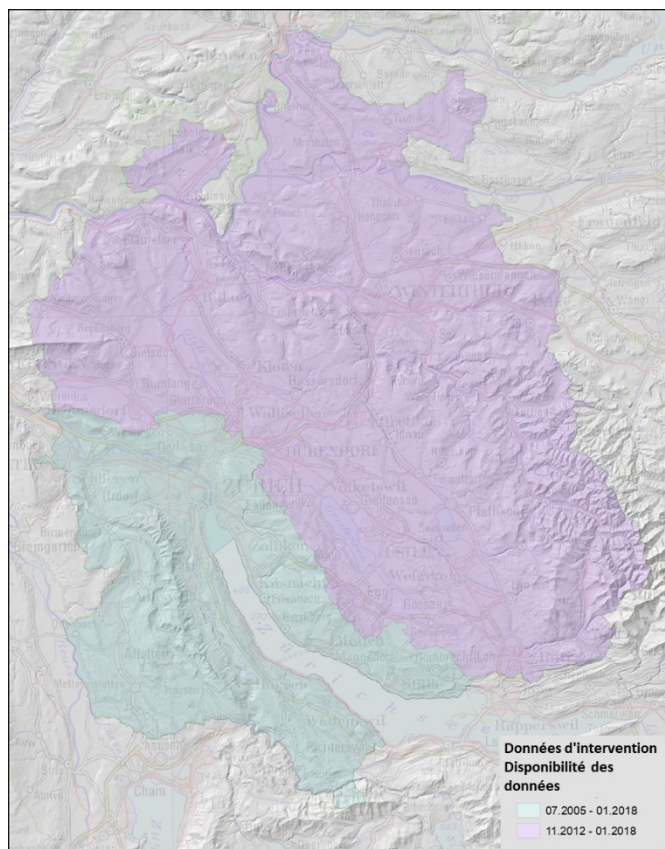


Illustration 5 : Données relatives aux interventions du SRZ en rapport avec les intempéries et/ou les dangers liés à l'eau sur le territoire zurichois entre le 6.7.2005 et le 7.1.2018. Données de base : [5], PK25 © 2017 swisstopo.

Les données d'intervention concernent la période du 6.7.2005 au 7.1.2018. Seules les données concernant la partie sud du canton (illustration 6) sont disponibles pour la période du 6.7.2005 au 11.11.2012. Dans ce contexte, il est important de noter que, depuis le 12.11.2012, le SRZ reçoit les alertes de tout le canton de Zurich, mais n'intervient que sur le territoire de la ville de Zurich et éventuellement de manière subsidiaire dans d'autres communes.



Total
Nb d'interventions : 16'237
Zone concernée : tout le canton ZH

Date : 07.2005–11.2012
Nb d'interventions : 8'763
Zone concernée : partie sud (en bleu)

Date : 11.2012–01.2018
Nb d'interventions : 7'474
Zone concernée : tout le canton ZH

Illustration 6 : Disponibilité des données d'intervention du SRZ. Seules les données concernant la partie sud du canton (en bleu) sont disponibles pour la période du 6.7.2005 au 11.11.2012. Les données du 12.11.2012 au 7.1.2018 concernent tout le territoire zurichois [5].

Les deux périodes avant et après 2012 diffèrent également en ce qui concerne la qualité des informations sur le type et l'urgence des interventions. Toutes les interventions de la période 6.7.2005–31.1.2012 portent l'attribut « inondation/intervention liée à l'eau », ce qui ne permet pas de différencier les interventions d'ordre général (p. ex. rupture de canalisation) des interventions liées aux intempéries. En outre, aucune information quant à l'urgence des interventions n'est disponible. En revanche, pour les données à partir du 1.2.2012 des informations plus détaillées sont disponibles (Tableau 1).

Le code « type d'intervention » donne des indications importantes sur la raison pour laquelle l'alerte a été déclenchée (Tableau 1 et Illustration 7, gauche). La présente étude se concentre sur les interventions déclenchées en raison de fortes précipitations. Les interventions de type « arbre/branche (intempérie) » et « indéfini » ne sont donc pas prises en compte dans les évaluations. Des doutes restent quant à la différenciation entre les autres

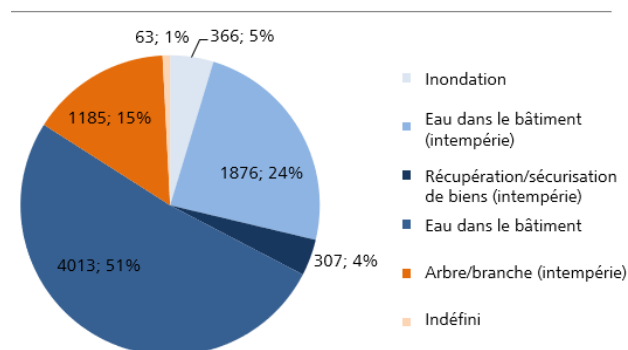
types d'intervention. Cette information est en effet saisie au moment où le SRZ reçoit l'alarme et ne sait pas encore avec certitude de quel type d'intervention il s'agit. Il se peut que le type d'intervention saisi change durant une intervention suite à la réception d'un plus grand nombre d'alertes, passant par exemple de la catégorie générale « eau dans le bâtiment » à « inondation ».

Les informations concernant l'urgence des interventions ne sont disponibles qu'à compter du 1.2.2012. On distingue les catégories « avec » et « sans mise en danger de personnes ou de biens » (Illustration 7, droite).

Tableau 1 : Différents attributs pour les interventions du SRZ selon la période, le type d'intervention/le code et le nombre d'interventions par catégorie (selon [5]).

Période	Type d'intervention / Code	Nombre d'interventions	
06.07.2005–07.01.2018	Tous	16 237	(100 %)
06.07.2005–31.01.2012	Inondation/intervention liée à l'eau sans informations détaillées	8427	(52 %)
01.02.2012–07.01.2018	Inondation	366	(2 %)
	Eau dans le bâtiment (intempérie)	1876	(12 %)
	Récupération/sécurisation de biens (intempérie)	307	(2 %)
	Eau dans le bâtiment (sans information quant à son origine)	4013	(25 %)
	Arbre/branche (intempérie)	1185	(7 %)
	Indéfini	63	(0 %)

Type d'intervention



Urgence

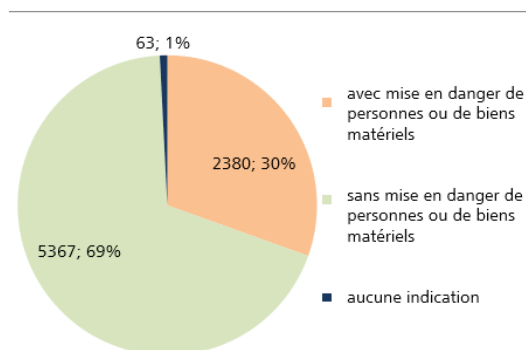


Illustration 7 : Interventions entre le 1.2.2012 et le 7.2.2018 d'après leur type (gauche) et leur urgence (droite) (selon [5]).

Les données d'intervention basées sur la mensuration nationale MN03 ont été transposées dans le nouveau système de coordonnées MN95 à l'aide de l'outil REFRAME de swisstopo afin de pouvoir poursuivre les travaux et procéder à des comparaisons avec des données supplémentaires.

3.2 Données relatives aux précipitations

Les données relatives aux précipitations permettent de justifier les interventions du SRZ. Des données tirées des radars et des stations météorologiques sont disponibles pour tout le canton avec une résolution géographique d'1 km² et une résolution temporelle d'une heure.

Les données CombiPrecip de MétéoSuisse [21] disponibles pour le canton de Zurich constituent la base d'évaluation des événements pluvieux majeurs pour le SRZ. Les données tirées de radars et de stations météorologiques sont combinées en champs de précipitations au moyen d'analyses géostatistiques puis cumulées en valeurs de précipitations pour une heure et pour une résolution géographique d'1 km². On ne peut pas exclure une certaine imprécision pour les données des radars. En effet, les gouttes de pluie enregistrées par un radar à plusieurs kilomètres d'altitude peuvent par exemple être soufflées vers une cellule voisine par une rafale de vent. La présente étude n'utilise donc pas la valeur d'une unique cellule de la grille, mais la moyenne d'une fenêtre coulissante de 3 x 3 cellules.

Pour la suite des travaux, les données relatives aux précipitations sont rassemblées dès leur préparation en sommes par x heures (x pouvant représenter 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48, ou 72 heures avant une intervention du SRZ) ou en maximales par x heures (soit la somme par heure maximale dans une période de x heures ; équivaut à l'intensité des précipitations) (Illustration 8).

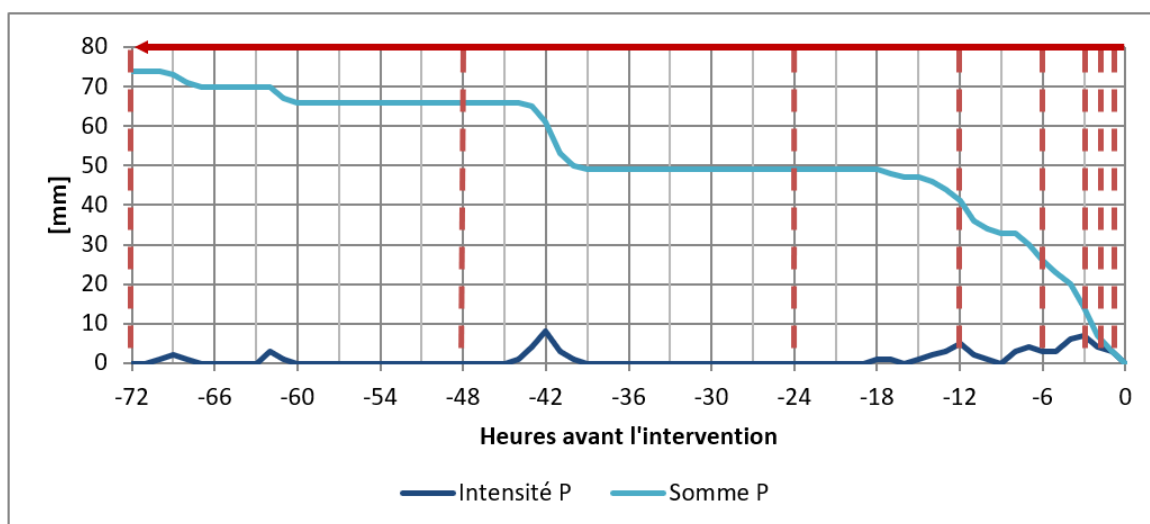


Illustration 8 : Représentation schématique de l'obtention des paramètres « intensité des précipitations » et « somme des précipitations » pour les différentes durées étudiées (1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 ou 72 heures avant une intervention, lignes rouges).

3.3 Données relatives aux dangers

Les indications concernant les dangers liés aux inondations ou au ruissellement de surface sur les lieux d'intervention sont disponibles sur la carte de dangers « eau » et la carte de dangers « ruissellement de surface ». Ces informations permettent de préciser les motifs des interventions du SRZ.

Les précipitations intenses peuvent provoquer différents dangers naturels. Il est donc nécessaire de clarifier s'il y a d'autres dépendances et modèles explicatifs entre les interventions et les processus de dangers. Les processus de dangers naturels suivants sont au cœur de l'analyse :

- Inondation par des cours d'eau (rivières, fleuves) ou des lacs (chap. 3.3.1)
Une inondation est la submersion temporaire d'un terrain par de l'eau. On parle d'épandage d'alluvions lorsque des débris charriés par l'eau se déposent sur la surface inondée.
- Inondation par ruissellement de surface (chap. 3.3.2)
Par ruissellement de surface, on entend la part des précipitations qui s'écoule sur le sol immédiatement après l'avoir touché.

La surcharge des évacuations des eaux dans les zones d'habitation et l'augmentation du niveau des nappes phréatiques sont d'autres processus en lien avec des précipitations intenses qui peuvent causer des dommages et mener à des interventions. Il n'existe cependant pas de données de base pour ces dangers. De plus, ils surviennent souvent en même temps que les inondations et/ou le ruissellement de surface et les données peuvent donc difficilement leur être attribuées de manière évidente en cas d'événement. Ces processus ne sont par conséquent pas spécialement pris en compte dans la présente étude.

Les bases décrites ci-après et la carte de dangers « eau » (chap. 3.3.1) et la carte de dangers « ruissellement de surface » (chap. 3.3.2) sont utilisées pour attribuer les données d'intervention du SRZ au processus prédominant (voir aussi 7.2 Annexe B 2.3).

3.3.1 Carte de dangers « eau »

La carte de dangers « eau » illustre le danger d'inondation par des cours d'eau ou des lacs encouru par une région. Des cartes sont disponibles pour l'ensemble du canton de Zurich, qui indiquent notamment la zone d'habitation dans son ensemble. Pour les régions dont les cartes de dangers étaient en révision au moment de l'élaboration de la présente étude (Kleinandelfingen, Andenfinger, Dielsdorf, Winterthur, Illnau-Effretikon, Wald, Gossau, Küssnacht, Horgen, Wädenswil, état au 1.1.2017), les anciennes données à disposition ont été utilisées [8]. Si des indications concernant les dangers liés à l'eau étaient disponibles en dehors du périmètre de la carte de dangers, celles-ci ont été reprises (Illustration 9). Le danger lié au ruissellement de surface n'est pas indiqué sur la carte de dangers « eau ».

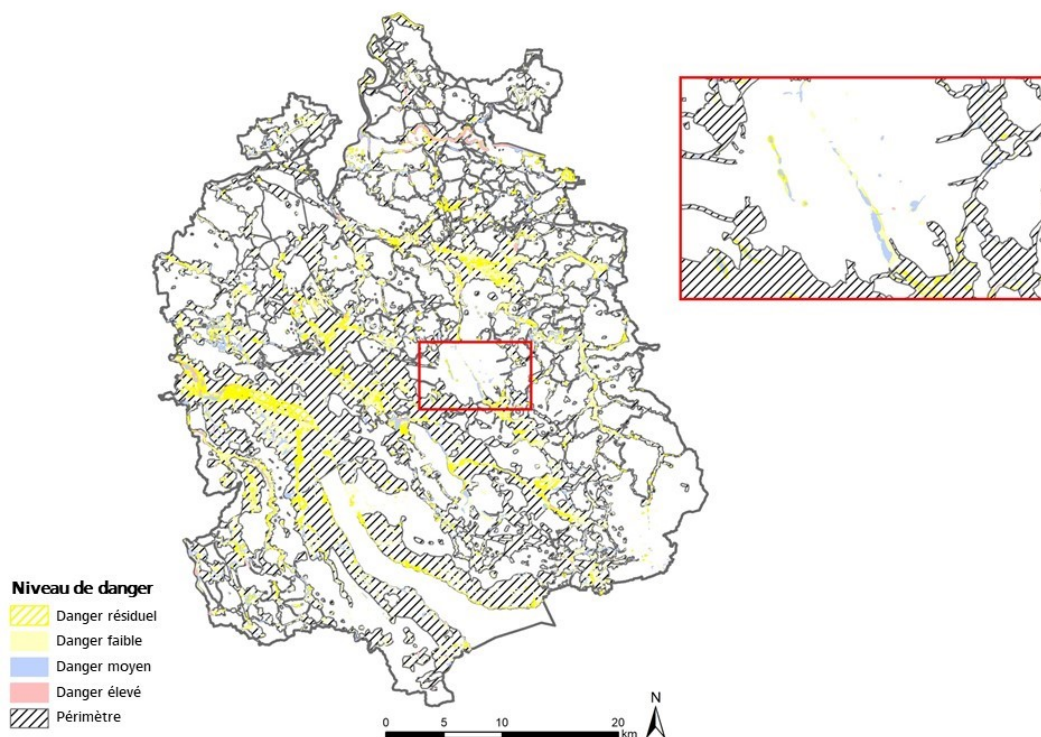


Illustration 9 : Périmètre de la carte de dangers « eau » du canton de Zurich [8].

Si des données concernant les dangers étaient disponibles en dehors du périmètre (voir détail de la carte en haut à droite), celles-ci ont été reprises.

Si le SRZ est intervenu dans une région à risque d'après la carte de dangers « eau » (zones en rouge, bleu, jaune et blanc-jaune), on part du principe que l'intervention a peut-être été déclenchée à cause d'inondations par des cours d'eau ou des lacs. Pour les lieux d'intervention situés en dehors des régions à risque (zones blanches), le processus déclencheur « inondation par des cours d'eau » est en revanche considéré improbable (voir

chap. 4.1.2). Lorsqu'une intervention a eu lieu dans le périmètre, mais sans informations détaillées concernant le danger, cela a été indiqué. De plus amples informations sont disponibles dans Annexe B 2.3.

3.3.2 Carte de dangers « ruissellement de surface »

Cette carte de dangers est disponible pour tout le territoire suisse depuis juillet 2018 [7], [18]. On y trouve les chemins que le ruissellement de surface suivra probablement, les régions potentiellement à risque et les hauteurs d'écoulement classées auxquelles il faut s'attendre (Illustration 10).



Illustration 10 : Extrait de la carte de dangers « ruissellement de surface » [7].

Lorsque l'eau pénètre dans un sous-sol, raison principale pour les interventions du SRZ liées à l'eau, la hauteur d'écoulement au niveau du rez-de-chaussée importe peu. Pour les évaluations supplémentaires, les hauteurs d'écoulement ne sont donc pas considérées et seules les catégories « potentiellement touché par le ruissellement de surface : oui ou non » le sont. De plus amples informations sont disponibles dans Annexe B 2.3.

Les dangers relatifs aux eaux courantes ou stagnantes et aux cours d'eau souterrains ou aux évacuations des eaux de zones habitées ne sont pas pris en compte sur la carte de dangers « ruissellement de surface ». Son contenu constitue une information concernant les dangers. La cartographie du ruissellement de surface atteint parfois ses limites dans les zones urbaines ou densément peuplées en raison de petites structures comme les murets, les bordures, etc.

Les interventions du SRZ qui ont eu lieu dans la région à risque (en violet, Illustration 10) sont considérées comme ayant potentiellement été déclenchées par le ruissellement de surface.

Lorsqu'une intervention a eu lieu en dehors des zones à risques définies dans la carte de dangers « eau » ou la carte de dangers « ruissellement de surface », aucune déduction ne peut être formulée quant au processus déclencheur (voir chap. 4.1.2).

3.4 Données relatives aux bâtiments

La comparaison entre les données pour un point précis et la banque de données sur les bâtiments du canton de Zurich permet de voir si un lieu d'intervention se situe à l'intérieur d'un bâtiment ou à l'extérieur. En partant du principe que le danger est constant à l'intérieur d'un bâtiment, cette information est particulièrement importante pour déduire quelle est la situation de danger sur un lieu d'intervention.

Les interventions du SRZ sont localisées par un point précis. Afin d'analyser les interventions plus précisément, elles sont comparées avec la banque de données sur les bâtiments tirée de la mensuration officielle du canton de Zurich (voir chap. 4.1.2 et Annexe B 3). Celle-ci contient huit catégories différentes de bâtiments [2]. Pour le traitement de la présente étude, seules les catégories « Bâtiments oui ou non » sont prises en compte. Il est important de savoir si un lieu d'intervention se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur d'un bâtiment afin de greffer les données d'intervention aux données relatives aux dangers (voir chap. 4.1.2 et Annexe B 2.3).

3.5 Données relatives à la population et aux zones d'habitation

La densité de population constitue un indicateur pour la densité d'habitations et une mesure simple pour les dommages potentiellement causés à une zone d'habitation.

La densité de population constitue un indicateur pour la densité d'habitations et par conséquent une mesure simple pour les dommages potentiellement causés à une zone d'habitation. De même, l'évolution de la densité de la population est utilisée comme un indicateur pour l'évolution des zones d'habitation et donc pour l'évolution des « dommages potentiels pour une zone d'habitation ». Lorsqu'une région avec un haut potentiel de dommages et une grande vulnérabilité des objets (p. ex. centre-ville) est touchée par des inondations, les forces d'intervention seront probablement engagées plus tôt que s'il s'agit d'une région faiblement peuplée. La densité de la population est donnée par hectare dans la banque de données STATPOP de l'Office fédéral de la statistique [3]. Pour des raisons de protection des données, la valeur 3 est attribuée aux hectares avec moins de trois habitants. Les données relatives à la population concernent l'année 2010.

4 Recherche d'une corrélation quantitative entre les interventions et les précipitations

Afin de quantifier l'influence des précipitations sur les interventions relatives à l'eau, des seuils de précipitations au-delà desquels il faut compter avec une augmentation du nombre d'interventions du SRZ ont été établis. L'étude se concentre sur les événements majeurs pour les forces d'intervention et pas sur les interventions isolées.

La recherche de dépendances quantitatives entre les interventions et les précipitations constitue une part centrale du modèle explicatif pour les interventions du SRZ liées à l'eau (chap. 1.2). Des seuils de précipitations indiquent à partir de quelle quantité et/ou de quelle intensité de précipitations on peut compter avec une augmentation du nombre d'interventions du SRZ. Ces seuils ont été recherchés et établis et leur plausibilité vérifiée.

Plusieurs étapes ont été nécessaires pour trouver les seuils. La préparation des données présentées au chapitre 3 a servi de base pour la recherche. Des évaluations exploratoires et statistiques ont ensuite été réalisées. Elles seront décrites dans les sous-chapitres 4.1 et 4.2. Ces évaluations ont permis de catégoriser les interventions d'après le type de précipitations qui les a déclenchées (chap. 4.3).

L'illustration 11 présente de manière schématique le flux de données de la préparation des données (chap. 3) à la catégorisation (chap. 4.3) avec les interventions prises en compte. 16 237 interventions sur 16 289 ont eu lieu dans le canton de Zurich. Seules 16 193 d'entre elles ont pu être enrichies par des indications de précipitations en raison de données météorologiques incomplètes. Pour des questions d'homogénéité, ce sont les données après novembre 2012 qui ont été prises en compte pour catégoriser les interventions et seules 6 548 d'entre elles sont liées au danger représenté par l'eau (chap. 3.1, Tableau 1). Ces données permettent d'élaborer une catégorisation applicable à toutes les interventions qui ont pu être associées à des données météorologiques.

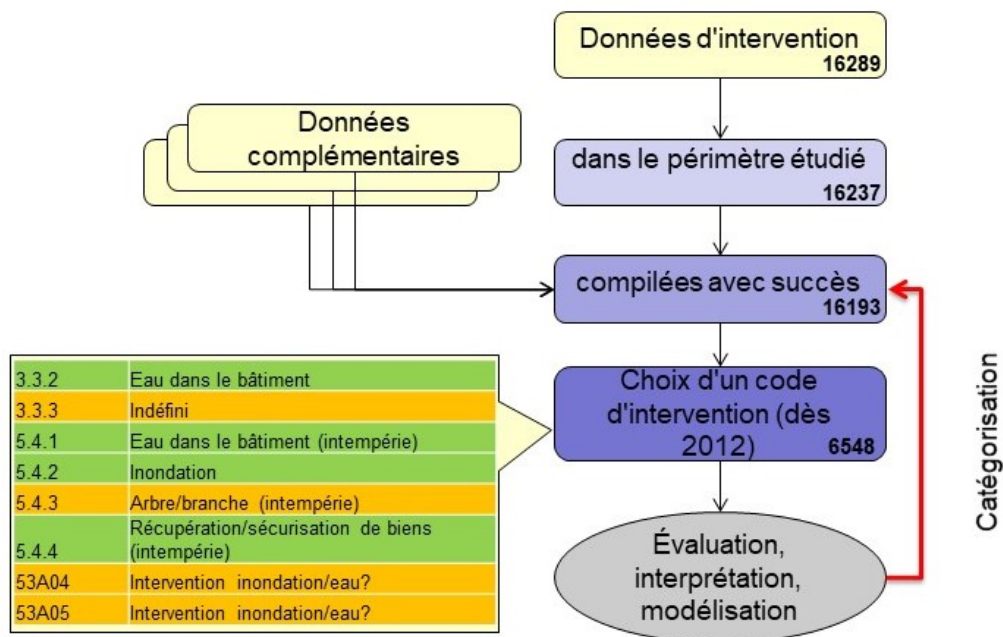


Illustration 11 : Flux de données jusqu'à la catégorisation dans le cadre de l'étude « Fortes précipitations et planification d'intervention du SRZ ». Seules les types d'intervention en vert (tableau en bas à gauche) ont été pris en compte.

Après avoir été catégorisées, les interventions sont attribuées à un évènement pluvieux qui a eu lieu dans un délai proche. La procédure utilisée est décrite au chapitre 4.4. Enfin, les chapitres 4.5 et 4.6 présentent la définition finale des seuils et leur vérification.

4.1 Analyse exploratoire

La comparaison temporelle et géographique des données d'intervention et de précipitations montre clairement qu'il existe un rapport entre les précipitations et les interventions lorsque le nombre d'interventions du SRZ augmente. Il convient cependant de distinguer deux types de précipitations :

- Précipitations intenses de courte durée : la pluie s'abat localement et intensément. Il existe une forte corrélation avec les interventions du SRZ.
- Précipitations de longue durée : les précipitations et les interventions qui en découlent s'étalent sur des régions plus grandes et une durée plus importante.

Les événements suivis d'une ou de quelques interventions du SRZ ne sont d'ordinaire pas clairement liés à des précipitations.

La compilation des données d'intervention et des informations sur les dangers démontre que 25 % des interventions du SRZ liées à l'eau ont lieu dans des régions menacées par des inondations relatives à des cours d'eau ou à des lacs. Les 75 % restants ont lieu dans des régions menacées par le ruissellement de surface, ce qui met l'accent sur ce phénomène jusqu'ici peu considéré dans les études.

Le nombre d'interventions est proportionnel à la densité de la population et par conséquent au potentiel de dommages d'une région. Outre la densité de la population, c'est la situation de danger d'une région qui est déterminante pour le nombre d'interventions qui y ont lieu.

Les données préparées (chap. 3) sont analysées afin d'examiner les rapports entre les données relatives aux interventions, aux précipitations et aux dangers. Les conclusions qui en sont tirées constituent les bases pour d'autres évaluations statistiques (chap. 4.2).

4.1.1 Compilation des données d'intervention et de précipitations

Différents paramètres de précipitations ont été utilisés pour examiner la corrélation entre les interventions et les précipitations : d'une part les sommes des précipitations pour diverses périodes avant l'intervention, d'autre part l'intensité maximale des précipitations (mm/h) durant ces mêmes périodes (chap. 3.2 et Annexe B 2.1).

Il faut noter que les appels de détresse entrants dépendent non seulement de l'intensité et de la quantité des précipitations, mais également du lieu (des personnes ou des biens matériels sont-ils touchés ?) et de l'instant (les personnes sont-elles éveillées et présentes et remarquent-elles les dommages ?) auquel les précipitations et l'inondation qui en découle se produisent.

Une première évaluation des paramètres de précipitations concernant toutes les interventions liées à l'eau depuis 2012 (sans les catégories « arbre/branche » et « indéfini », voir Tableau 1 et Illustration 11) a montré que la question du seuil de précipitations à partir duquel des interventions isolées sont déclenchées n'est pas concluante. Illustration 12 montre en effet que 50 % des interventions ont suivi des sommes de précipitations pour 1, 3 et 6 heures inférieures à un millimètre. 50 % des interventions ont suivi une somme de précipitations pour 12 heures de 2 mm ou moins et une somme pour 24 heures de 5 mm.

L'intensité des précipitations durant les x heures précédant l'intervention donne des résultats similaires. La moitié des interventions pour les périodes de 1 à 12 heures avant l'intervention indiquent une intensité maximale de 1 mm/h. Pour la période de 24 heures avant l'intervention ce chiffre atteint 2 mm/h. Ces chiffres ne peuvent pas servir de seuils de précipitations puisqu'ils seraient dépassés très souvent.

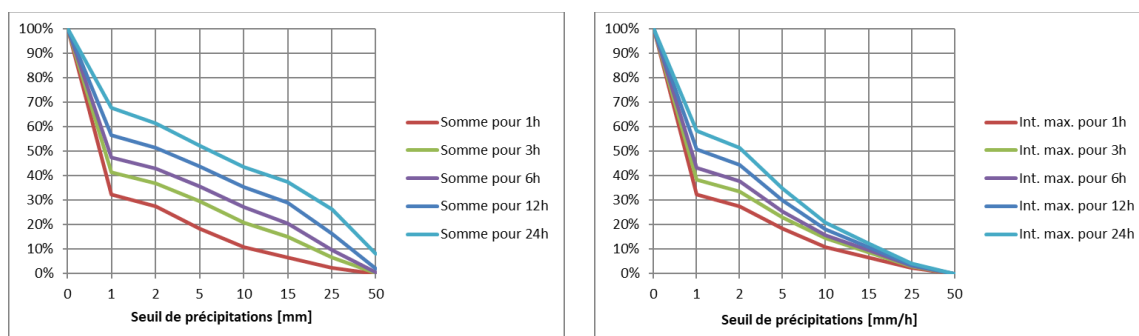


Illustration 12 : Nombre d'interventions en pourcent d'après la somme de précipitations pour x heures (gauche) et l'intensité maximale des précipitations durant les x heures avant l'intervention (droite).

Dans un second temps, les différents paramètres de précipitations ont été intégrés dans le SIG avec les données d'intervention, l'analyse se limitant aux périodes avec un nombre élevé d'interventions. Les cartes ont ainsi pu être animées à l'aide du curseur temporel du SIG (illustration 13 et illustration 14 pour l'évènement du 7-8 juin 2015).

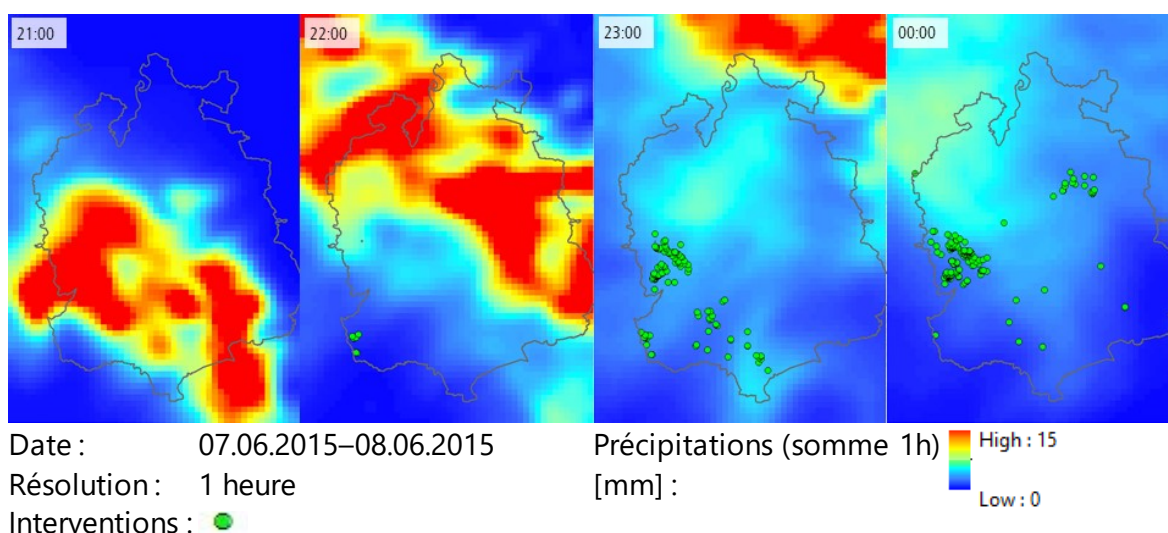


Illustration 13 : Visualisation de l'intempérie du 7-8 juin 2015 (somme de précipitations pour 1 heure) et des interventions consécutives du SRZ durant la période [4], [5].

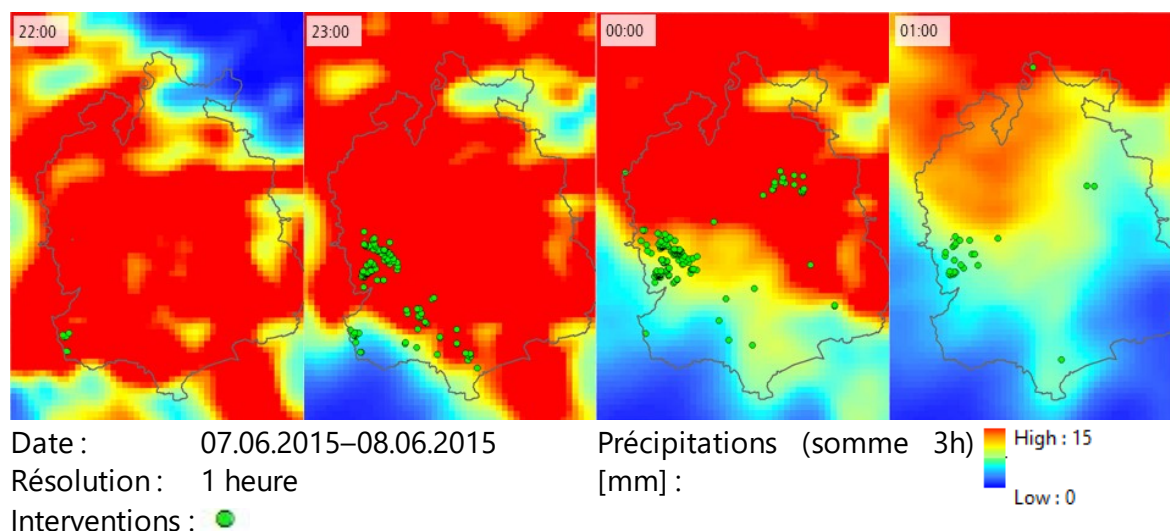


Illustration 14: Visualisation de l'intempérie du 7-8 juin 2015 (somme de précipitations pour 3 heures) et des interventions consécutives du SRZ durant la période [4], [5].

L'analyse visuelle montre clairement qu'en cas d'augmentation du nombre d'interventions du SRZ, il existe un lien avec les précipitations. En effet, les intempéries suivies d'une ou de peu d'interventions n'indiquent souvent pas de signal de précipitations évident, alors que pour les intempéries suivies de nombreuses interventions, les précipitations sont un facteur déterminant pour le déclenchement d'interventions. Une analyse approfondie de la corrélation entre les précipitations et le déclenchement d'intervention est donc sensée. L'analyse exploratoire permet de formuler les hypothèses et de tirer les conclusions suivantes :

Évènements importants

- Les précipitations suivies d'un petit nombre d'interventions ne se prêtent pas à la recherche d'un seuil critique de précipitations pour le déclenchement d'interventions. La présente étude se concentre donc sur les évènements importants pour les forces d'intervention et pas sur les interventions isolées.

Différenciation des évènements

- On distingue les précipitations de longue durée et les précipitations intenses de courte durée et localisées.
- Plus les précipitations sont localisées et intenses, plus il y a une corrélation avec les données d'intervention. Dans le cas de précipitations de longue durée touchant des régions plus vastes, les interventions sont réparties sur une plus grande surface et sur une période plus importante.

Entrée des appels de détresse

- Les appels de détresse peuvent survenir assez rapidement après le début des précipitations, parfois dans l'heure qui suit.
- Les appels de détresse peuvent durer plus longtemps que les précipitations. Il se peut que des appels entrent plusieurs heures après la fin des précipitations.

- Le nombre d'appels et le moment auquel ils arrivent ne dépend pas uniquement de la quantité de pluie, mais aussi du lieu et de l'instant auquel l'évènement se produit. Les appels n'entrent en effet que si des personnes ou des biens sont touchés par des inondations. Si l'évènement se produit en fin de soirée ou durant la nuit, les appels se multiplient à l'aube, lorsque les personnes se réveillent et constatent les dommages. Cela correspond à l'expérience accumulée par Kutschker et al. [20].

4.1.2 Compilation des données d'intervention et de danger

Le seuil de précipitations lié aux interventions du SRZ peut être influencé par l'origine de l'eau et le type d'inondation.

La carte de dangers « eau » (chap. 3.3.1) indique les régions menacées par une crue des fleuves et rivières ou une augmentation du niveau des lacs. De son côté, la carte de dangers « ruissellement de surface » (chap. 3.3.2) montre les régions menacées par l'eau de pluie qui ne peut pas s'évacuer et coule en surface, en dehors du lit des cours d'eau. Les données d'intervention ont été comparées à ces deux cartes afin d'attribuer l'origine possible d'une inondation. Cette comparaison ne fournit que des indices pour une première catégorisation et ne permet pas de tirer une conclusion définitive quant à l'origine d'une inondation. Celle-ci n'est en effet pas documentée dans la banque de données du SRZ et plusieurs facteurs peuvent participer à une inondation (p. ex. inondation par des cours d'eau ou ruissellement de surface combiné à la surcharge de l'évacuation des eaux d'une zone d'habitation). Les données de mesure de l'écoulement des eaux n'ont pas été intégrées à l'analyse en raison d'un nombre trop restreint de stations de mesure qui ne permettait pas d'obtenir des indications assez précises sur l'écoulement de petits cours d'eau en cas d'inondation.

Les données d'intervention n'existent que sous forme de points, alors que les dangers pour un bâtiment concernent une surface. Les données d'intervention ont donc été attribuées à un plan du bâtiment au cours d'une étape intermédiaire (chap. 3.4 et Annexe B 2.2). Environ 85 % des points de données d'intervention du SRZ se situent à l'intérieur d'après les plans de bâtiment de la banque de données du canton de Zurich. Il n'y a que pour les interventions en dehors des bâtiments que le point d'intervention est lui-même recoupé avec les informations concernant les dangers. Ce processus est décrit en détail dans les annexes Annexe B 2.2 et Annexe B 2.3.

Environ 96 % des données d'intervention du SRZ se situent dans le périmètre de la carte de dangers « eau ». Une estimation a été effectuée pour cette surface afin de définir si elle est ou non menacée par des inondations. Aucune indication concernant les dangers n'est disponible pour les 4 % des interventions du SRZ qui ont eu lieu en-dehors du périmètre. Plus de deux-tiers des données d'intervention (71 %) se trouvent en-dehors des régions menacées par les inondations (voir Tableau 2). 20 % se trouvent dans des régions avec un danger résiduel ou faible, 5 % dans des régions à danger moyen et seules 63 des 16 193 interventions ont eu lieu dans une région avec un danger élevé.

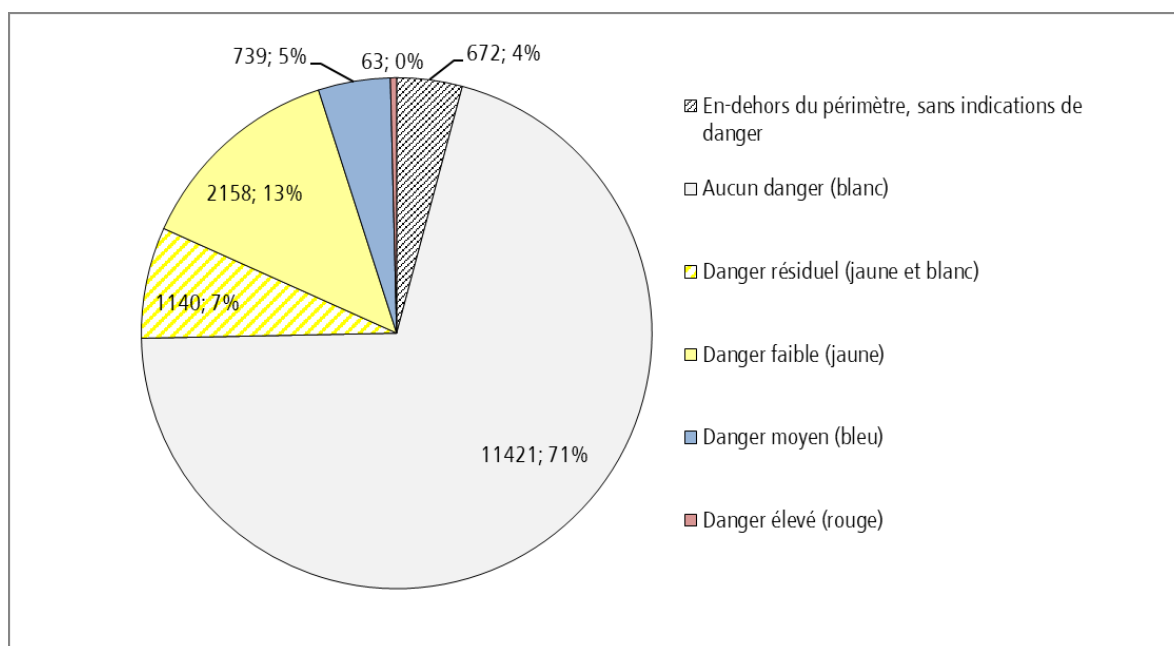


Illustration 15 : Répartition des données d'intervention d'après les niveaux de danger liés à l'eau (inondation par des rivières, fleuves et lacs) (d'après [5], [8]).

La compilation des données d'intervention et des données relatives aux dangers indique également qu'environ 75 % (74,4 %) des interventions du SRZ ont eu lieu dans une région potentiellement menacée par le ruissellement de surface (voir Tableau 2). Il faut noter que la carte de dangers « ruissellement de surface » ne fournit que des indices. La préparation des bases du modèle (p. ex. légère pente de surfaces à revêtement dur) et la représentation de voies d'accès ou de petites structures peut dans des cas isolés mener à une surévaluation ou à une sous-évaluation de la menace (voir Annexe B 2.3).

Le danger posé par le ruissellement de surface a longtemps été sous-estimé et n'a pas explicitement été pris en considération dans les évaluations des dangers. La carte de dangers « ruissellement de surface » permet de remédier à ce problème, mais, pour le moment, aucune étude systématique et quantitative à ce sujet n'existe dans le canton de Zurich. De manière générale, on estime que le ruissellement de surface cause environ 50 % des dommages [13] et la présente étude note des tendances similaires. Environ 25 % des interventions (25,6 %) ont eu lieu dans une zone à risque d'après la carte de dangers « eau » et 75 % dans une zone potentiellement menacée par le ruissellement de surface. Cette considération a certainement été influencée par le choix méthodologique effectué. Il s'agit d'une considération plutôt pessimiste puisque même les bâtiments à peine effleurés par le processus de ruissellement de surface ont été considérés comme affectés (voir Annexe B 2.3). En outre, différents niveaux de détail ont été comparés. Étant donné que la carte de dangers « ruissellement de surface » a été élaborée à l'échelle 1:12'500, les conclusions tirées pour des bâtiments isolés n'ont qu'une pertinence limitée. Il est cependant évident que le processus de ruissellement de surface revêt une grande importance. Comme certaines informations manquent, les chiffres présentés dans cette étude ne permettent pas d'affirmer définitivement si c'est une inondation ou le ruissellement de surface qui a déclenché une intervention du SRZ.

Tableau 2 : Tableau croisé : répartition des 16 193 données d'intervention enrichies avec les données de précipitations dans la carte de dangers « eau » (inondation par des rivières, fleuves et lacs) ou la carte de dangers « ruissellement de surface ».

		Ruissellement de surface		total absolu	total relatif
		menacé	pas menacé		
CD « eau »	menacé	3250	850	4100	25 %
	pas menacé	8338	3083	11 421	71 %
	en-dehors du périmètre	458	214	672	4 %
	total absolu	12 046	4147	16 193	100 %
total relatif		74,4 %	25,6 %	100 %	

Le nombre élevé d'interventions dans des régions touchées par le ruissellement de surface permet de supposer que ce sont plutôt les précipitations intenses de courte durée qui y jouent un rôle important. Pour les inondations par des cours d'eau plus grands, ce sont les précipitations de longue durée qui sont déterminantes.

Un cinquième des interventions (3083) ont eu lieu dans des régions qui ne sont menacées ni par le ruissellement de surface ni par les dangers liés à l'eau. Dans ces cas, les causes des inondations sont incertaines (voir Tableau 2).

4.1.3 Compilation des données d'intervention et de la densité de population

Afin de vérifier s'il y a davantage d'interventions dans les régions à haut potentiel de dommages que dans les régions à faible potentiel de dommages, les données d'intervention ont été comparées à la densité de population. La densité de population et la densité d'intervention (interventions à compter du 12.11.2012 dans l'ensemble du canton de Zurich) sont présentées côte à côte dans l'illustration 16. La carte de la densité d'intervention montre un tableau assez homogène. La majorité de la surface avec des interventions indique une densité d'une à trois interventions par hectare, sauf pour la région Oerlikon/Dübendorf pour laquelle les chiffres sont plus élevés (voir l'illustration 16, en bas).

La densité de population n'influence que peu le nombre d'interventions. Un tiers des points d'intervention se situent dans des zones avec une densité de population de 11 à 50 habitants par hectare et trois quarts se situent dans des zones avec une densité de 11 à 250 habitants par hectare (voir l'illustration 16, en haut à gauche). La superposition de la densité de population et des données d'intervention dans l'illustration 17 montre cependant que les courbes cumulatives pour les interventions par rapport à la densité de population et pour le territoire par rapport à la densité de population sont presque identiques. Cela signifie que, certes, la plupart des interventions ont lieu dans des zones densément peuplées, mais que ces zones constituent aussi la majeure partie du territoire. Le rapport entre les interventions par hectare et la densité de population en apporte la confirmation (l'illustration 18). La valeur moyenne par hectare grimpe ici de 1,2 à 1,75. Le fait qu'une

densité de population élevée ne suppose pas nécessairement une quantité importante d'interventions s'explique également par le rôle majeur joué par les dangers d'inondation et de ruissellement de surface (chap. 4.1.2).

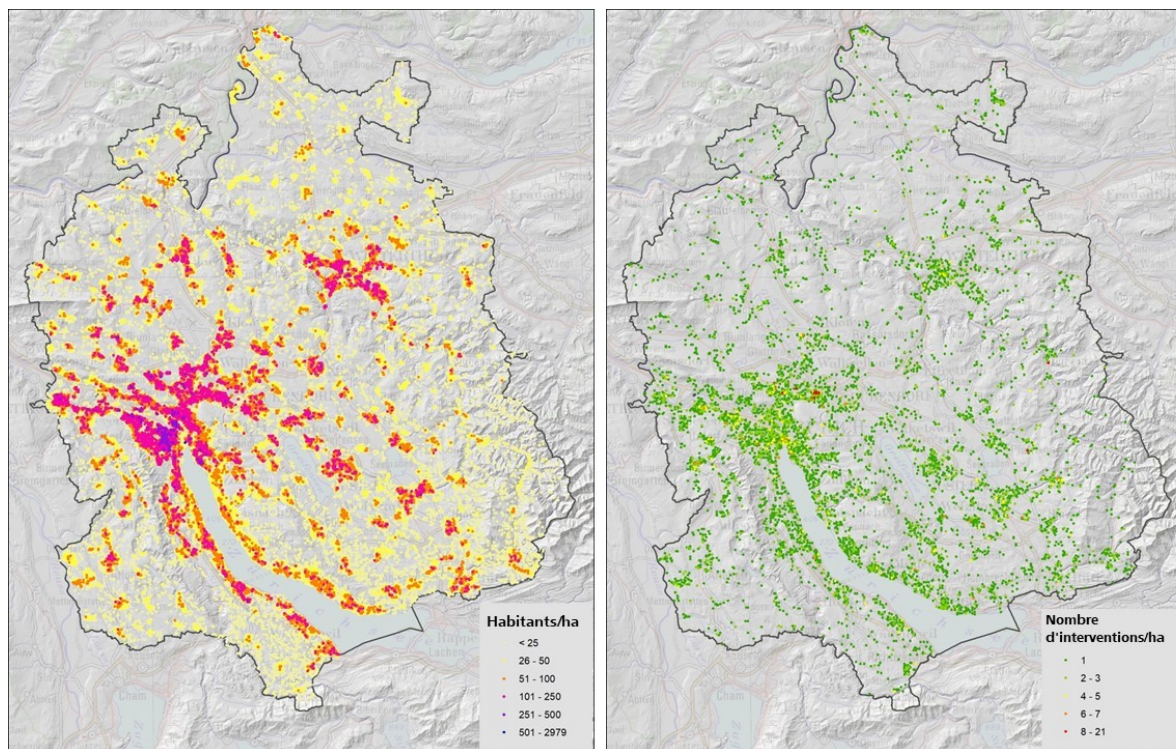


Illustration 16: Densité de population en 2010 d'après [3] (gauche) et densité d'intervention dès le 12.11.2012 d'après [5] (droite) par hectare.

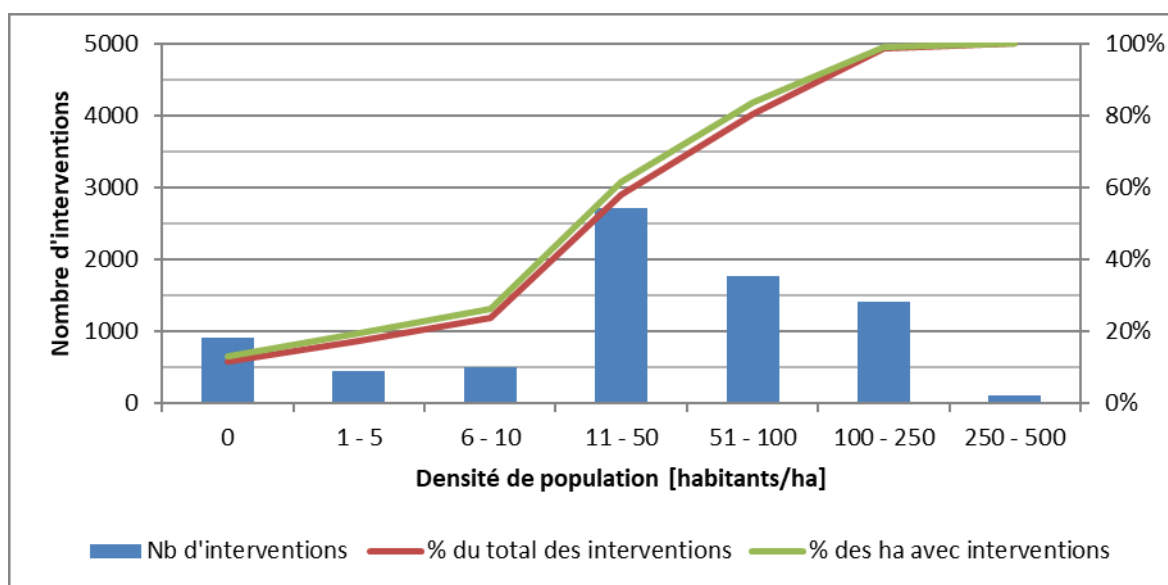


Illustration 17 : Comparaison de la densité de population [3] et du nombre d'interventions [5] (période du 12.11.2012 au 7.2.2018)

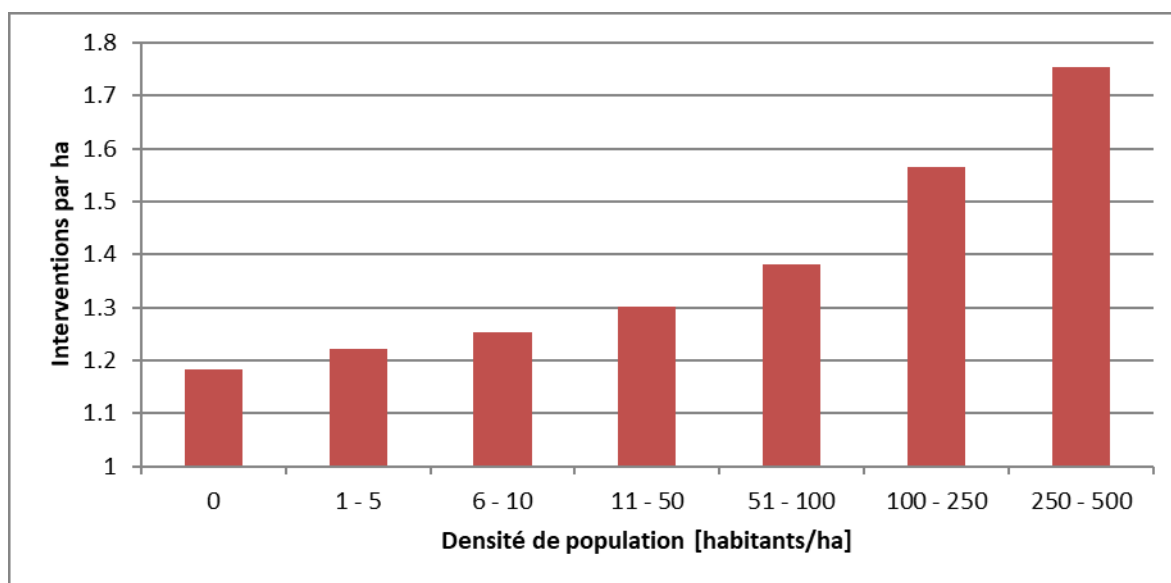


Illustration 18 : Comparaison de la densité de population [3] et de la densité d'intervention [5] par hectare (période du 12.11.2012 au 7.2.2018).

4.2 Analyse statistique

L'analyse statistique confirme la relation entre les précipitations et les interventions et consolide la distinction entre les précipitations intenses de courte durée et les précipitations de longue durée.

Le modèle explicatif pour la corrélation entre les précipitations et les interventions peut être réduit à deux variables sur la base des résultats d'une transformation des axes principaux. Les variables correspondent à une mesure générale pour la quantité de précipitations et à la distinction entre les précipitations intenses de courte durée et les précipitations de longue durée.

La transformation des axes principaux fournit donc une possibilité de catégorisation des interventions selon le type de précipitations qui les a déclenchées. Les analyses purement statistiques (partitionnement des données) ne permettent cependant pas une répartition concrète en catégories.

Une des hypothèses de base de la présente étude est que l'on peut trouver un modèle explicatif pour les interventions du SRZ sur la base de variables mesurables et des données d'intervention du SRZ (chap. 2). Les données disposent déjà d'une certaine valeur explicative au moment de leur préparation et de l'analyse exploratoire. Sans surprise, les données relatives aux précipitations jouent un rôle important à cet effet. C'est pourquoi elles ont été particulièrement approfondies dans les analyses statistiques (chap. 4.2.1 et 4.2.2 et Annexe B 3).

4.2.1 Transformation des axes principaux

Les données relatives aux précipitations et aux dangers décrites dans les chapitres 3.2 à 3.3 fournissent des informations avec une valeur explicative plus ou moins importante pour chaque intervention. Les informations préparées sont appelées variables indicatrices (p. ex.

« somme des précipitations pour 3 h »). Un nombre excessif de variables indicatrices pour un modèle explicatif a volontairement été préparé en raison de l'incertitude concernant les indicateurs déterminants et les valeurs indicatrices qui permettront de trouver les variables réelles (également appelées variables latentes) dont le caractère explicatif sera essentiel dans le modèle.

Les 18 variables indicatrices suivantes ont été utilisées pour la transformation des axes principaux :

- 8 paramètres concernant la somme des précipitations (somme pour x heures, x = 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 ou 72)
- 8 paramètres concernant l'intensité maximale des précipitations (somme horaire maximale dans une période de x heures, x = 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 ou 72)
- 2 paramètres concernant les informations relatives aux dangers (danger d'inondation par des cours d'eau ou des lacs ou danger de ruissellement de surface)

Afin de réduire la taille de la base de données de départ sans perdre de données, des transformations d'axes principaux (voir [17]) ont été appliquées aux 16 variables indicatrices relatives aux précipitations et aux deux variables concernant les dangers. Le détail des calculs se trouve dans l'7.2Annexe B 3.1. Les analyses ont mené aux conclusions suivantes :

- Les données de précipitations apportent davantage d'informations (valeur explicative) que les données relatives aux dangers.
- Il n'y a aucune corrélation entre les deux variables de risque (tirées de la carte de dangers « eau » et de la carte de risques « ruissellement de surface »).
- Il n'y a aucune corrélation entre les variables de risque et les variables de précipitations.
- Il y a énormément de corrélations entre les 16 indicateurs de précipitations. Une grande part des informations identiques (86 %) peut se répartir en deux variables.

L'analyse a permis de trouver deux variables latentes (composantes principales) que l'on peut interpréter. La première représente une mesure générique des précipitations. Plus il a plu (peu importe la durée des précipitations), plus la variable latente est importante. La seconde permet de distinguer les précipitations intenses de courte durée et les précipitations de longue durée. Si la seconde variable est élevée, il a plu en grande quantité dans un laps de temps restreint, alors que les sommes de précipitations de longue durée sont relativement basses (voir tableau 3).

On peut en conclure qu'afin de trouver un seuil de précipitations pour le déclenchement d'une intervention, il est nécessaire de différencier ces deux types de précipitations « intenses de courte durée » et « de longue durée ».

Tableau 3: Résultats de la transformation des axes principaux : les interventions du SRZ peuvent s'expliquer à l'aide de deux composantes principales (variables latentes).

Composantes principales	Interprétation
Première composante : mesure générique des précipitations	Plus les précipitations sont importantes, plus la valeur est élevée.
Seconde composante : Distinction entre précipitations intenses de courte durée et précipitations de longue durée	Plus la variable est élevée, plus il a plu dans un court laps de temps. La somme de précipitations de longue durée est faible en comparaison. Plus la variable est basse, plus la somme de précipitations de longue durée est élevée. Les précipitations intenses de courte durée restent relativement faibles en comparaison.

4.2.2 Partitionnement des données

D'un point de vue technique, on peut s'attendre à ce que les interventions puissent être réparties en au moins deux catégories. Les interventions pour des inondations provenant d'un cours d'eau ou d'un lac ne se déroulent ainsi pas de la même manière que les interventions déclenchées en raison du ruissellement de surface, ce que confirme le résultat de la transformation des axes principaux (chap. 4.2.1). Le partitionnement des données se prête à la catégorisation de données. La présente étude a eu recours à ce type d'analyse à plusieurs reprises (partitionnement en k-moyennes [19]). Les détails sont présentés dans l'Annexe B 3.2. Les conclusions suivantes en ont résulté :

- Les interventions ne peuvent pas être réparties en classes (groupes) sur la base des données de précipitations.
- Les statistiques ne permettent pas de définir un nombre de groupes logique.
- Il convient de remettre en question la séparation proposée par le partitionnement des données. Il semble en effet répartir les données arbitrairement.
- Un certain nombre d'interventions n'indique que de faibles valeurs de précipitations.

Une catégorisation concrète des données d'intervention n'apparaît donc pas possible sur la base d'analyses purement statistiques.

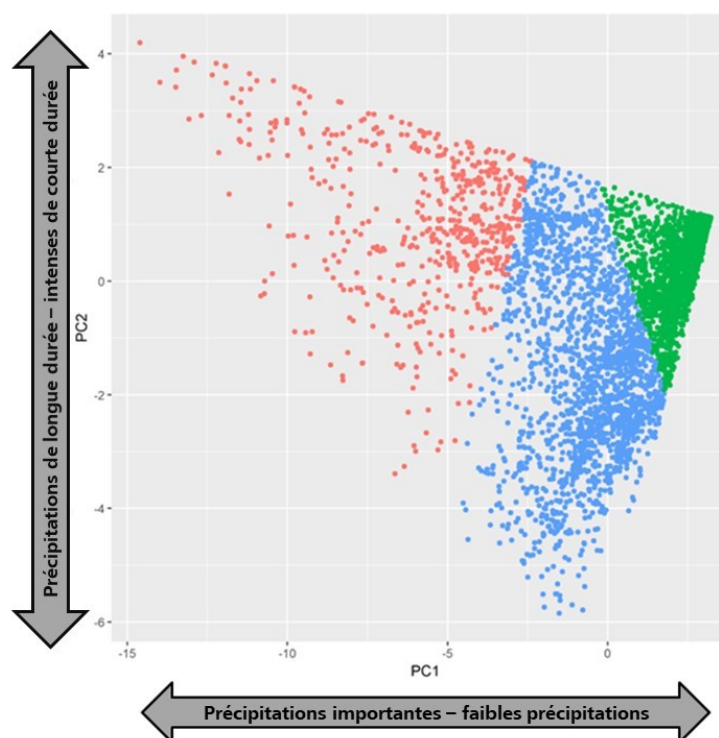


Illustration 19 : Résultats du partitionnement des données (trois groupes) pour les deux composantes principales.

4.3 Catégorisation des interventions

Les interventions sont réparties dans trois catégories d'après le type de précipitations qui les a déclenchées. La répartition a été faite au moyen d'évaluations statistiques en prenant en considération les connaissances techniques et l'expérience accumulée.

- Catégorie 0 : la cause du déclenchement est indéfinie
- Catégorie 1 : des précipitations de longue durée sont à l'origine du déclenchement de l'intervention
- Catégorie 2 : des précipitations intenses de courte durée sont à l'origine du déclenchement de l'intervention

La catégorisation des interventions permet de distinguer visuellement les prototypes d'événements pour divers types de précipitations et confirme les conclusions de l'analyse exploratoire concernant la corrélation entre les interventions et les précipitations :

- Les précipitations de longue durée mènent à des interventions réparties sur un large territoire.
- Les précipitations intenses de courte durée se présentent sous la forme de concentrations d'interventions sur une surface et un laps de temps restreints.

L'analyse statistique a certes fourni des indications concernant la formation de catégories (transformation des axes principaux, chap. 1.2.1), mais aucune concernant la répartition dans ces catégories (partitionnement des données, chap. 4.2.2). Les statistiques montrent que les précipitations sont les variables qui fournissent le plus d'explications et qu'il convient de les séparer en deux types : les précipitations intenses de courte durée et les précipitations de

longue durée. Une procédure de classification simple a donc été élaborée sur la base de ce constat et de l'expérience acquise au cours de divers événements.

Les interventions sont réparties en trois catégories d'après divers indicateurs de précipitations (voir l'arbre de décision, illustration 20). La répartition est motivée par l'analyse statistique (en particulier par l'analyse des composantes principales), mais axée sur une utilisation pratique :

- Si la somme de précipitations des 72 h précédant l'intervention est inférieure à 10 mm, l'intervention est attribuée à la catégorie 0 « indéfini ».
- Sinon
 - Si plus d'un tiers des précipitations des dernières 24 heures est tombé en l'espace d'une heure et si la somme des précipitations pendant cette heure est supérieure à 10 mm, l'intervention est attribuée à la catégorie 2 « précipitations intenses de courte durée ».
 - Dans les autres cas, l'intervention est attribuée à la catégorie 1 « précipitations de longue durée ».

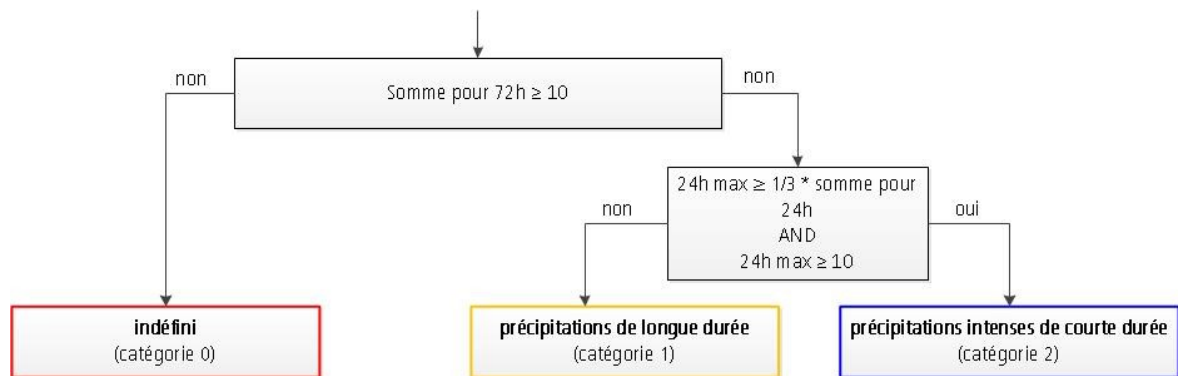


Illustration 20 : Catégorisation selon le type de précipitations déclencheur. Distinction entre les catégories « indéfini » (catégorie 0), « précipitations de longue durée » (catégorie 1) et « précipitations intenses de courte durée » (catégorie 2).

Des périodes plutôt longues ont été utilisées pour la catégorisation afin de ne pas trop influencer la définition des seuils à ce stade. Si la somme des précipitations pour 72 heures se situe en-dessous de 10 mm, elle est tellement faible que les précipitations ne peuvent pas être une cause plausible pour le déclenchement d'une intervention. Il faut donc expliquer cette dernière par d'autres causes. Les 72 heures qui constituent la première étape de l'arbre de décision (illustration 20) correspondent à la période maximale de calcul. Des précipitations intenses de plus de 24 heures ne peuvent quant à elles plus être qualifiées de « courte durée ». Cette valeur laisse cependant suffisamment de marge pour analyser différentes périodes de précipitations intenses de courte durée (1, 2, 3, 6 et 12 heures).

Cette répartition permet de trouver des prototypes d'événements pour les précipitations. Dans l'illustration 21, un événement exemplifie chaque catégorie. Elle permet de constater la différente nature des précipitations de longue durée (catégorie 1) et des précipitations intenses de courte durée (catégorie 2) et montre un événement typique pour lequel la pluie n'est pas à l'origine du déclenchement de l'intervention (tempête Eleanor, le 3 janvier 2018).

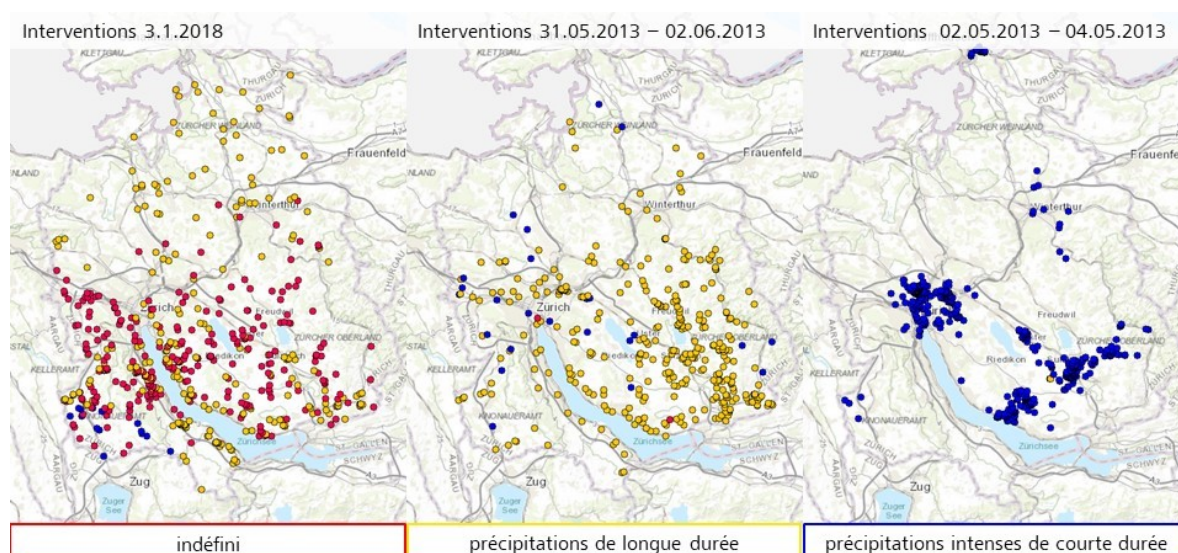


Illustration 21 : Interventions pour trois évènements, colorées d'après leur catégorie ([5]). Des précipitations intenses de courte durée provoquées par des orages ont mené à des concentrations d'interventions en forme de cellule alors que les précipitations de longue durée ont conduit à un étalement des interventions sur le territoire.

Les conclusions de l'analyse exploratoire se confirment (chap. 4.1.1) : les précipitations intenses de courte durée mènent à une concentration des interventions sur un territoire et un laps de temps restreints, alors que pour les précipitations de longue durée, les interventions s'étalent sur des surfaces plus importantes (illustration 21).

4.4 Définition des évènements

La présente étude se concentre sur les évènements pluvieux importants pour le SRZ et non pas sur les évènements isolés. Pour le SRZ, un évènement est important lorsqu'il mène à plus de 50 interventions en l'espace de six heures. D'après cette définition, 16 évènements pluvieux importants pour le SRZ ont eu lieu dans le canton de Zurich entre juillet 2005 et janvier 2018.

Il n'y a qu'avec une accumulation des interventions du SRZ qu'une corrélation entre les précipitations et les interventions peut être prouvée (chap. 4.1.1 et 4.2). De plus, en vue des défis actuels et futurs du SRZ et des forces d'intervention des autres communes, il ne faut pas s'intéresser à une intervention isolée, mais plutôt aux évènements suivis d'un grand nombre d'interventions dans un laps de temps restreint. Le moment à partir duquel une concentration d'interventions devient importante pour les sapeurs-pompiers dépend entre autre de la taille de l'unité et peut donc varier. La définition des évènements importants en lien avec des précipitations pour le SRZ se base sur le nombre d'interventions par heure. Dans 86 % (5653) des 6548 interventions analysées, il s'agit d'interventions isolées (une seule intervention par heure, Illustration 22). 24 % des interventions (1555) relèvent de la situation avec deux interventions par heure.

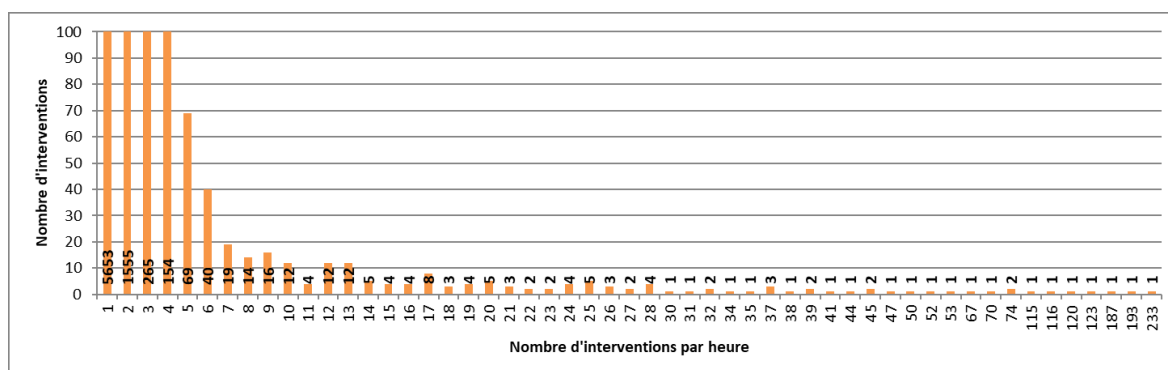


Illustration 22 : Nombre d'heures (cas) par rapport au nombre d'interventions par heure.

Comme les événements importants durent en général plus d'une heure, la définition du SRZ prévoit un décompte du nombre d'interventions pour une période de six heures. 95 % de ces fenêtres coulissantes de six heures comptent cinq interventions ou moins et 99 % comptent 25 interventions ou moins. Pour le SRZ, une concentration d'interventions ne devient importante qu'à partir de 50 interventions dans les six heures qui suivent un événement pluvieux. Cette limite a été définie avec le SRZ et de manière empirique (Illustration 23). Entre juillet 2005 et janvier 2018, 140 heures (cas) ont dépassé cette limite. Les critères suivants permettent de définir les limites temporelles d'un événement important pour le SRZ :

- Un événement débute lorsque 10 interventions ou plus ont été déclenchées en l'espace d'une heure.
- Un événement prend fin lorsque le nombre d'interventions passe en-dessous de 10 par heure et ne redépasse pas les 10 interventions par heure dans les sept heures suivantes.

Ces règles nous ont permis de trouver la valeur de 50 interventions en l'espace de six heures (Illustration 23) et d'analyser les événements rassemblés dans le tableau 4.

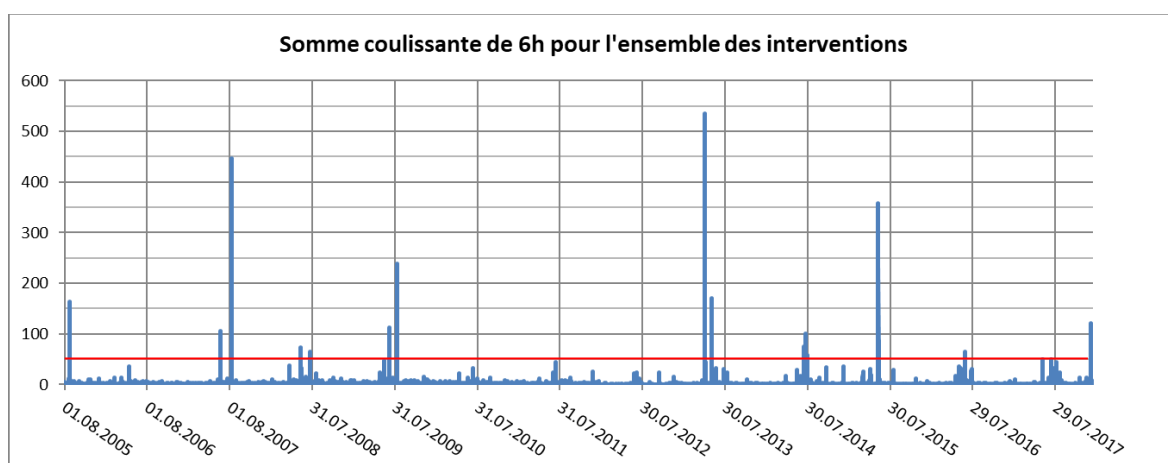


Illustration 23 : Somme coulissante du nombre d'interventions en l'espace de six heures. D'après son expérience, un événement devient important pour le SRZ lorsque le nombre d'interventions qui s'ensuivent dépasse 50 en l'espace de six heures (ligne rouge).

Les 16 événements présentés dans le tableau 4 rassemblent environ 20 % de toutes les interventions du SRZ. Chacune des catégories d'intervention par type de précipitations décrites au chapitre 4.3 et dans l'illustration 20 est représentée.

Tableau 4 : Événements avec plus de 50 interventions en l'espace de six heures (par ordre chronologique). Catégorie 0 « indéfini », catégorie 1 « précipitations de longue durée », catégorie 2 « précipitations intenses de courte durée ».

N° d'évènement	du	au (y compris)	Catégorie	Nb. d'interventions	
1	21.08.2005 20 :00	22.08.2005 10 :00	1	280	1,7 %
2	21.06.2007 09 :00	21.06.2007 11 :00	2	89	0,5 %
3	08.08.2007 19 :00	09.08.2007 13 :00	1	614	3,8 %
4	10.06.2008 19 :00	10.06.2008 20 :00	2	43	0,3 %
5	20.07.2008 17 :00	20.07.2008 18 :00	1 et 2	58	0,4 %
6	05.07.2009 20 :00	05.07.2009 22 :00	2	107	0,7 %
7	08.08.2009 14 :00	08.08.2009 17 :00	2	234	1,4 %
8	02.05.2013 19 :00	03.05.2013 09 :00	1 et 2	579	3,6 %
9	01.06.2013 02 :00	01.06.2013 21 :00	1	331	2,0 %
10	13.07.2014 00 :00	13.07.2014 09 :00	1 et 2	101	0,6 %
11	22.07.2014 08 :00	22.07.2014 18 :00	1	145	0,9 %
12	28.07.2014 18 :00	28.07.2014 20 :00	2	56	0,3 %
13	07.06.2015 21 :00	08.06.2015 09 :00	2	437	2,7 %
14	24.06.2016 21 :00	24.06.2016 22 :00	2	60	0,4 %
15	02.06.2017 19 :00	02.06.2017 20 :00	2	43	0,3 %
16	03.01.2018 10 :00	03.01.2018 14 :00	1 et 0	113	0,7 %

4.5 Définition des seuils

Afin de définir des seuils quantitatifs pour les précipitations intenses de courte durée et les précipitations de longue durée au-delà desquels le nombre d'interventions du SRZ augmente, les paramètres de précipitations des événements importants pour le SRZ ont été comparés aux paramètres de précipitations de l'ensemble des interventions :

- Précipitations intenses de courte durée : intensité maximale de 15 mm/h dans les trois heures précédant l'intervention.
- Précipitations de longue durée : somme des précipitations de 30 mm/12h

Les seuils quantitatifs permettent de définir à partir de quelle quantité de précipitations le SRZ doit s'attendre à un événement important (plus de 50 interventions en l'espace de six heures ; voir chap.4.4). Pour définir ces seuils, le caractère « exceptionnel » des précipitations liées aux événements importants décrits au chapitre 4.4 a été comparé aux

paramètres de précipitations de l'ensemble des interventions. Pour ce faire, on a commencé par calculer la répartition des valeurs des paramètres (sommées et maximales) pour les périodes définies au chapitre 3.2 (1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 et 72 heures avant l'intervention). Les résultats sont présentés dans Illustration 24 et indiquent que les valeurs médianes de la plupart des paramètres sont relativement basses. Les percentiles de 75 % et 90 % augmentent faiblement pour les heures d'intensité maximale relatives aux périodes plus longues, mais s'élèvent nettement pour les sommes de précipitations.

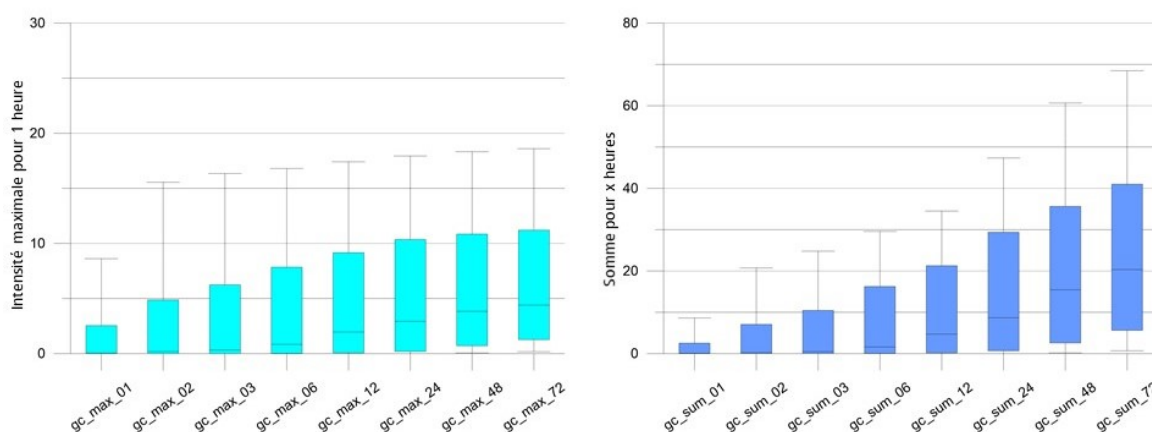


Illustration 24 : Répartition des sommes pour x heures (gc_sum_x, à droite) et des intensités maximales par heure (gc_max_x, à gauche) pour des périodes de 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 et 72 heures (percentiles : 10 %, 25 %, médiane, 75 %, 90 %).

Dans un second temps, les valeurs médianes des sommes de précipitations (catégorie 1, précipitations de longue durée) et des intensités maximales (catégorie 2, précipitations intenses de courte durée) pour les événements listés dans le tableau 4 ont été calculées pour les différentes périodes (1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 et 72 heures). Ces valeurs ont ensuite été comparées aux répartitions des valeurs de précipitations de l'ensemble des interventions (illustration 25). Cette comparaison montre que les événements importants pour le SRZ se distinguent clairement de l'ensemble des interventions et qu'ils comptent des valeurs dans les percentiles supérieurs. Cette approche permet de trouver les seuils pour les événements pluvieux au moyen d'un plus grand nombre d'interventions en découlant.

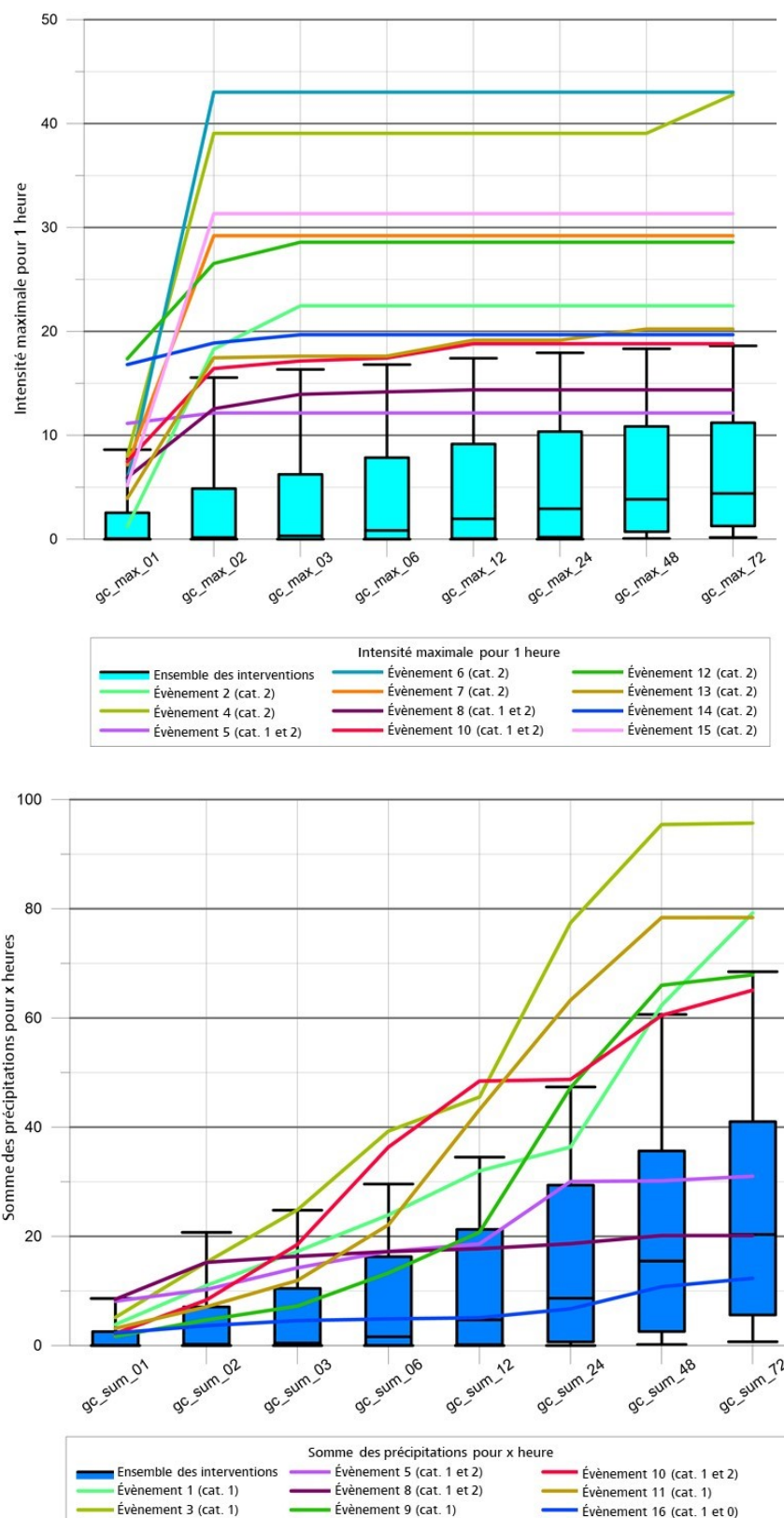


Illustration 25 : Comparaison des paramètres de précipitations des événements importants pour le SRZ entre juillet 2005 et janvier 2018 (lignes) et la répartition des valeurs de précipitations pour l'ensemble des interventions durant cette période (boîtes) pour les précipitations intenses de courte durée (en haut) et les précipitations de longue durée (en bas).

Pour les précipitations intenses de courte durée (catégorie 2), le seuil défini correspond à l'intensité maximale par heure durant les trois heures précédant l'intervention (gc_max_03). C'est à partir de là que les valeurs pour les événements analysés commencent à stagner (illustration 25, en haut). Le seuil a donc été fixé à 15 mm/h, ce qui le situe légèrement en dessous du percentile de 90 %. Les valeurs des événements 5 et 8 sont un peu plus basses que le seuil, mais il s'agit d'événements mixtes avec aussi bien des précipitations de longue durée (catégorie 1) que des précipitations intenses de courte durée (catégorie 2).

Pour les précipitations de longue durée (catégorie 1), la situation est moins évidente. À partir d'une durée de 12 heures, quatre événements importants pour le SRZ s'approchent du percentile de 90 % en ce qui concerne la somme des précipitations, mais ce n'est qu'à partir d'une durée de 48 heures qu'un cinquième événement s'y ajoute (illustration 25, en bas). Comme le nombre d'interventions évolue peu pendant de longues périodes (max. 536 interventions en six heures, max. 645 interventions en 24 heures), la somme de précipitations pour 12 heures a été utilisée pour définir le seuil de précipitations de longue durée à 30 mm. Cette valeur se situe également aux alentours du percentile de 90 %. La somme de précipitations pour 12 heures se situe en-dessous de ce seuil pour la moitié des événements importants pour le SRZ et liés à des précipitations de longue durée. Les événements 5 et 8 sont de type mixte. Dans le cas de l'événement 9, les précipitations ont augmenté et diminué à plusieurs reprises en l'espace de 19 heures. Pour cet événement, un seuil basé sur la somme pour 24 heures aurait été plus adapté, ce qui n'est toutefois pas le cas des autres événements. L'événement 16 concerne la tempête Eleanor de début janvier 2018. Dans ce cas, les sommes de précipitations sont limitées pour toutes les périodes analysées. Le nombre élevé d'interventions s'explique par les dommages liés à la tempête et par le rôle joué par la fonte des neiges, qui s'est ajoutée aux précipitations.

4.6 Évaluation des seuils

Diverses analyses statistiques ont confirmé la validité des seuils définis.

- Les deux seuils sont relativement stables même en cas de modification du nombre d'interventions. Les données à disposition ne permettent pas d'étayer les valeurs des seuils au moyen d'autres événements importants pour le SRZ liés aux précipitations.
- La comparaison des précipitations pour la période 1981-2018 et des précipitations pour la période 2005-2018 (pour laquelle des données d'interventions existent) montre que les données relatives aux précipitations utilisées dans le cadre de la présente étude sont représentatives de l'ensemble de la période 1981-2018.
- Les seuils sont plausibles : comparés aux statistiques de valeurs extrêmes des stations météorologiques, ils correspondent à un événement en l'espace de moins de 2,33 ans. Les événements importants pour le SRZ ont également lieu plus souvent que tous les 2,33 ans.
- En utilisant les seuils, les événements importants pour le SRZ liés aux précipitations qui ont eu lieu entre 2005 et 2018 peuvent être reproduits, permettant ainsi de prévoir les événements importants futurs. Le taux de précision (« hit rate ») est bon. Il n'y a que peu de fausses alarmes, c'est-à-dire des périodes de précipitations durant lesquelles les seuils sont dépassés, mais qui ne mènent pas à une augmentation du nombre d'interventions, et elles ne devraient se produire que pour des précipitations de longue durée.

Différentes analyses complémentaires ont été effectuées afin de vérifier la validité des seuils. Pour commencer, la sensibilité des paramètres de précipitations à l'ampleur d'un événement et au nombre d'interventions a été examinée. Si l'on n'observe que les événements avec plus de 10 interventions par heure, les valeurs percentiles augmentent nettement par rapport aux valeurs calculées pour l'ensemble des interventions (Illustration 26). Si le nombre d'interventions augmente davantage (20 ou 50), les percentiles ne changent plus que faiblement. Cela vaut autant pour les précipitations intenses de courte durée (catégorie 2, à gauche) que pour les précipitations de longue durée (catégorie 1, à droite). Il n'y aurait que peu de changement si le nombre d'interventions utilisé pour définir un événement important pour le SRZ était inférieur au seuil actuel de 50 interventions.

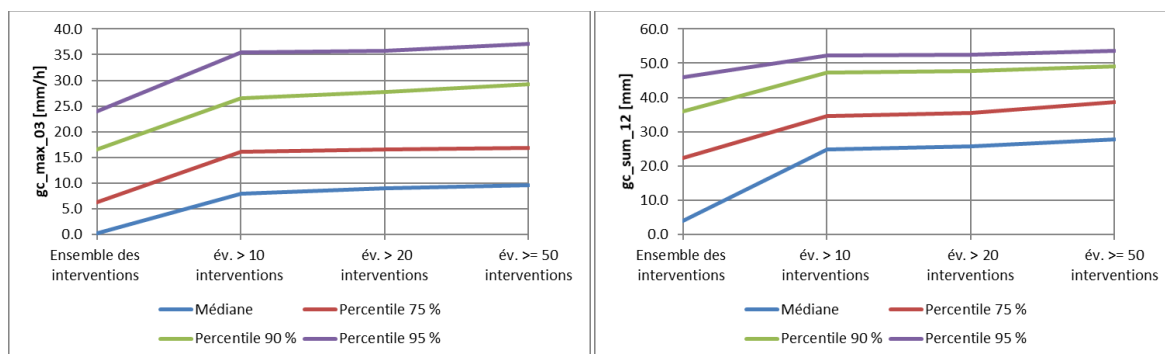


Illustration 26 : Valeurs percentiles des précipitations intenses de courte durée (catégorie 2, gauche) et des précipitations de longue durée (catégorie 1, droite) pour différents nombres d'interventions définissant un événement important pour le SRZ.

Un test effectué avec un seuil de ≥ 25 interventions en l'espace de six heures en apporte la preuve. Avec cette valeur, on obtient certes dix interventions de plus, mais presque toutes (huit sur dix) dans la catégorie 2 (précipitations intenses de courte durée) et le reste dans une forme mixte. On n'obtient donc aucun événement de catégorie 1 (précipitations de longue durée), pour lesquels des doutes quant à la définition du seuil subsistaient. Les données à disposition ne permettent pas d'étayer les valeurs des seuils au moyen d'autres événements importants pour le SRZ liés aux précipitations. Il faudrait pour cela disposer des données pour un nombre bien plus important d'interventions.

Il a également été vérifié si les précipitations durant la période pour laquelle des données sont à disposition sont représentatives. À cet effet, les valeurs horaires de six stations de mesure des précipitations sur toute la durée des mesures (1.1.1981–13.1.2018) ont été comparées aux valeurs horaires de la période (6.7.2005–13.1.2018) pour laquelle les données d'intervention sont disponibles (Tableau 5). Dans les stations d'Aadorf et de Wädenswil, le percentile de 99 % (précipitations par heure qui se produisent environ une fois par an) de la période « courte » se situe 2 mm au-dessus de celui de la période totale. Dans les autres stations, la différence est inférieure à un millimètre. On peut donc partir du principe que les données relatives aux précipitations qui ont été utilisées sont représentatives de la période de 1981 à 2018.

Tableau 5 : Évaluation du percentile de 99 % des précipitations par heure pour la période totale et pour la période pour laquelle des données d'intervention sont à disposition.

	Aadorf	Affoltern	Kloten	Schaffhouse	Wädenswil	Zurich-Fluntern
dès le 1.1.1981	18,0 mm	15,5 mm	16,8 mm	17,1 mm	20,0 mm	17,8 mm
dès le 6.7.2005	20,0 mm	15,3 mm	16,6 mm	17,9 mm	22,0 mm	17,5 mm

Les valeurs des seuils ont également été comparées aux statistiques de valeurs extrêmes des données des stations. Cette comparaison (Tableau 6) indique que l'intensité horaire

maximale de 4 à 8 mm se situe en-dessous du seuil de précipitations horaires maximales tous les 2,33 ans pour les trois stations qui disposent de valeurs horaires. La différence la plus importante se voit pour la station de Wädenswil, ce qui semble indiquer des précipitations plus importantes dans les Préalpes. La différence s'élève à 14-18 mm pour la somme pour 12 heures. Cette valeur n'est pas disponible pour la station de Wädenswil en raison des résultats peu fiables de la statistique des valeurs extrêmes pour cette station. La comparaison montre que les seuils définis sont plausibles. En effet, les événements importants pour le SRZ surviennent plus souvent qu'une fois tous les 2,33 ans (16 événements en 12 ans d'après le tableau 4).

Tableau 6 : Comparaison des seuils avec les statistiques de valeurs extrêmes de trois stations (données : MétéoSuisse).

Station	Seuil intensité horaire max.	Év. max. tous les 2,33 ans	Seuil somme pour 12 heures	Év. max. tous les 2,33 ans
Zurich-Fluntern	15 mm/h	20 mm/h	30 mm	48 mm
Zurich Affoltern	15 mm/h	19 mm/h	30 mm	44 mm
Wädenswil	15 mm/h	23 mm/h	30 mm	-

Outre les médianes des événements importants illustrés dans le tableau 4, des percentiles supplémentaires pour les paramètres « intensité maximale » et « somme des précipitations » ont été calculés en tenant compte du type de précipitations (indéfini, de longue durée, intenses de courte durée ; illustration 27). Il en ressort qu'exception faite des événements 5, 8, 9 et 16, la valeur médiane de la catégorie 2 ou celle de la catégorie 1 se situe au-dessus du seuil. L'événement 5 n'a duré qu'une heure et compte peu d'interventions. La valeur médiane de l'événement 8 pour les précipitations intenses de courte durée est de peu inférieure au seuil. Le n° 9 correspond à l'événement pendant lequel les précipitations ont augmenté et diminué à plusieurs reprises et l'événement 16 correspond à la tempête Eleanor de janvier 2018. Les seuils définis semblent donc valides pour les valeurs de précipitations malgré une grande dispersion.

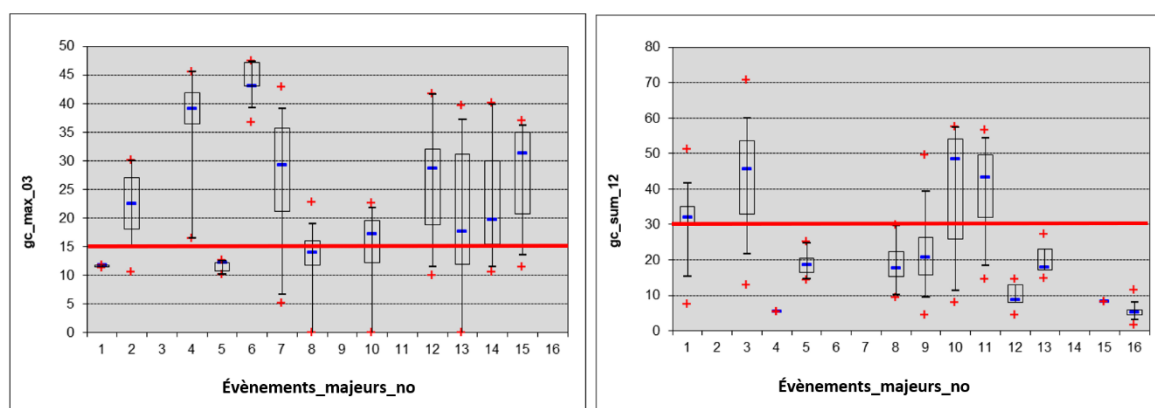


Illustration 27 : Percentiles (minimum, 5 %, 25 %, 50 %, 75 %, 95 %, maximum) pour les paramètres de précipitations « intensité maximale » (gauche) et « somme pour 12 heures » (droite) pour les 16 événements importants pour le SRZ.

Si l'on filtre les événements majeurs au moyen des seuils précédemment définis, les événements importants pour le SRZ décrits dans l'illustration Illustration 23 peuvent être reproduits (Illustration 28). Une grande partie des événements disparaît, ce qui prouve que les seuils permettent de trouver les événements majeurs suivis de nombreuses interventions et de les prévoir à l'avenir.

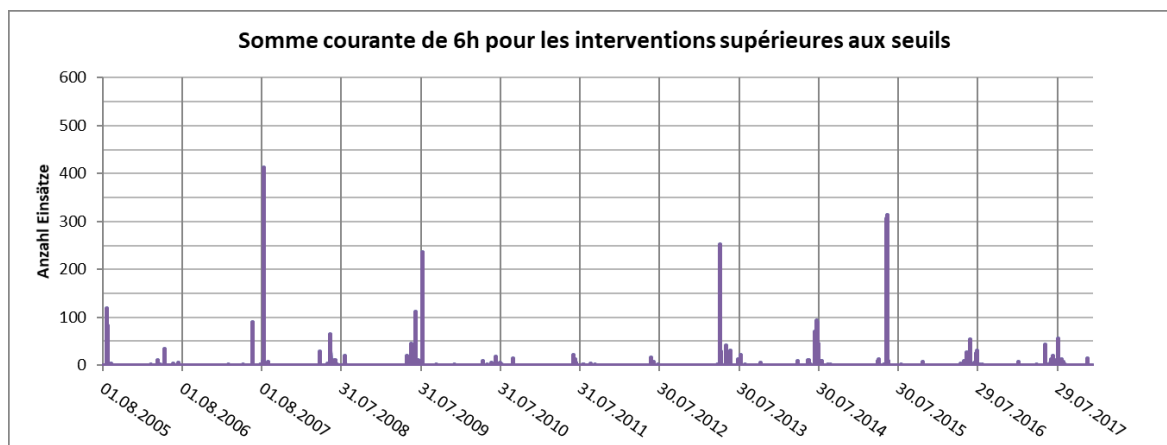


Illustration 28 : Événements majeurs liés aux précipitations trouvés au moyen des seuils d'intensité horaire maximale dans les trois heures précédant l'intervention et de somme pour 12 heures.

La capacité des seuils à filtrer les événements importants (« hit rate ») n'est pas le seul élément qui prouve leur validité. Celle-ci dépend également du nombre d'événements trouvés qui ne mènent pas à une augmentation du nombre d'interventions (« false alarm rate »). Afin de vérifier cela, l'intensité maximale des précipitations durant les trois heures précédant une intervention et la somme de précipitations pour 12 heures ont été calculées sur la base des données CombiPrecip sur la période 2005-2018. La valeur moyenne des paramètres dans un rayon de 10 km a été trouvée sur cette base. Cela a permis d'observer les champs de précipitations comme ils se produisent dans la réalité (et pas simplement des cellules isolées) et de réaliser des cartes des précipitations, qui ont permis d'extraire les périodes durant lesquelles les seuils ont été atteints ou dépassés pour au moins une cellule. Les résultats pour les deux paramètres sont présentés dans le Tableau 7. Un événement pluvieux est défini par le critère suivant : le seuil respectif a-t-il été atteint ou dépassé pendant 24 heures ?

L'évaluation de l'intensité maximale montre que le seuil a été dépassé durant 25 périodes dans le périmètre examiné (tableau 7). Dans 16 cas, le nombre d'interventions est inférieur à 50 pendant six heures. Environ neuf périodes ont connu plus de 50 interventions. Il n'y a pas eu de fausses alarmes, c'est-à-dire des périodes de précipitations durant lesquelles le seuil est dépassé, mais qui ne mène pas à une augmentation du nombre d'interventions pour les précipitations intenses de courte durée (catégorie 2).

Tableau 7: Évaluation des évènements liés à des précipitations pour lesquelles les seuils ont été dépassés.

	Intensité horaire max.	Somme précipitations
Nombre de cas	25	56
dont évènements (hits)	9	10
dont faible limite des chutes de	0	5
dont période ≤ 2 h	-	13
dont > 20 interventions en 6 h	10	7
dont 1 à 20 interventions en 6 h	6	18
dont aucune intervention (false alarm)	0	3

56 évènements qui ont dépassé le seuil ont été filtrés pour la catégorie des sommes de précipitations. 25 évènements ont été suivis d'interventions, mais la somme pour six heures reste inférieure à 50 interventions. Cinq évènements concernent une période avec une limite des chutes de neiges basse. Pour 13 évènements, le seuil n'a été dépassé que durant une ou deux heures, une durée faible et peu évidente pour des précipitations de longue durée. 10 évènements figurent dans le tableau 4 (évènements importants pour le SRZ). Tous les évènements importants de catégorie 1 (précipitations de longue durée) ont été saisis, ce qui prouve que le calcul des champs de précipitations fournit des résultats cohérents. Trois évènements n'ont été suivis d'aucune intervention. Dans ce cas, il s'agit de fausses alarmes.

Dans l'ensemble, les seuils définis pour déclencher une intervention ont donné des résultats plausibles pour l'ensemble du canton et toute la période observée (6.7.2005-7.1.2018). Il n'est donc pas nécessaire de trouver une autre clé d'analyse comme le revêtement du sol et de définir des seuils différents pour divers sols ou régions (voir Annexe A 4).

5 Estimation de l'évolution du nombre d'interventions

L'estimation de l'évolution du nombre d'interventions du SRZ liées à l'eau porte sur les 15 à 20 prochaines années (horizon de planification pour les forces d'intervention). Les sous-chapitres suivants présentent les conséquences du changement climatique, de la croissance démographique et de l'évolution des zones d'habitation sur la fréquence des interventions.

5.1 Conséquences du changement climatique

Les scénarios climatiques disponibles prévoient une augmentation d'environ 10 % du nombre de fortes intempéries dans la région de Zurich d'ici 2040. Pour le SRZ, le nombre d'événements liés à des précipitations de longue durée qui dépassent le seuil défini précédemment devrait passer en moyenne de cinq à six par année. 20 % d'entre eux sont des événements importants pour le SRZ. Cette évolution est faible, surtout comparée aux variations interannuelles actuelles.

D'ici la fin du siècle, les conséquences du changement climatique se feront clairement sentir et autant le nombre de fortes intempéries que le nombre d'interventions du SRZ en découlant augmenteront nettement (d'après [25], il faut s'attendre à une augmentation des précipitations intenses de 20 à 30 % sur le versant nord des Alpes).

Les scénarios climatiques ne contiennent pas d'indications concernant les précipitations par heure, il n'est donc pas possible d'estimer l'évolution des précipitations intenses de courte durée.

En raison de leur méthodologie (Delta Change), les scénarios climatiques CH2011 ne se prêtent pas à l'extrapolation de conclusions quantitatives concernant les changements des fortes intempéries [15].

Une nouvelle étude de Scherrer et al. [26] sur l'évolution des précipitations indique que les précipitations intenses ont augmenté durant les cent dernières années, aussi bien en ce qui concerne les précipitations journalières maximales par année (intensité) que le nombre de jours durant lesquels le percentile de 99 % des précipitations journalières (calculé pour la période 1961-1990) a été dépassé (Illustration 29). Cette tendance a commencé durant les années 70 et s'est manifestée de manière significative dans plus d'un tiers des stations de mesure. Elle suit une progression similaire à la hausse globale des températures avec 7,7 % par kelvin. D'après les prévisions, les températures devraient poursuivre leur envolée et les précipitations devraient suivre la même courbe.

Les données sur lesquelles l'étude de Scherrer et al. [26] se base permettent de prévoir la tendance suivante pour la station de Zurich-Fluntern jusqu'en 2040 :

- Sur la base des mesures et de la tendance de la station de Zurich-Fluntern :
Percentile de 99 % 1961–1990 : 30,8 mm/jour
Tendance : 18,9 % / 100 ans
→ Percentile de 99 % 2040 : **33,7 mm/jour**
- Sur la base de la hausse globale des températures :
Hausse de la température globale moyenne (TGM) d'ici 2040 : 1,2 kelvin
Hausse de température : 7,7 %/kelvin
→ Percentile de 99 % 2040 : **33,4 mm/jour**

Les stations restantes indiquent des tendances similaires pour l'intensité des précipitations. On peut donc s'attendre à une augmentation de 10 % de l'intensité des précipitations d'ici 2040 (voir ci-dessus : hausse de 30,8 à 33,7 ou 33,4 mm/jour = hausse de 10 %). En matière de fréquence de précipitations, la tendance est même deux fois plus haute que pour l'intensité. Il faut donc supposer que la fréquence des fortes précipitations du niveau du percentile de 99 % augmentera de 20 %.

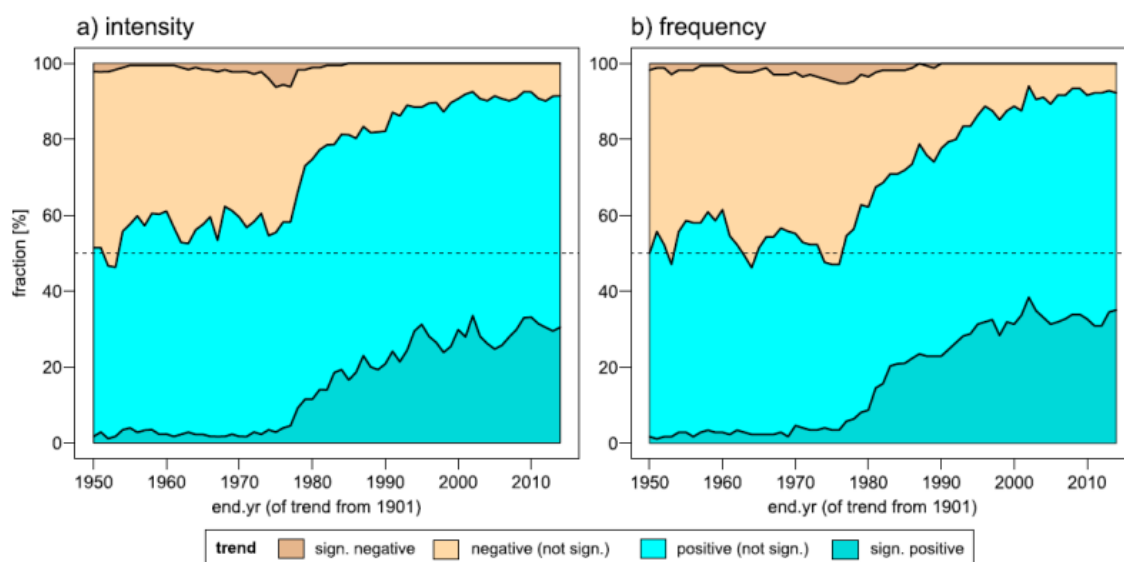


Illustration 29 : Part des stations indiquant depuis 1901 une tendance positive ou négative pour les fortes précipitations journalières du percentile de 99 % (a) et le nombre de jours durant lesquels le percentile de 99 % a été dépassé (b). Illustration tirée de [26].

Les simulations climatiques de huit régions européennes et notamment des Alpes (y c. la Suisse) ont été examinées dans le cadre d'une étude de l'EPFZ [25]. Il en ressort que dans les Alpes, les événements pluvieux journaliers se produisant tous les 50 ans s'amplifieront de 5 à 10 % d'ici 2049 en comparaison avec la période 1982-2019. Pour la période 2070-2099, on attend même une augmentation allant jusqu'à 20 %. La hausse est similaire en ce qui concerne la fréquence des précipitations intenses.

Le report de ces tendances sur le nombre d'événements pluvieux importants pour le SRZ fournit les résultats suivants : 56 champs de précipitations relatifs aux sommes pour 12 heures concernent des zones étendues du canton de Zurich (Tableau 7). Sur les 12,5 ans examinés, cela correspond à environ cinq événements par année. Avec la hausse prévue, ce nombre passerait à six, dont 20 % seulement mèneraient à plus de 50 interventions en l'espace de six heures. Cela représente une faible augmentation, surtout en considérant les variations interannuelles actuelles. Ainsi, aucun événement suivi d'un grand nombre d'interventions ne s'est produit de 2010 à 2012. La donne change pour la période 2070-2099. Les simulations climatiques prévoient en effet une augmentation des précipitations intenses de 20 à 30 % sur le versant nord des Alpes [25].

Les scénarios climatiques ne contiennent pas d'indications concernant les précipitations par heure, il n'est donc pas possible d'estimer l'évolution des précipitations intenses de courte durée.

5.2 Conséquences de la croissance démographique et de l'évolution des zones d'habitation

Dans un futur proche (env. 20 ans) la croissance démographique et l'évolution des zones d'habitation constitueront un défi plus important que le changement climatique pour le SRZ :

D'ici 2030, environ 25 % de l'accroissement de la population devrait survenir dans des régions menacées par le ruissellement de surface et 10 % dans des zones à risque d'inondations. Ces chiffres devraient à peine changer jusqu'en 2040.

Par rapport à la situation actuelle, la somme des dommages potentiels dans le canton de Zurich devrait connaître une hausse de 25 % jusqu'en 2030 et de 30 % d'ici 2040.

Les mesures de construction hydraulique ou de protection des ouvrages qui peuvent réduire le danger n'ont pas été prises en compte dans la présente évaluation.

Comme le montre le chapitre 4.1.2, une grande partie des interventions ont lieu dans des zones menacées par des inondations liées à des cours d'eau ou à des lacs ou par le ruissellement de surface. On constate également une augmentation du nombre d'interventions dans les zones densément peuplées.

Afin d'estimer l'évolution future des interventions du SRZ, il convient donc de prendre en compte, outre le changement climatique, la croissance démographique et l'évolution des zones d'habitation et leur rapport avec les régions menacées. L'évolution de la densité de la population a été utilisée comme indicateur pour l'évolution des zones d'habitation et par conséquent pour l'évolution des dommages potentiels dans les zones d'habitation. Les données suivantes ont servi de base pour l'analyse :

- Répartition de la population, surface habitable existante : données par hectare tirées de GEOSTAT (STATPOP 2010)
- Zones à bâtir : zones à bâtir en Suisse (harmonisées) selon l'OFDT, état au 11.12.2017
- Évolution de la population : développement de la population par commune selon les statistiques de l'OFDT concernant l'évolution de la population par zone de trafic pour les années 2010, 2020, 2030 et 2040.

Pour estimer l'évolution des dommages potentiels, certaines surfaces nouvellement ou intensément exploitées ont été éliminées. Cela permet de parvenir à des conclusions sur les zones dans lesquelles l'impact des inondations et du ruissellement de surface sur les personnes et les biens change.

Le calcul a été fait sur la grille par hectare pour chaque commune (comme pour les données relatives à la population de GEOSTAT [3]). L'évolution de la population entre 2010 et 2030 ou 2040 est concentrée en premier lieu dans les zones à bâtir qui sont encore vierges, tout en tenant en compte de la densité de population des régions voisines. Lorsque les zones à bâtir ne suffisent pas par rapport à l'évolution pronostiquée de la population, la densité de population de toutes les cellules comprenant un nombre d'habitants supérieur à 0 est rehaussée.

Dans un second temps, les surfaces ainsi définies sont associées à la carte de dangers « eau » [8] et à la carte de dangers « ruissellement de surface » [7]. Afin de prendre en considération la différence géographique des données, la proportion de surface menacée

par hectare pour chaque cellule a été calculée. L'impact sur la population a ensuite été multiplié par ce facteur. Pour la carte de dangers « eau », on distingue les niveaux de danger rouge et bleu d'une part, et jaune d'autre part. L'illustration Illustration 30 présente l'augmentation de la population dans les régions à risque.

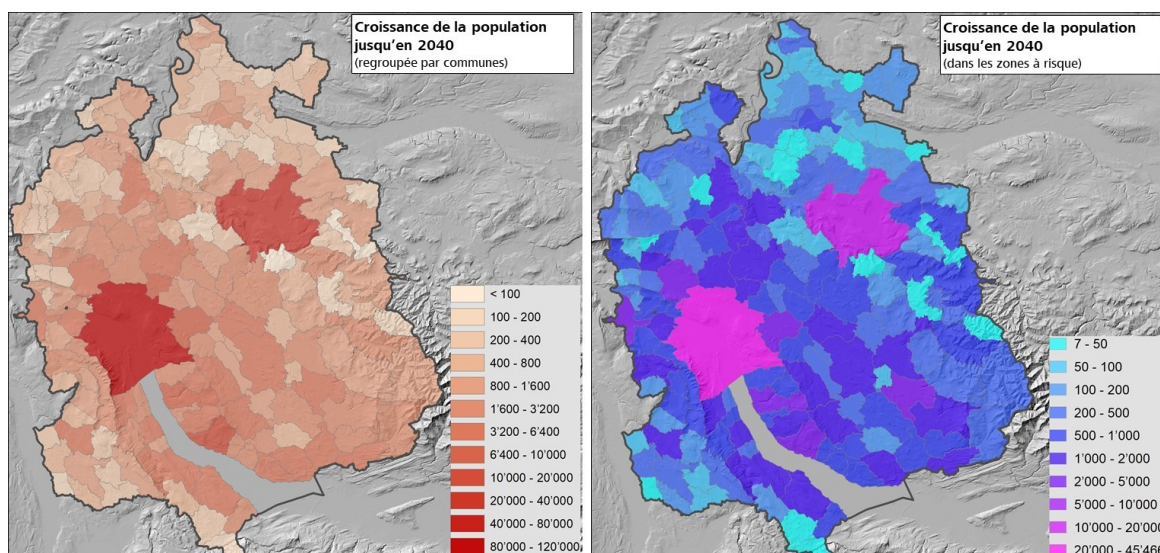


Illustration 30 : Modélisation de la croissance de la population du canton de Zurich jusqu'en 2040 (gauche). Nombre d'habitants supplémentaire dans les régions menacées par des inondations ou le ruissellement de surface (droite). Sur la base de [3], [7], [8].

Les données quantitatives sur l'évolution de la population dans les régions menacées sont résumées dans le Tableau 8. Les résultats démontrent qu'environ 25 % de la croissance de la population jusqu'en 2030 se concentrera dans des régions menacées par le ruissellement de surface et 10 % dans des régions touchées par des inondations. Ces valeurs ne changent que faiblement jusqu'en 2040. Dans la situation actuelle, cela correspondrait à une augmentation des dommages potentiels d'environ 25 % jusqu'en 2030 et de plus de 30 % jusqu'en 2040. Il faut noter que la présente étude ne prend pas en compte les mesures de construction hydraulique ou de protection des ouvrages (pour autant qu'elles aient été planifiées et implémentées). Les mesures de protection des ouvrages sont très efficaces pour contrer le ruissellement de surface et peuvent donc nettement réduire le danger.

Tableau 8: Croissance de la population menacée par des inondations ou le ruissellement de surface jusqu'en 2030 et 2040.

Période	Croissance de la population	Population menacée par		
		Ruissellement de surface	Inondations de catégorie jaune	Inondations de catégorie bleue/rouge
2010		343 440	117 006	29 538
d'ici 2030	328 211	85 902	26 635	7991
d'ici 2040	426 794	110 823	35 036	10 300

Grâce à une approche basée sur les données du SIG, des conclusions différenciées sur l'évolution des zones d'habitations, qui fournissent aussi des indications concernant la menace pesant sur les surfaces nouvellement bâties, ont pu être trouvées. Les conclusions concernant l'évolution de la somme des dommages potentiels dans les régions à risque se basent sur les zones à bâtir encore vierges. Il est possible que des décisions politiques futures modifient les conditions cadres durant la période examinée (reclassement ou déclassement de zones à bâtir).

6 Résultats et aspects méthodologiques

6.1 Corrélation quantitative entre les interventions et les précipitations

Les analyses ont démontré qu'il existe une corrélation quantitative entre les précipitations et le nombre d'interventions du SRZ. Elle n'est cependant évidente que pour les événements pluvieux suivis d'un grand nombre d'interventions. En effet, il est difficile de constater un rapport avec les précipitations dans le cas d'événements suivis d'un petit nombre d'interventions. Pour définir les seuils de précipitations en vue du déclenchement d'interventions, il convient de distinguer les précipitations intenses de courte durée et les précipitations de longue durée. Pour les premières, un seuil relatif à l'intensité maximale des précipitations de 15 mm durant les trois heures précédant une intervention a été défini et pour les secondes, un seuil relatif à la somme des précipitations de 30 mm durant les 12 heures précédant l'intervention a été défini. Ces seuils concernent les événements pluvieux menant à plus de 50 interventions en l'espace de six heures puisque ce nombre d'interventions correspond à un événement majeur pour le SRZ. Il y a eu 16 événements pluvieux de ce type durant la période examinée (juillet 2005 à janvier 2018), un nombre relativement faible pour définir des seuils. Environ 20 % des 16 000 interventions analysées peuvent cependant être attribuées à ces 16 événements.

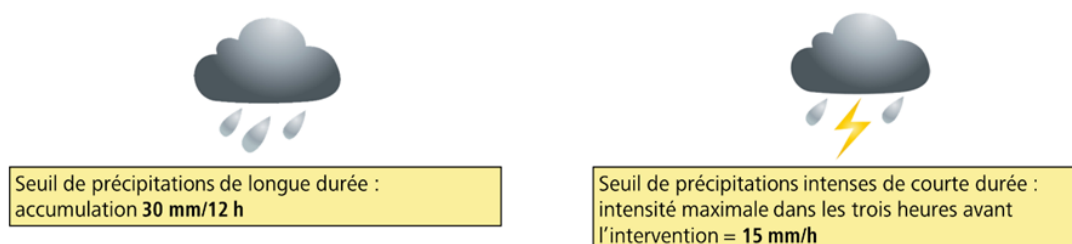


Illustration 31 : Corrélation entre fortes précipitations et interventions du service de protection et de sauvetage de Zurich : lorsqu'un des seuils est dépassé, une accumulation de plus de 50 interventions en l'espace de six heures est à attendre pour le SRZ.

Les données d'intervention du SRZ sont probablement uniques en Suisse, autant en terme de quantité que de qualité des informations sur les interventions. Les conditions étaient donc réunies pour parvenir aux meilleurs résultats possibles.

L'idée originelle (trouver les seuils pour des interventions isolées au moyen de méthodes statistiques) ne s'est pas avérée concluante. Un trop grand nombre d'interventions résultent en effet de faibles précipitations. Dans le cas d'événements pluvieux suivis d'au maximum 10 interventions en l'espace de six heures, la moyenne de la somme des précipitations atteint 5 mm en trois heures et moins de 10 mm en 12 heures. Ces valeurs sont souvent dépassées et ne peuvent donc pas servir de seuils de précipitations. Ainsi, au lieu d'utiliser exclusivement des données statistiques pour trouver les seuils, celles-ci ont été enrichies avec des conclusions empiriques. Les seuils de précipitations des événements pluvieux importants pour le SRZ ont donc été définis sur la base des expériences du SRZ dans le cas d'événements suivis de plus de 50 interventions en l'espace de six heures. Malgré le nombre

assez limité d'évènements de ce type (16 durant la période 2005-2018), des seuils ont pu être définis, qui sont plausibles en comparaison avec les statistiques de valeur extrême et le percentile de 99 % des données des stations de mesure. La vérification avec des évènements dépassant les seuils, mais suivis de moins de 50 interventions, confirme la plausibilité des résultats obtenus.

6.2 Influence des processus de danger sur les interventions

Environ 75 % (74,4 %) des interventions du SRZ liées à l'eau ont eu lieu dans des régions menacées par le ruissellement de surface. Les quelque 25 % restants (25,6 %) concernent des régions menacées par des inondations en lien avec des cours d'eau ou des lacs. Les deux processus « inondation » et « ruissellement de surface » peuvent aussi survenir simultanément. À peine 20 % des interventions ont eu lieu dans des zones qui ne sont pas concernées par ces dangers.

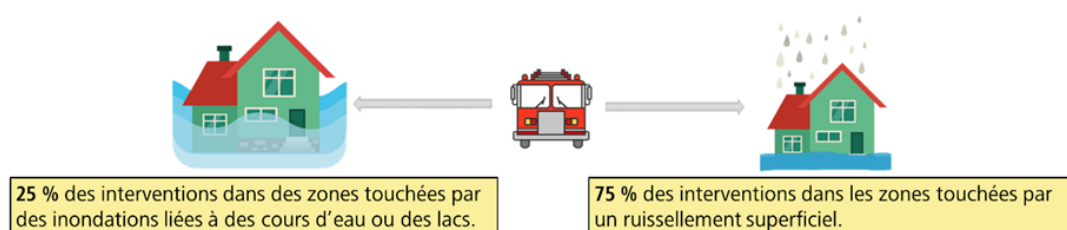


Illustration 32 : Rapport entre les interventions et les processus de danger « inondation par des cours d'eau ou des lacs » et « ruissellement de surface ».

En superposant simplement les points relatifs aux données d'intervention et les zones menacées par le ruissellement de surface et la carte de dangers « eau », on sous-estime le danger pour les raisons suivantes :

- Dans la carte de dangers « ruissellement de surface », les bâtiments sont en grande partie épargnés. Il n'y a donc pas de points relatifs aux données d'intervention à l'intérieur de bâtiments qui puissent être utilisés.
- Les régions à risque d'après la carte de dangers « inondations » comprennent des surfaces bâties, mais il est possible que les bâtiments ne soient que marginalement affectés. Si un point de données ne se situe pas dans cette zone « touchée », il est noté « sans risque ».

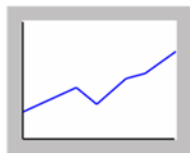
Ce problème peut être résolu en attribuant les interventions aux bâtiments et en comparant ces informations aux régions menacées (voir Annexe B 2.3).

6.3 Évolution future du nombre d'interventions

D'après les connaissances actuelles, le changement climatique ne devrait avoir qu'une faible influence sur le nombre d'interventions durant la période examinée. La fréquence des évènements pluvieux qui dépassent les seuils pourrait ainsi passer de cinq à six par année, dont 20 % mènent à au moins 50 interventions en l'espace de six heures. En comparaison avec les variations interannuelles actuelles, ce changement est faible. Les choses se gâtent pour la période 2070-2099. Sur le versant nord des Alpes, une augmentation de 20 à 30 % des précipitations est en effet attendue.

Les scénarios climatiques CH2011 [15] ne permettent pas de parvenir à des conclusions concernant des modifications en cas d'évènement extrême. De plus, les changements prévus par les résultats des modèles climatiques pour les 20 prochaines années sont relativement peu importants, notamment par rapport aux variations naturelles. C'est pourquoi la présente étude a examiné les tendances actuelles et les a reportées sur la période analysée. Les derniers modèles [25] ont permis de confirmer les résultats obtenus avec cette méthode. La méthodologie de la présente étude sera également appliquée dans le cadre des nouveaux scénarios climatiques CH2018. Les prévisions pour les prochaines années ne devraient donc pas changer significativement sur la base de ces nouveaux scénarios climatiques.

La croissance démographique et l'évolution des zones d'habitation constituent un second facteur important pour l'estimation de l'évolution future du nombre d'interventions du SRZ. Ces deux éléments influencent déjà clairement les prévisions pour les 20 prochaines années. D'ici 2040, on s'attend à une nette augmentation de la somme des dommages potentiels dans les zones à risque. Le modèle utilisé indique que la croissance démographique se concentrera principalement dans les zones à bâtir ou mènera à une densification. La part de la population vivant dans une région potentiellement menacée par des inondations ou le ruissellement de surface n'augmente ainsi que légèrement et les dommages potentiels évoluent proportionnellement. Le nombre de personnes vivant dans des régions à risques augmentera d'environ 25 % d'ici 2030 et d'environ 30 % d'ici 2040. Le nombre d'interventions devrait augmenter en conséquence.



En raison du changement climatique, le nombre d'évènements avec des précipitations intenses devrait s'accroître de **cinq à six par an** d'ici 2040.



Avec le développement démographique, le nombre de personnes en danger augmentera d'**environ 25 % d'ici 2030 et de 30 % d'ici 2040**.

Illustration 33 : Évolution future des interventions suite au changement climatique et à la croissance démographique et des zones d'habitation.

6.4 Aspects méthodologiques

La présente étude poursuit également des objectifs méthodologiques. Les principales conclusions d'ordre méthodologique seront donc décrites ci-après. En outre, Annexe B contient une description détaillée de divers aspects méthodologiques.

La transparence et la clarté des étapes de travail ont été des objectifs importants pour la présente étude. Afin d'atteindre ces buts, les étapes de réalisation ont été décrites. Cela permet de garantir un traitement efficace et d'assurer la documentation des procédures mises en place et la possibilité de recalculer les résultats.

6.4.1 Traitement d'une grande quantité de données

Des données de très bonne qualité sont indispensables pour obtenir des résultats utiles. Des exigences importantes accompagnent le traitement de grandes quantités de données, car il est plus difficile de repérer d'éventuelles erreurs. Dans la présente étude, les données relatives aux précipitations ont constitué le défi le plus complexe. Les quelque 400 millions de points de données et le nombre bien plus élevé de résultats ont nécessité des concepts de calcul et de sauvegarde efficaces et des algorithmes spéciaux pour le contrôle de qualité. Ces aspects doivent être pris en compte dès le départ pour tout projet de ce type. Les détails se trouvent dans l'annexe Annexe B 1.

6.4.2 Synchronisation temporelle des données relatives aux précipitations

La comparaison des interventions et des précipitations n'est pas uniquement géographique, mais aussi temporelle. Les indications temporelles des données CombiPrecip se basent sur le temps universel coordonné (UTC) alors que les données d'intervention se basent sur l'heure normale en suisse (HNEC ou HAEC). Il y a donc des écarts entre ces deux types de données : une heure en hiver et deux heures en été. Il convient par conséquent de convertir les données d'intervention en UTC afin de combiner les données sans devoir considérer l'heure d'été (voir Annexe B 2.1).

6.4.3 Prise en compte des aspects hydrologiques

Dans la phase initiale de la présente étude, il a été envisagé d'exporter les événements d'inondation, c'est-à-dire les situations dans lesquelles les inondations ne sont pas la conséquence d'un événement pluvieux à proximité, mais de précipitations qui ont lieu dans des bassins versants situés en amont du lieu d'intervention. Pour analyser ce genre d'événement, il convient de prendre en compte le terrain autour de ces bassins (Annexe A 3). Aucun événement de ce type n'a toutefois été découvert. Cela peut s'expliquer par le fait qu'à l'exception de la Limmat, aucun cours d'eau ne dispose d'un bassin versant étendu à une longue distance et par conséquent, dans le cas des événements pluvieux importants pour le SRZ, l'ensemble du canton de Zurich a connu de fortes précipitations. En outre, l'effet des fortes précipitations sur les bassins versants supérieurs de la Limmat est limité par les lacs de Zurich et de Walenstadt. Dans d'autres régions, ces aspects hydrologiques peuvent toutefois avoir leur importance.

7 Conclusions

7.1 Résultats

Durant la présente étude, une méthode a été développée qui permet d'analyser la corrélation entre les précipitations et les interventions du SRZ sur le plan quantitatif. Les résultats de l'analyse permettront au SRZ d'améliorer son organisation dans la centrale d'intervention lorsque des intempéries seront annoncées. L'étude a également fourni des conclusions qualitatives sur l'évolution future de l'activité du SRZ suite au changement climatique et à la croissance démographique et des zones d'habitation.

La prise en compte des dangers a confirmé l'importance capitale du ruissellement de surface. L'analyse indique en effet qu'une vaste majorité d'interventions n'ont pas lieu dans des zones menacées par les inondations (zones bleues et rouges), mais plutôt dans des zones de danger jaunes ou blanc jaune. Dans les années à venir, l'évolution des zones d'habitation constituera un défi plus important que le changement climatique pour le SRZ. Dans la seconde moitié du 21^e siècle, le changement climatique se fera cependant clairement sentir.

Le principe participatif de l'étude a été très profitable. En impliquant différents acteurs tels que la Confédération, le canton et la ville de Zurich, les assurances et le monde scientifique, divers points de vue ont pu intégrer l'étude et les résultats obtenus ont pu être transmis promptement à ces parties prenantes, garantissant leur utilité immédiate.

Enfin, l'étude a démontré que les données à disposition du SRZ, de MétéoSuisse et des services cantonaux compétents revêtent une importance capitale. Ce genre d'étude n'est en effet possible que si des données de grande qualité sont saisies et traitées de manière systématique puis mises à disposition.

7.2 Travaux complémentaires envisageables

La méthodologie développée dans la présente étude est transparente et claire. Elle peut donc être appliquée à d'autres questionnements similaires. Des idées de thèmes pour des travaux complémentaires sont décrites ci-après :

- Dans le domaine des fortes précipitations, il pourrait être intéressant d'effectuer la présente étude dans d'autres régions. En effet, les seuils de précipitations étant spécifiques à une région et à un type d'organisation, ils devraient s'avérer très différents dans d'autres régions climatiques. Pour ce type d'analyse, des données géoréférencées, en particulier concernant les interventions liées à l'eau des organisations de protection de la population, sont nécessaires.
- Dans des zones densément peuplées, l'évacuation des eaux joue un rôle central dans le cas de bâtiments inondés. Dans ce cas de figure, il pourrait s'avérer intéressant d'observer le rapport entre l'hydrologie naturelle et l'évacuation des eaux.
- À l'avenir, des données de précipitations plus précises seront à disposition (p. ex. toutes les 10 minutes). Dans le cas du ruissellement de surface, l'intensité très importante des précipitations dans un laps de temps réduit revêt une importance considérable et ce genre de données permettrait de vérifier le seuil de précipitations intenses de courte durée défini dans la présente étude, et le cas échéant de l'adapter.

- La méthodologie peut être transposée à d'autres processus de danger comme la chaleur ou le vent, qui sont très importants dans le cadre du changement climatique. Pour ce faire, il faudra adapter la définition des événements importants pour les organes de la protection de la population.
- Les catastrophes résultent souvent de l'accumulation d'événements isolés. Il faut ainsi différencier la survenance simultanée d'événement différents (multi risk) et la succession temporelle et/ou géographique de processus (process chains). Pour ce type d'analyse, la méthode développée dans la présente étude peut fournir des bases qu'il conviendra de développer.
- Les résultats de la présente étude peuvent contribuer à créer des alertes basées sur les conséquences (impact based warnings). En liant les prévisions de précipitations, les seuils, les dommages potentiels et les surfaces menacées, l'étude montre en effet le potentiel de ce genre de rassemblement de données.

Cette étude, basée sur un aspect participatif, s'avère être un outil précieux pour le traitement de questionnements liés au changement climatique, mais aussi aux évolutions socioéconomiques futures.

Annexe A Données de base supplémentaires

Annexe A 1 Indications complémentaires sur les données d'intervention

Pour étudier le rapport entre les interventions (ou leur nombre) et les précipitations ou d'autres variables explicatives comme le danger pesant sur une région, il convient en premier lieu de transformer les données de base dans une forme adéquate. La forme la plus simple est un tableau (y c. informations géométriques et géographiques) dans lequel chaque ligne correspond à une intervention et les colonnes représentent les diverses variables explicatives. Les données d'interventions fournies par le SRZ se présentaient déjà sous cette forme (tableau avec divers attributs ; Tableau 9). Nous avons ensuite complété ce tableau avec des attributs supplémentaires.

Tableau 9: Attributs des données d'interventions fournies par le SRZ, y c. indications concernant le type/format, la définition d'un champ obligatoire et des explications [5].

Attribut	Type	Oblig.	Explication
FID	Object ID	1	Clé unique
Shape	Géométrie	1	Point
Responsable	Texte	1	SRZ
N° d'intervention	Double		indications internes du SRZ, pas évidentes
Objet	Texte		p. ex. Dock A, aéroport
x	Double	1	Coordonnées (MN03)
y	Double	1	Coordonnées (MN03)
Rue	Texte		Nom de rue
NRM	Integer		Numéro de maison
Team	Texte		Originie, p. ex. Rümlang
Mobilisé_Date	Date		JJ :MM :AAAA
Mobilisé_Heure	Date	1	hh :mm :ss
Type d'intervention	String	1	Code
Urgence	String		Code

Annexe A 2 Situations météorologiques

Les situations météorologiques décrivent les modèles de circulation à large échelle. Selon la circulation, la probabilité de précipitations dans une région est plus ou moins haute, bien qu'il y ait des différences saisonnières (Illustration 34). Les corrélations éventuelles entre la situation météorologique à un moment donné et les interventions du SRZ peuvent participer à confirmer la thèse d'un rapport entre les précipitations intenses et la fréquence d'intervention. Elles pourraient également permettre de trouver des signes avant-coureurs grossiers, mais importants pour les forces d'intervention.

Il existe diverses classifications qui se différencient par le nombre de situations météorologiques et la pression atmosphérique [28]. MétéoSuisse nous a recommandé d'utiliser la classification GWT26_Z500, qui décrit 26 situations météorologiques et se base sur un niveau de pression de 500hPa. Dans les données, une situation météorologique a été attribuée à chaque journée.

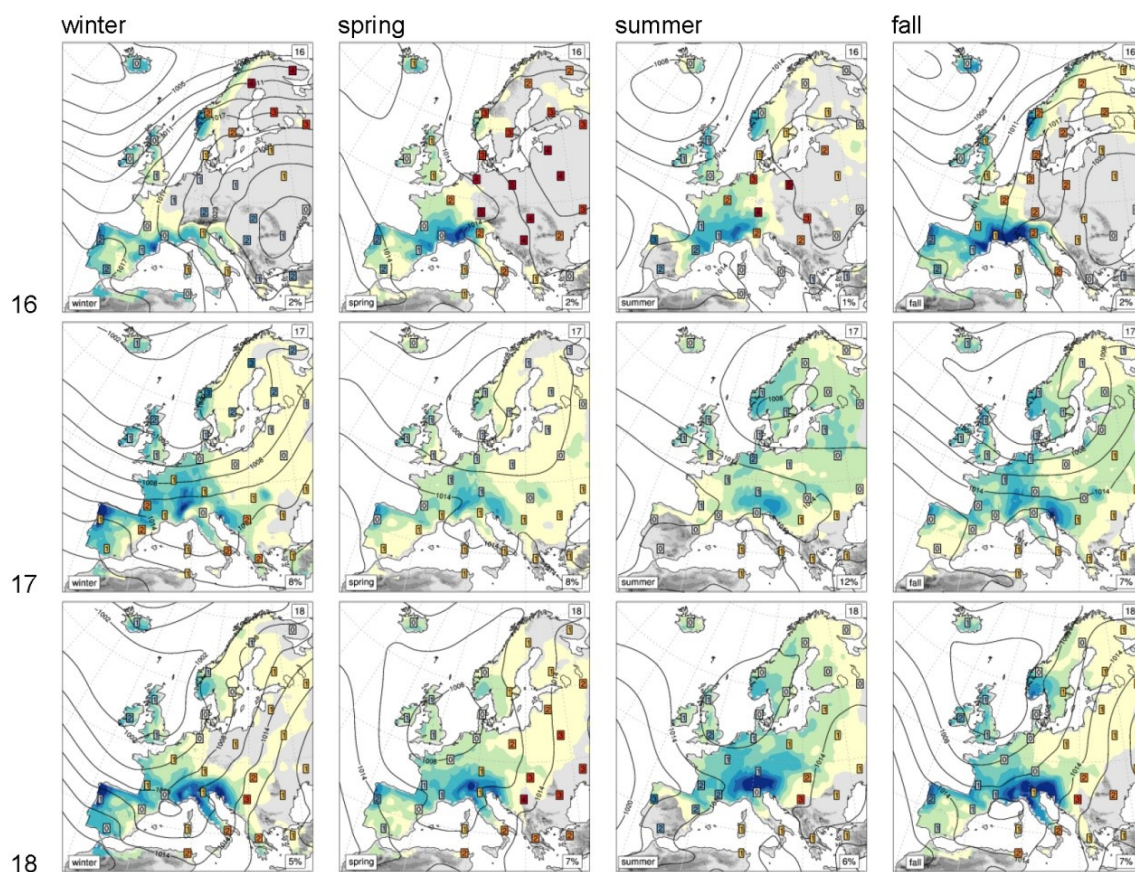


Illustration 34 : Répartition saisonnière des précipitations pour les situations météorologiques 16 (South, anticyclonic), 17 (West, indifferent) et 18 (SouthWest, indifferent) selon la classification GWT26_Z500 [22].

La classification distingue les situations cycloniques, anticycloniques et indifférentes. Chaque groupe est ensuite subdivisé selon les huit directions du vent et les conditions de pression atmosphérique. L'illustration 35 montre la fréquence saisonnière de ces situations météorologiques. Les plus courantes sont anticycloniques avec des vents d'ouest, de nord-ouest et de sud-ouest.

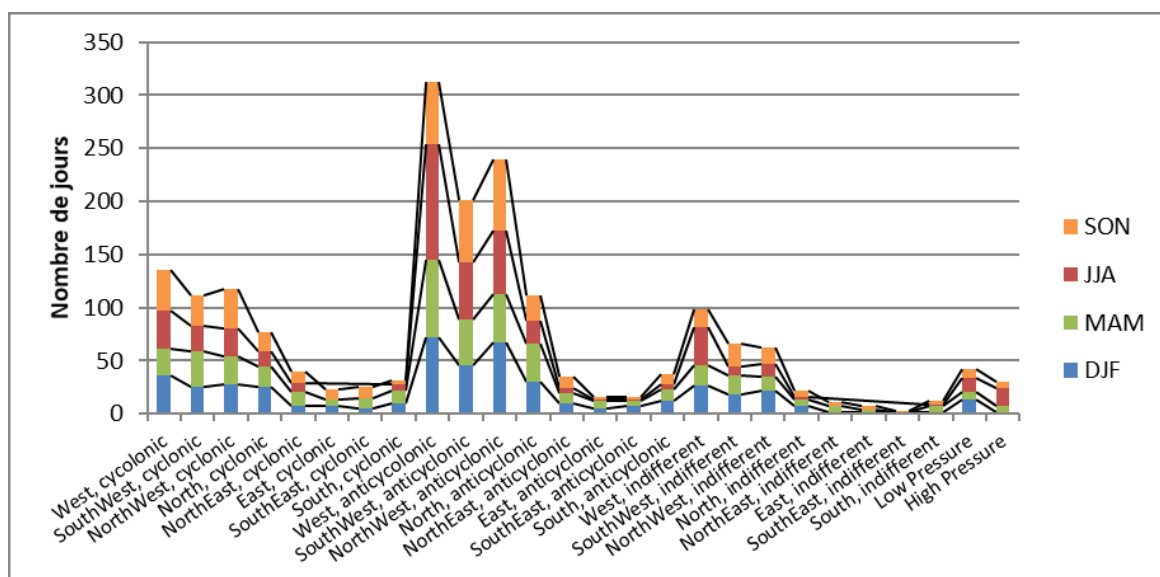


Illustration 35 : Fréquence saisonnière des situations météorologiques entre le 12.11.2012 et le 7.1.2018 (ensemble des données, indépendantes des données d'intervention du SRZ). Classification GWT26_Z500 [28].

La situation météorologique de la veille de l'intervention et celle de la journée de l'intervention a été retrouvée pour toutes les interventions du SRZ. Le nombre d'interventions pour chaque situation météorologique a ensuite été calculé et comparé à la fréquence absolue des situations météorologiques. Les résultats sont présentés dans le tableau 10.

Tableau 10: Nombre d'interventions par situation météorologique (S) le jour de l'intervention (J) ou la veille de l'intervention (V) et fréquence relative.

S n°	Description	Nombre d'interventions		Nombre de jours avec S	Nb. d'interventions par journée S	
		J	V		J	V
1	West, cyclonic	283	252	136	2.08	1.85
2	SouthWest, cyclonic	411	209	111	3.70	1.88
3	NorthWest, cyclonic	227	340	117	1.94	2.91
4	North, cyclonic	518	526	77	6.73	6.83
5	NorthEast, cyclonic	218	61	40	5.45	1.53
6	East, cyclonic	37	38	23	1.61	1.65
7	SouthEast, cyclonic	37	30	25	1.48	1.20
8	South, cyclonic	115	231	31	3.71	7.45
9	West, anticyclonic	832	917	313	2.66	2.93
10	SouthWest, anticyclonic	583	1153	201	2.90	5.74
11	NorthWest, anticyclonic	526	562	239	2.20	2.35
12	North, anticyclonic	144	211	111	1.30	1.90
13	NorthEast, anticyclonic	40	42	35	1.14	1.20
14	East, anticyclonic	21	23	16	1.31	1.44
15	SouthEast, anticyclonic	35	27	16	2.19	1.69
16	South, anticyclonic	141	80	38	3.71	2.11
17	West, indifferent	690	447	98	7.04	4.56
18	SouthWest, indifferent	135	96	66	2.05	1.45
19	NorthWest, indifferent	172	106	63	2.73	1.68
20	North, indifferent	34	27	22	1.55	1.23
21	NorthEast, indifferent	16	19	11	1.45	1.73
22	East, indifferent	12	10	7	1.71	1.43
23	SouthEast, indifferent	8	5	3	2.67	1.67
24	South, indifferent	529	150	12	44.08	12.50
25	Low Pressure	72	173	42	1.71	4.12
26	High Pressure	525	626	30	17.50	20.87

La plupart des interventions se concentrent durant les situations comprenant un vent d'ouest. Ces situations sont les plus fréquentes. Les situations météorologiques South, indifferent et High Pressure, durant lesquelles un grand nombre d'interventions ont également eu lieu, surviennent rarement. Les données ne permettent pas de trouver un rapport évident entre les situations météorologiques et le nombre d'interventions, raison pour laquelle la variable des situations météorologiques a été abandonnée.

Annexe A 3 Subdivision de la Suisse en bassins versants

Dans le cas d'inondations par des cours d'eau, les précipitations à l'origine de l'inondation peuvent se produire dans un bassin versant loin en amont alors qu'il ne pleut pas ou relativement peu sur le lieu de l'intervention. Durant la présente étude, il a fallu trouver un moyen d'examiner les concentrations d'interventions qui ne sont pas clairement liées à des précipitations préalables importantes. La « Subdivision de la Suisse en bassins

versants (EZGG-CH) » peut servir de base pour une éventuelle identification des précipitations dans le bassin versant d'un cours d'eau. Les données sont composées de « feature classes » polygonales avec des bassins versants partiels hiérarchisés de > 40 km² [6].

L'analyse des données d'intervention du SRZ a cependant montré que les concentrations d'interventions (> 20 interventions/jour) dont le déclencheur est inconnu et qui ne peuvent donc pas être reliées à des précipitations antérieures sont en grande partie attribuées à la catégorie d'intervention « arbre/branche ». Aucune concentration d'interventions inexpliquée et sans précipitations préalables n'a été trouvée. L'étude du débit des cours d'eau principaux et l'utilisation des données tirées de la Subdivision de la Suisse en bassins versants et de toute autre donnée relative au débit, au niveau maximal et aux capacités d'écoulement des cours d'eau se sont donc avérées inutiles.

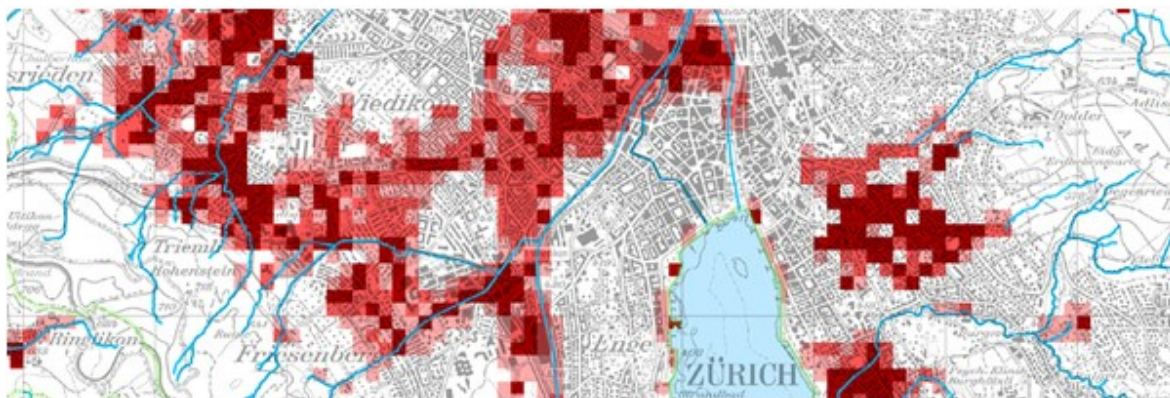
Annexe A 4 Revêtement du sol et coefficients d'écoulement

La capacité d'écoulement des divers revêtements de sols varie fortement. Les revêtements et la part de surface imperméable influencent certainement les seuils de précipitations en vue du déclenchement d'une intervention. L'infiltration de l'eau de pluie est par exemple limitée sur des surfaces consolidées (coefficient d'écoulement élevé), alors qu'en forêt (faible coefficient d'écoulement), le sol peut absorber de grandes quantités d'eau. Le canton de Zurich dispose d'une carte des processus d'écoulement qui montre les surfaces des processus d'écoulement principaux et indique quelles zones ont tendance à créer rapidement un ruissellement de surface en cas de fortes précipitations [1]. Les contenus de cette carte ont été intégrés à la carte de risques « ruissellement de surface » et ont donc déjà été pris en compte lors de la comparaison des données d'intervention avec le risque potentiel de ruissellement de surface [7]. Si les seuils de déclenchement d'intervention ne devaient pas être aussi évidents dans d'autres études, il faudrait imaginer une clé d'interprétation séparée pour la définition des seuils basée sur le revêtement du sol et le coefficient d'écoulement. Cela n'a pas été nécessaire dans la présente étude en raison de la plausibilité des seuils définis (voir chap. 4.6).

Annexe A 5 Carte de risques « inondations »

En 2014, le Service de l'environnement du canton de Zurich (AWEL) et l'établissement d'assurance immobilière de Zurich (GVZ) ont publié pour la première fois la carte de risques « inondations » pour le canton de Zurich. Celle-ci combine les dangers présentés dans les différentes cartes de dangers et les dommages potentiels actuels d'une région et montre où les conséquences d'une inondation seraient les plus dévastatrices. Les risques liés à l'eau qui ont été définis et présentés permettent de procéder à une première hiérarchisation des régions. Cinq cartes de risques ont été prises en considération : risque pour l'approvisionnement, risque humain, risque culturel, risque environnemental et risque matériel. Outre les risques pécuniaires, la carte de risques prend en compte des risques difficilement quantifiables comme les pannes dans les centrales d'intervention des sapeurs-pompiers.

La carte de risques indique l'importance du risque par hectare (élevé, moyen, faible ou négligeable) pour tous les thèmes examinés (Illustration 36). Elle fournit ainsi des premières indications qualitatives sur l'ampleur potentielle des dommages.



Couleur	Danger
Blanc	Danger faible ou négligeable parce qu'aucune menace n'a été cartographiée ou que les conséquences sur les thèmes examinés sont faibles.
Rouge clair	Danger faible. Soit le nombre de thèmes concernés est faible, soit la région n'est touchée ni intensément ni régulièrement par des inondations.
Rouge	Danger moyen. Des thèmes d'importance moyenne peuvent être concernés ou la région subit régulièrement des inondations ou des dommages importants.
Rouge foncé	Danger élevé. Des thèmes très importants peuvent être touchés ou la région subit fréquemment des inondations et des dommages importants.

Illustration 36: Extrait de la carte de risques « inondations » du canton de Zurich avec légende ([9],[10]).

Les couleurs/classes de risque dépendent de l'intensité et de la fréquence des évènements (informations tirées de la carte de dangers « eau ») ainsi que des thèmes concernés (personnes, biens, approvisionnement, culture et environnement) et de l'importance des dommages potentiels.

La carte de risques « dangers naturels » montre que, pour le canton de Zurich, les risques élevés dépendent en premier lieu de l'utilisation et non pas du danger. Ils concernent en particulier les régions pour lesquelles les cartes de dangers annoncent un danger ou un danger résiduel faible ou moyen[10].

Lors de l'élaboration de la carte de risques « inondation », les cartes de dangers n'étaient pas encore disponibles pour bon nombre de communes du nord du canton. La carte de risques n'a donc pas pu être réalisée pour les communes en gris dans l'illustration 37. De plus, le processus de ruissellement de surface n'est pas pris en considération dans la carte de risques « inondations ». Comme le montre la présente étude, ce processus cause cependant la majeure partie des interventions (voir chap. 4.1.2 et 6.2). La carte de risques « inondations » ne présente donc qu'une partie des dangers et son utilisation dans la présente étude ne s'avère pas judicieuse. Il ne fait cependant aucun doute que les aspects liés à la croissance démographique et à l'évolution des zones d'habitation doivent être pris en considération.

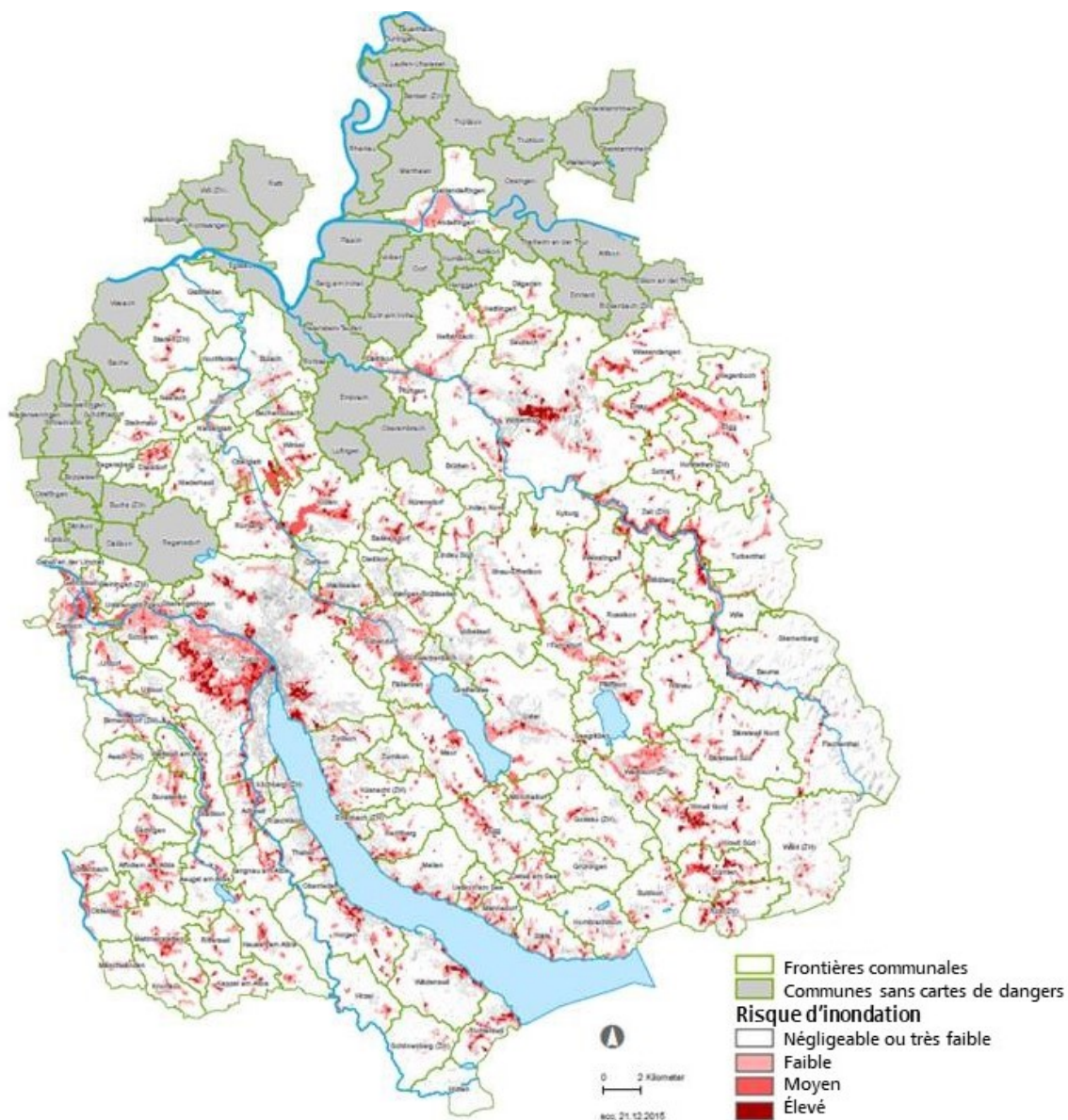


Illustration 37: État de la carte de risques « inondation » du canton de Zurich au 21.12.2015 [9]. Les communes pour lesquelles aucune carte de dangers et, par conséquent, aucune carte de risques n'était disponible ont été colorées en gris.

Annexe B Aspects méthodologiques

Certains aspects des travaux de projet seront présentés ci-après. Les expériences faites en matière de gestion des données seront notamment décrites (quantité de données, combinaison de bases de données), tout comme les différentes méthodes testées pour des étapes intermédiaires et la manière de comparer les résultats obtenus. Afin d'améliorer la lisibilité, certains extraits du corps de la présente étude ont été repris tels quels.

Annexe B 1 Grandes quantités de données

Parmi les données exploitées, les données relatives aux précipitations (CombiPrecip), disponibles au format NetCDF, sortent du lot en ce qui concerne le volume (voir chap. 3.2). Ce format permet de gérer une grande quantité de données et s'est imposé dans le monde scientifique pour les cubes de données (data cube) multidimensionnels (dans la présente étude, les coordonnées x et y, le temps, la somme de précipitations pour une heure). De plus, de nombreuses composantes logicielles ont connu des améliorations relatives au format NetCDF. Les données utilisées dans le cadre de la présente étude couvrent la totalité du territoire zurichois (50 x 70 km) et disposent d'une résolution horaire (depuis 2005). Cela correspond à quelque 120 000 heures, soit env. 400 millions de points de données et un volume non compressé de 1,5 GB de données (pour des valeurs à virgule flottante de 32 bits).

Chaque fichier NetCDF couvre un demi-mois (env. 15 jours). Ces plus de 300 bases de données ont été rassemblées dans deux fichiers qui se recoupent. Le fuseau horaire des données de précipitations enregistrées en UTC a dû être adapté (voir Annexe B 2.1) avant de pouvoir être compilées avec les données d'intervention (fuseau HNEC ou HAEC).

Les données peuvent être affichées avec un curseur de temps dans ArcMap. Les précipitations ont ainsi pu être mises en évidence pour une période donnée (voir chap. 4.1.1). Les données CombiPrecip ne sont pas disponibles en résolution horaire pour toute la période examinée dans la présente étude. Il y a en effet des lacunes allant parfois jusqu'à 111 heures. Pour confirmer le rapport entre les précipitations et le déclenchement d'une intervention, il est nécessaire qu'il ait plu sur le lieu d'une intervention dans les heures la précédant (voir chap. 4.1.1). Les interventions (44 en tout) pour lesquelles aucune donnée CombiPrecip n'est disponible dans la résolution temporelle (une heure) ont donc été exclues de l'étude.

Un ordinateur commun est suffisant pour ouvrir sans problème le volume de données décrit précédemment et permet de réaliser des manipulations simples sans perdre trop de temps. Il atteint toutefois ses limites dès que les opérations se compliquent ne serait-ce que légèrement. Il existe une solution aisée pour simplifier fortement le calcul : limiter le cube de données aux heures auxquelles des interventions ont réellement eu lieu. Comme de nombreuses interventions ont eu lieu simultanément, le volume de données diminue nettement. Il est à noter que la réduction du volume de données ne peut avoir lieu qu'après le calcul des sommes pour x heures et des maximales pour x heures. Cette astuce a permis de réduire nettement le temps de calcul, mais elle s'avère tout de même assez limitée en termes de flexibilité, notamment lors de l'analyse exploratoire (observation avec le curseur temporel) où les plages horaires manquantes sont gênantes.

De manière générale, il n'est pas recommandable de procéder à une réduction du volume de données. Il vaut mieux si possible travailler avec des axes temporels homogènes. Dans le cas des données CombiPrecip, il serait même utile de compléter les lacunes (heures manquantes) au préalable avec des valeurs NODATA.

Annexe B 2 Compilation géographique et temporelle des données

Pour chaque combinaison de données, il convient d'être attentif aux systèmes de coordonnées aussi bien dans un contexte géographique que temporel.

De nombreuses bases de données fédérales et cantonales se fondent sur le nouveau système de coordonnées nationales MN95. Les données d'intervention examinées dans la présente étude et les données CombiPrecip n'étaient cependant disponibles qu'avec l'ancien système de coordonnées MN03.

Annexe B 2.1 Compilation des données d'intervention et des données relatives aux précipitations

Définition temporelle

Les systèmes de coordonnées sont déterminants pour les cubes de données au format NetCDF. Outre une référence géographique (ancien système de coordonnées nationales MN03), les données relatives aux précipitations disposent aussi d'une indication temporelle. Attention : Les données CombiPrecip ne se basent pas sur le fuseau horaire suisse, mais sur le temps universel coordonné (UTC), ce qui n'est pas visible dans les métadonnées (elles ne décrivent jamais l'axe temporel). Il n'y a qu'en consultant les spécifications de format de NetCDF qu'on peut le constater.

Il faut donc convertir les données d'intervention (HNEC ou HAEC) pour les combiner avec les données de précipitations (UTC), faute de quoi il y a des écarts d'une heure en hiver et de deux heures en été. Il est recommandé de convertir les données d'intervention en UTC afin que la combinaison ne soit pas influencée par l'heure d'été.

Unité géographique principale lors de l'attribution des données relatives aux précipitations

Différentes variantes ont été testées lors de l'enrichissement des données d'intervention avec les données de précipitations, la question étant de savoir quelles informations sont importantes pour les interventions. La variante la plus simple est d'attribuer à chaque intervention les données de précipitations de la cellule d'un kilomètre carré sur laquelle l'intervention a eu lieu. Cette solution est particulièrement adaptée aux précipitations intenses localisées.

Pour les interventions à proximité de cours d'eau, il faut savoir si c'est réellement l'averse localisée qui a provoqué l'intervention ou si des précipitations dans le bassin versant situé en amont en sont responsables. Les données de la subdivision de la Suisse en bassins versants (voir Annexe A 3) ont fourni les bases nécessaires à l'évaluation de cette variante. Les bassins versants des cours d'eau observés dans la présente étude se trouvent partiellement au-delà du périmètre pour lequel des données de précipitations sont

disponibles. De plus, cette variante ne se prête pas à l'analyse de fortes précipitations localisées. C'est pourquoi elle n'a pas été examinée plus avant.

En revanche, une variante intermédiaire a été testée. Chaque intervention se voit attribuer les paramètres de précipitations mesurés dans le bassin versant sectoriel actuel. Ces bassins sont délimités par des lignes de partage des eaux et représentent des unités géographiques avec une réaction similaire à l'écoulement des eaux de pluie. Cette variante (moyenne sur le bassin versant sectoriel) n'est pas recommandée pour diverses raisons. En effet, elle n'apporte aucun avantage par rapport à la variante minimale (information de la cellule actuelle) pour les évaluations supplémentaires. De plus, la complexité des calculs est supérieure à celle des autres variantes.

Annexe B 2.2 Compilation des données d'intervention et des données relatives aux bâtiments

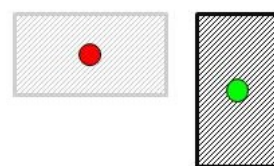
Pour ajouter des indications réalistes concernant le danger lié au ruissellement de surface ou aux inondations aux données d'intervention, il est essentiel de savoir si le lieu de l'intervention se trouve à l'intérieur d'un bâtiment ou non (voir chap. 4.1.2). Les données de localisation des lieux d'interventions ont donc été recoupées avec les données de la mensuration officielle du canton de Zurich concernant les constructions. Ensuite, un attribut indiquant si le lieu de l'intervention se situe à l'intérieur ou à l'extérieur d'un bâtiment a été ajouté aux données d'intervention. 85 % des interventions ont eu lieu à l'intérieur. Une analyse des 2508 (15 %) interventions restantes a démontré que 189 (1 %) d'entre elles étaient de type « eau dans le bâtiment » ou « eau dans le bâtiment (intempérie) ». Ces incohérences s'expliquent par les raisons suivantes :

- Modifications dans l'inventaire des bâtiments depuis 2012

Les types d'intervention « eau dans le bâtiment » et « eau dans le bâtiment (intempérie) » n'ont été saisies qu'à partir de 2012. Les données de mensuration datent quant à elles de 2017. On peut partir du principe que l'inventaire des bâtiments du canton de Zurich a évolué entre 2012 et 2017, ce qui signifie que les données d'intervention saisies basent en partie sur d'autres inventaires que celles utilisées dans la présente étude.

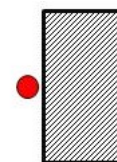
Type d'intervention « eau dans le bâtiment »

- Intervention à l'intérieur
- Intervention à l'extérieur



- Imprécisions dans la localisation des interventions

Même les interventions qui ont lieu à peine en dehors de ce que l'inventaire cantonal considère comme un bâtiment sont dotées de l'attribut « à l'extérieur de bâtiments ».



Nous avons renoncé à comparer diverses bases de données des mensurations officielles sur l'inventaire des bâtiments et à corriger manuellement, a posteriori, les données d'intervention.

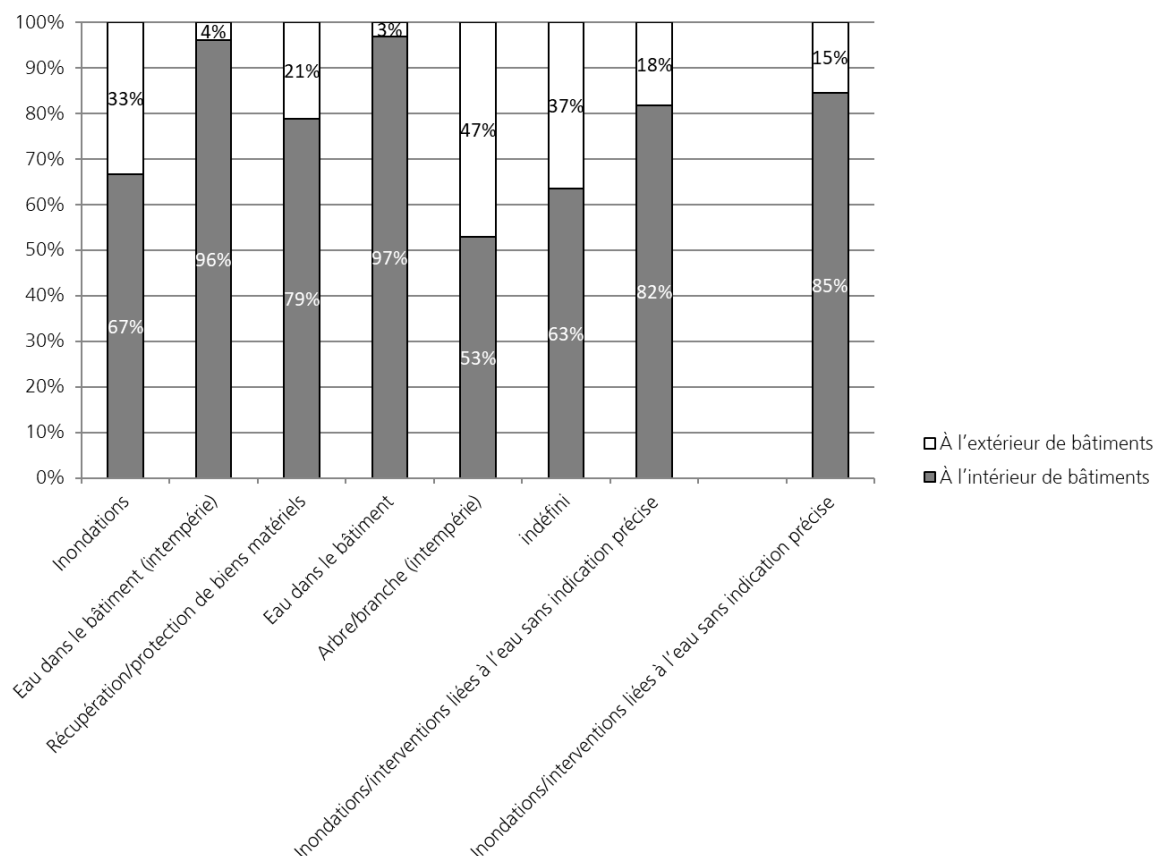


Illustration 38 : Répartition des interventions d'après leur type et le lieu de l'intervention (à l'intérieur/extérieur de bâtiments) [2], [5].

La comparaison générale de la répartition des différents types d'intervention à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments est plausible. La répartition des interventions sans indications précises (entre le 6.7.2005 et le 31.1.2012) correspond dans les grandes lignes à la répartition de l'ensemble des interventions. Les types « arbre/branche (intempérie) » et « inondations » sont les plus représentés à l'extérieur de bâtiments. Les interventions à l'intérieur de bâtiments appartiennent dans l'immense majorité (96 %) aux catégories « eau dans le bâtiment » et « eau dans le bâtiment (intempérie) ».

Annexe B 2.3 Compilation des données d'intervention et des données relatives aux dangers

Danger d'inondation par des cours d'eau ou des étendues d'eau

La carte de dangers « eau » montre quelles régions sont menacées par des inondations (voir chap. 3.3.1). Lorsqu'on observe la situation d'un bâtiment en la matière, le niveau de danger le plus élevé correspond à la zone de danger la plus importante qui parcourt au moins en partie le bâtiment. Ainsi, si un bâtiment se trouve en partie dans une zone de danger rouge, l'ensemble du bâtiment et toute intervention ayant eu lieu dans ce bâtiment se voient attribuer l'annotation « danger marqué » (Illustration 39, à droite). Les indications de danger sont reprises pour tous les points d'intervention situés dans un bâtiment.

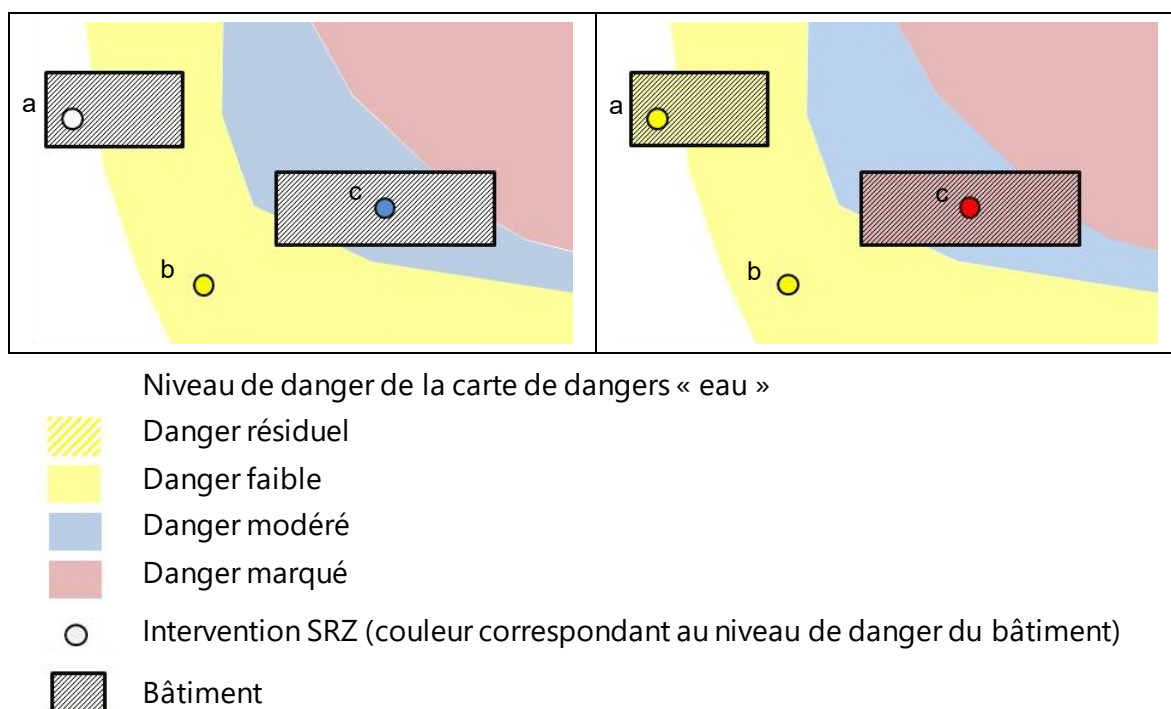


Illustration 39: Les données d'intervention (point) sont complétées avec les indications relatives au niveau de danger selon la carte de dangers « eau ». Représentation schématique.

Gauche : Compilation directe des données d'intervention. Droite : Des bâtiments de l'inventaire cantonal se voient attribuer le niveau de danger le plus élevé de la carte de dangers « eau » qui parcourt le bâtiment. Les points d'intervention qui se situent à l'intérieur du bâtiment potentiellement menacé reprennent ses indications de danger (points a et c). à l'extérieur du bâtiment, les points se voient attribuer le niveau de danger de la zone sur laquelle ils se trouvent (point b).

L'analyse de la part des données d'interventions qui se situent dans et en-dehors des régions menacées par des inondations a montré que les résultats sont semblables à la répartition des bâtiments selon les niveaux de danger de la carte de dangers « eau » (voir chap. 4.1.2). Ceux-ci sont quant à eux semblables aux estimations du Mobiliar Lab für Naturrisiken [23] concernant les bâtiments du canton de Zurich menacés par des inondations (Illustration 40).

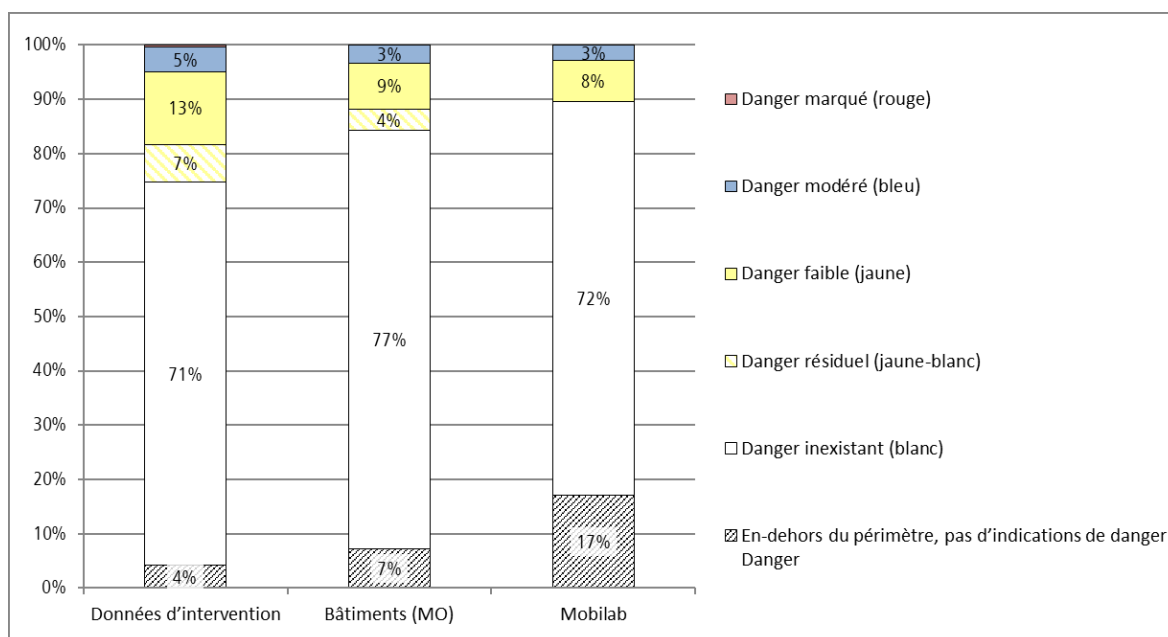


Illustration 40 : Répartition des données d'intervention et des bâtiments du canton de Zurich dans les régions à risque d'inondations.

Gauche : Analyse des données d'intervention du SRZ sur la base de la carte de dangers « eau » [5], [8]. Centre : Analyse des données relatives aux bâtiments de la mensuration officielle sur la base de la carte de dangers « eau » [2], [8]. Droite : Analyse du Mobiliar Lab für Naturrisiken [23]. Attention : dans cette analyse, les catégories « danger inexistant » et « danger résiduel » ont été réunies.

Danger lié au ruissellement de surface

La présente étude a considéré les bâtiments comme des obstacles au ruissellement de surface lors de l'élaboration de la carte de dangers « ruissellement de surface ». Les surfaces à revêtement dur comme les esplanades de maisons ont été légèrement penchées puisqu'elles constituent des chemins d'écoulement de l'eau. Par conséquent, la plupart des bâtiments se trouvent en-dehors des zones dangereuses ou ne sont que marginalement concernés, alors que les zones à revêtement dur qui les entourent sont fréquemment touchées par le ruissellement de surface (Illustration 41).



Illustration 41 : Extrait de la carte de dangers « ruissellement de surface » [7]. Les bâtiments ont été considérés comme des obstacles, les revêtements durs et les routes comme des chemins d'écoulement privilégiés. Sur la base de [2], [7].

Les points d'intervention du SRZ se situent souvent à l'intérieur d'un bâtiment. En recoupant directement ces points avec la carte de dangers « ruissellement de surface », on sous-estime donc grandement les effets réels (illustration 42). Les plans de bâtiments ont par conséquent été utilisés comme éléments géométriques déterminants. Dans la présente étude, on est parti du principe que si un immeuble se situait ne serait-ce que partiellement dans une zone à risque de ruissellement de surface, il était possible que de l'eau s'infilte dans le sous-sol. Dans ce cas, tout le bâtiment est à considérer comme potentiellement menacé (illustration 42, droite).

Pour illustrer l'affectation potentielle par le ruissellement de surface des lieux d'intervention, tous les bâtiments présents dans la mensuration officielle qui chevauchent les zones à risque se sont vus assigner l'attribut « potentiellement menacé par le ruissellement de surface ». Ce même attribut a été donné à toute intervention qui a eu lieu dans un bâtiment de ce type (illustration 42).

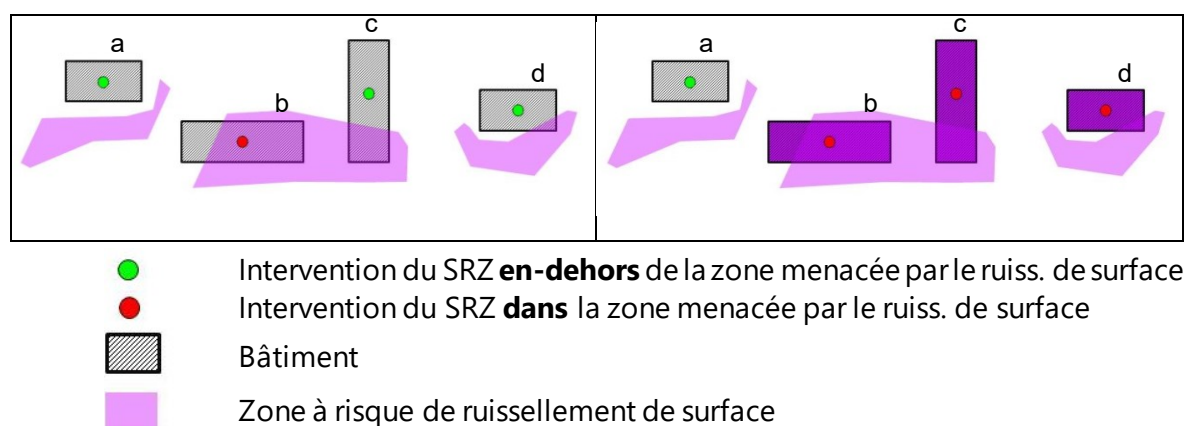


Illustration 42 : Compilation des indications concernant l'affectation par le ruissellement de surface et des données d'interventions (points), représentation schématique.

Gauche : Une compilation directe des points d'intervention et de la carte de dangers conduit à sous-estimer le ruissellement de surface puisque les bâtiments ne touchent souvent qu'à peine les surfaces à risque (b, c, d). Droite : Lorsqu'un bâtiment présent dans la mensuration officielle chevauche une zone à risque, on part du principe que l'ensemble du bâtiment est potentiellement menacé par le ruissellement de surface (bâtiment b, c, d en violet). Les points d'intervention qui se situent dans l'immeuble potentiellement menacé se voient assigner l'attribut « potentiellement menacé par le ruissellement de surface : oui ».

Annexe B 3 Analyse statistique

Diverses méthodes statistiques (p. ex. régression linéaire) existent pour trouver un modèle explicatif pour les interventions à l'aide de variables mesurables et des données d'interventions (chap. 2). Ces méthodes doivent cependant être appliquées avec précaution. Elles sont souvent axées sur les données, c'est-à-dire qu'elles expliquent des observations, mais pas nécessairement la réalité (corrélation ne signifie pas causalité). De plus, les modèles explicatifs qui en dérivent sont souvent trop complexes pour être utilisés dans la pratique. C'est pourquoi les analyses statistiques ne doivent servir que d'outil pour trouver des idées sur la manière de trouver un modèle explicatif simple et applicable dans la pratique.

Les données s'enrichissent déjà d'un pouvoir explicatif important au moment de la préparation des données et de l'analyse exploratoire. Sans surprise, les données relatives aux précipitations sont particulièrement parlantes dans la présente étude, raison pour laquelle une attention particulière leur a été accordée dans les analyses statistiques.

Annexe B 3.1 Transformation des axes principaux

Des informations tirées des données de précipitations (chap. 3.2) et des données relatives aux risques (chap. 3.3) peuvent être attribuées à chaque intervention du SRZ avec une valeur explicative plus ou moins importante. Ces informations sont ce qu'on appelle des variables indicatives (p. ex. somme des précipitations pour trois heures). Une transformation des axes

principaux a été effectuée afin de réduire le volume de données initial sans perdre de données importantes. Cela a permis de passer d'un volume initial de 16 variables indicatives sur les précipitations et deux variables indicatives concernant les risques à un total de deux variables latentes. Dans ce cadre, les informations relatives aux risques ont été considérées comme des variables métriques (voir chap. 3.3). Les variables latentes ne sont pas directement mesurables, mais dérivées des variables indicatives (chap. 4.2.1).

La transformation des axes principaux (principe component analysis PCA, utilisée ici comme synonyme d'analyse factorielle des composantes principales) permet de mieux comprendre l'espace créé par les indicateurs mesurés [17]. Dans cet espace, le premier axe principal correspond à la direction dans laquelle les données montrent la variance la plus élevée, le deuxième axe principal, perpendiculaire au premier, montre la deuxième variance la plus élevée, etc. La transformation des axes principaux permet de deviner le nombre et la nature des variables latentes. Les conclusions de deux transformations des axes principaux sont présentées ci-après.

Dans un premier temps, la transformation des axes principaux (PCA) a été appliquée à 16 variables indicatives relatives aux précipitations et deux variables relatives aux risques (chap. 3.3 et Illustration 43). Les situations météorologiques ne sont pas comprises dans cette analyse puisqu'en tant que variable catégorielle, elles ne peuvent pas être utilisées ici.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16	PC17	PC18
gc_max_01	-0.18	-0.17	-0.54	0.02	-0.02	0.29	0.22	-0.03	-0.03	-0.04	-0.07	-0.01	-0.04	0.04	-0.02	-0.02	0.07	7E-01
gc_sum_01	-0.18	-0.17	-0.54	0.02	-0.02	0.29	0.22	-0.03	-0.03	-0.04	-0.07	-0.01	-0.04	0.04	-0.02	-0.02	0.07	-7E-01
gc_max_02	-0.23	-0.27	-0.06	0.00	0.03	-0.63	0.05	0.18	-0.07	0.02	-0.02	-0.01	-0.03	0.07	-0.06	-0.07	0.64	-5E-16
gc_sum_02	-0.24	-0.27	-0.17	0.00	0.03	-0.49	0.08	0.15	-0.05	0.04	0.02	0.02	0.04	-0.06	0.04	0.06	-0.74	7E-16
gc_max_03	-0.28	-0.19	0.14	0.01	0.02	-0.01	-0.22	-0.44	0.39	-0.23	-0.02	-0.07	-0.26	0.41	-0.32	-0.27	-0.11	-6E-16
gc_sum_03	-0.28	-0.19	-0.03	0.01	0.01	0.04	-0.23	-0.33	0.36	0.00	0.37	0.05	0.30	-0.41	0.32	0.26	0.13	6E-16
gc_max_06	-0.28	-0.12	0.18	0.01	0.02	0.10	-0.23	-0.16	-0.31	0.11	-0.54	-0.10	-0.31	0.05	0.36	0.37	0.02	3E-16
gc_sum_06	-0.29	-0.02	-0.03	0.01	0.02	0.17	-0.43	0.02	-0.34	0.57	0.10	0.04	0.22	-0.05	-0.30	-0.33	-0.02	-7E-17
gc_max_12	-0.28	-0.04	0.22	-0.01	0.00	0.14	-0.02	0.17	-0.21	-0.62	-0.21	0.09	0.13	-0.46	-0.12	-0.30	0.00	-5E-17
gc_sum_12	-0.27	0.19	-0.06	-0.01	0.01	0.14	-0.34	0.50	-0.08	-0.29	0.43	0.03	-0.13	0.37	0.10	0.25	0.00	-5E-17
gc_max_24	-0.28	0.02	0.26	-0.02	-0.02	0.12	0.30	0.14	0.19	0.07	-0.24	-0.15	0.62	0.31	-0.20	0.30	0.01	4E-17
gc_sum_24	-0.22	0.41	-0.14	-0.04	-0.01	-0.04	-0.10	0.34	0.54	0.21	-0.29	-0.26	-0.20	-0.25	0.08	-0.18	0.00	-2E-16
gc_max_48	-0.27	0.03	0.27	-0.02	-0.02	0.10	0.39	0.01	0.01	0.17	0.14	0.31	-0.05	0.21	0.54	-0.45	-0.02	-8E-17
gc_sum_48	-0.19	0.49	-0.16	-0.05	-0.01	-0.18	0.02	-0.22	0.00	-0.01	-0.15	0.70	-0.01	-0.01	-0.21	0.22	0.01	2E-16
gc_max_72	-0.27	0.03	0.27	-0.02	-0.03	0.10	0.42	-0.03	-0.08	0.18	0.34	-0.15	-0.45	-0.29	-0.37	0.26	0.01	4E-17
gc_sum_72	-0.18	0.50	-0.15	-0.05	-0.01	-0.22	0.09	-0.39	-0.33	-0.16	0.14	-0.51	0.17	0.06	0.14	-0.12	-0.01	2E-16
OFA	-0.02	0.03	0.01	0.71	-0.70	-0.05	-0.03	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-2E-17
GK_hw	-0.01	0.08	0.01	0.70	0.71	0.01	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9E-17

Illustration 43 : Chargements PCA après l'application à 16 variables relatives aux précipitations et à deux variables relatives aux risques.

Les deux variables de dangers (tirées de la carte de dangers « eau » et de la carte de dangers « ruissellement de surface ») ne montrent aucune corrélation entre elles (Illustration 43). De même, les informations relatives aux dangers ne montrent aucune corrélation avec les variables liées aux précipitations. Les deux conclusions sont plausibles.

Il est intéressant de noter que les informations sur les dangers ont une valeur explicative nettement moins importante que celles tirées des indicateurs de précipitations (Illustration 44). La variance expliquée par les trois premiers axes principaux (PC1-3) ne peut pas être fortement rehaussée en prenant en compte les quatrième et cinquième axes principaux (passe de 80 à 90 %). Les informations contenues dans les trois premiers axes sont tirées des données de précipitations et les axes quatre et cinq représentent les informations sur les dangers.

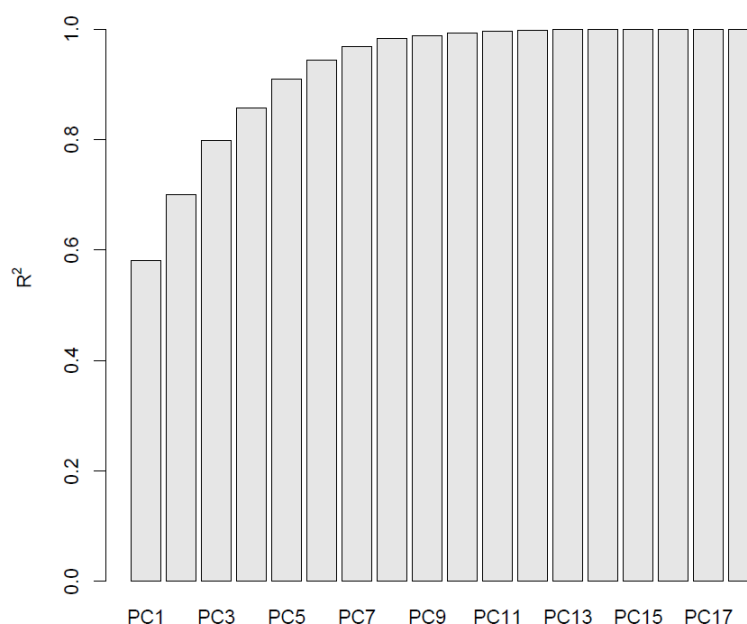


Illustration 44 : Variance relative, somme sur 18 axes principaux.

Étant donné que la préparation des variables relatives aux précipitations a été retravaillée plus tardivement dans le projet, une nouvelle transformation des axes principaux a été appliquée. Puisque les données sur les dangers n'ont pas une grande valeur explicative dans ce projet, la PCA a cette fois concerné uniquement les 16 informations relatives aux précipitations (Illustration 43). La matrice de chargement (Illustration 45) et la présentation de la variance relative cumulée (Illustration 46) montrent que les trois composantes principales expliquent plus de 90 % de la variance des données de précipitations.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16
gc_max_01	-0.22	0.23	0.55	0.26	-0.14	0.08	0.01	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	-0.71
gc_sum_01	-0.22	0.23	0.55	0.26	-0.14	0.08	0.01	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.71
gc_max_02	-0.27	0.19	0.00	-0.12	0.33	-0.42	-0.23	-0.04	0.34	-0.04	-0.17	0.28	-0.43	0.16	0.33	0.00
gc_sum_02	-0.27	0.17	0.07	-0.21	0.26	-0.42	0.14	-0.31	0.18	0.09	0.26	-0.26	0.39	-0.15	-0.37	0.00
gc_max_03	-0.28	0.16	-0.08	-0.15	0.21	0.07	-0.19	0.29	-0.41	-0.17	-0.40	0.22	0.01	-0.04	-0.54	0.00
gc_sum_03	-0.28	0.10	0.00	-0.34	0.11	0.06	0.37	-0.11	-0.60	-0.03	0.08	-0.11	-0.02	0.04	0.50	0.00
gc_max_06	-0.28	0.13	-0.12	-0.13	0.06	0.33	-0.28	0.41	0.32	0.00	-0.04	-0.19	0.47	-0.17	0.36	0.00
gc_sum_06	-0.27	-0.03	0.00	-0.42	-0.16	0.45	0.33	0.05	0.37	0.08	0.19	0.08	-0.36	0.14	-0.28	0.00
gc_max_12	-0.28	0.05	-0.22	0.09	-0.22	0.02	-0.57	-0.13	-0.22	0.15	0.31	-0.42	-0.28	0.22	-0.09	0.00
gc_sum_12	-0.25	-0.24	-0.01	-0.24	-0.57	-0.07	-0.20	-0.44	0.01	-0.04	-0.29	0.30	0.21	-0.18	0.07	0.00
gc_max_24	-0.27	0.00	-0.27	0.30	-0.12	-0.14	0.09	0.22	-0.08	-0.09	0.55	0.48	-0.01	-0.34	0.02	0.00
gc_sum_24	-0.20	-0.44	0.12	-0.05	-0.27	-0.45	0.17	0.49	0.02	-0.27	-0.07	-0.30	-0.02	0.19	-0.02	0.00
gc_max_48	-0.27	-0.01	-0.28	0.37	0.01	0.03	0.25	-0.07	0.04	0.27	-0.17	0.16	0.33	0.63	-0.01	0.00
gc_sum_48	-0.17	-0.50	0.18	0.05	0.26	0.01	-0.05	0.10	-0.09	0.71	-0.09	0.03	-0.11	-0.28	0.01	0.00
gc_max_72	-0.27	0.00	-0.29	0.39	0.04	0.11	0.28	-0.21	0.13	-0.20	-0.37	-0.36	-0.27	-0.40	0.00	0.00
gc_sum_72	-0.15	-0.51	0.18	0.11	0.42	0.27	-0.17	-0.27	0.01	-0.49	0.21	0.07	0.09	0.16	0.00	0.00

Illustration 45 : Chargements PCA après application à 16 variables relatives aux précipitations.

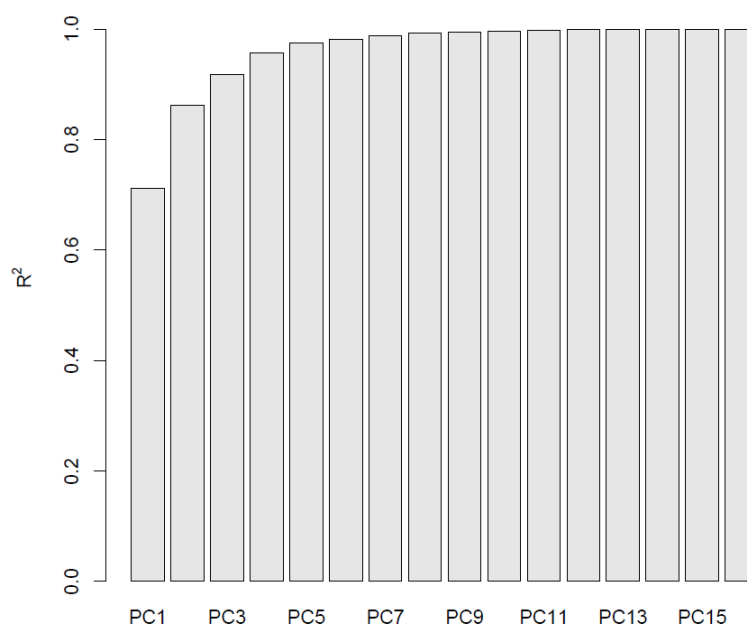


Illustration 46 : Variance relative, somme pour 16 axes principaux.

Les résultats des deux analyses factorielles des composantes principales ne sont pas très différents. Les changements de signe de certaines colonnes (p. ex. pour PC2 et PC3) sont le fruit du hasard et ne doivent pas être pris en compte. L'interprétation des premières colonnes est particulièrement intéressante. Ces dernières montrent le cheminement pour passer des variables indicatrices aux variables latentes.

Une des variables latentes proposées par la PCA correspond à une combinaison linéaire des variables indicatives mesurées, l'importance des colonnes étant reprise de la matrice de chargement.

Concrètement, la première composante principale (PC1) représente une mesure générique des précipitations. Plus il a plu (peu importe la durée des précipitations), plus la variable latente sera basse (en raison des chargements négatifs). La deuxième composante principale permet de différencier les précipitations intenses de courte durée et les précipitations de longue durée. Si la deuxième variable latente est élevée, c'est qu'il a plu en grande quantité dans un laps de temps restreint, alors que les sommes pour les précipitations de longue durée sont faibles en comparaison.

Annexe B 3.2 Partitionnement des données

Le partitionnement des données peut être l'étape suivant une transformation des axes principaux. Il se prête particulièrement aux études dans lesquelles une catégorisation des données (dans le cas présent les données d'intervention du SRZ) est réputée utile.

D'un point de vue technique, on suppose que les interventions peuvent être réparties dans au moins deux catégories distinctes. Les interventions déclenchées par des inondations liées à un cours d'eau sont par exemple de nature différente que les interventions déclenchées en raison de ruissellement de surface.

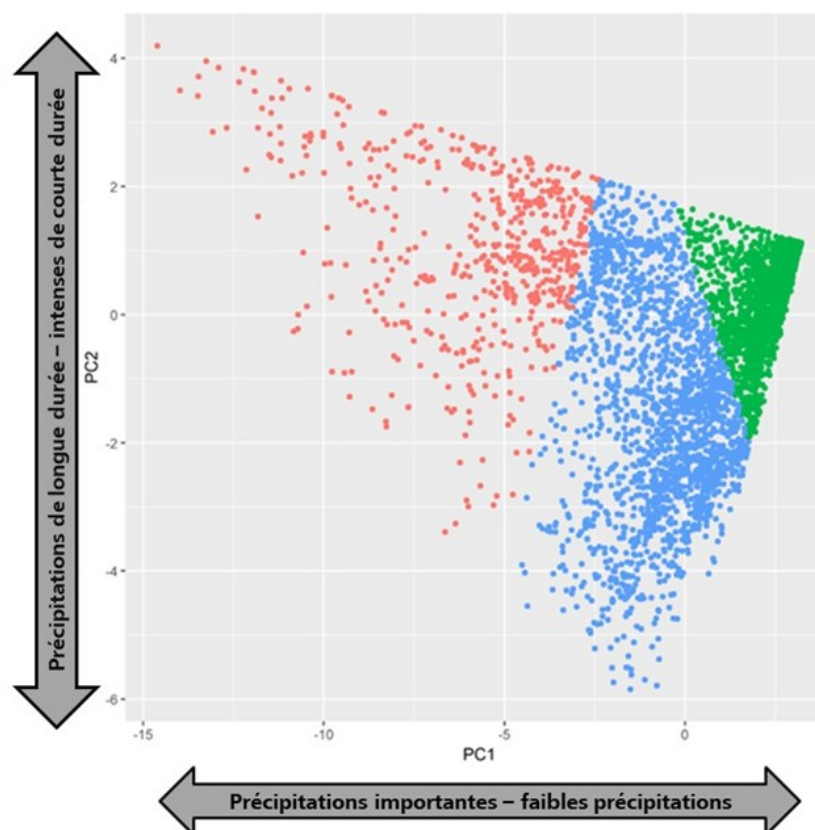


Illustration 47 : Résultats du partitionnement des données, présentés avec les deux premières composantes principales.

Le partitionnement des données a été mis en pratique à plusieurs reprises durant la présente étude (K-Means-Clustering [19]). Les résultats présentés dans l'illustration 47 et ci-après vont de pair avec la dernière transformation des axes principaux (chap. 4.2.2 et Illustration 45).

Il existe différentes méthodes pour trouver un nombre sensé de classes (clusters). Ces méthodes n'ont toutefois pas permis de trouver des résultats cohérents avec les données à disposition. Trois classes ont donc été choisies d'après des logiques techniques. Illustration 47 présente les interventions avec les composantes principales PC1 et PC2 et les sépare en trois classes (couleurs). On constate l'absence évidente d'intersections entre ces classes. La répartition proposée par le partitionnement des données doit être remise en question, puisqu'elle semble clairement arbitraire. Comme la transformation des axes principaux, le partitionnement des données n'a pas une validité en soi, mais sert à donner des idées.

Index des illustrations

Illustration 1 :	Rapport entre les fortes précipitations et les interventions du service de protection et de sauvetage de Zurich.	i
Illustration 2 :	Rapport entre les interventions et les types de menace « inondation » et « ruissellement de surface »	ii
Illustration 3 :	Évolution future du nombre d'interventions en raison du changement climatique, de la croissance démographique et de l'évolution des zones d'habitation.....	ii
Illustration 4 :	Structure du modèle explicatif et déroulement de l'étude : les données relatives aux interventions et aux précipitations et d'autres variables explicatives sont réunies dans une banque de données géographique. Le rapport entre les précipitations et les interventions du SRZ est examiné au moyen d'analyses statistiques et l'évolution du nombre d'interventions est estimée.....	3
Illustration 5 :	Données relatives aux interventions du SRZ en rapport avec les intempéries et/ou les dangers liés à l'eau sur le territoire zurichois entre le 6.7.2005 et le 7.1.2018. Données de base : [5], PK25 © 2017 swisstopo.....	4
Illustration 6 :	Disponibilité des données d'intervention du SRZ. Seules les données concernant la partie sud du canton (en bleu) sont disponibles pour la période du 6.7.2005 au 11.11.2012. Les données du 12.11.2012 au 7.1.2018 concernent tout le territoire zurichois [5].....	5
Illustration 7 :	Interventions entre le 1.2.2012 et le 7.2.2018 d'après leur type (gauche) et leur urgence (droite) (selon [5]).....	7
Illustration 8 :	Représentation schématique de l'obtention des paramètres « intensité des précipitations » et « somme des précipitations » pour les différentes durées étudiées (1, 2, 3, 6, 12, 24 48 ou 72 heures avant une intervention, lignes rouges).....	8
Illustration 9 :	Périmètre de la carte de dangers « eau » du canton de Zurich [8].....	9
Illustration 10 :	Extrait de la carte de dangers « ruissellement de surface » [7].....	10
Illustration 11 :	Flux de données jusqu'à la catégorisation dans le cadre de l'étude « Fortes précipitations et planification d'intervention du SRZ ». Seules les types d'intervention en vert (tableau en bas à gauche) ont été pris en compte.	13
Illustration 12 :	Nombre d'interventions en pourcent d'après la somme de précipitations pour x heures (gauche) et l'intensité maximale des précipitations durant les x heures avant l'intervention (droite).....	15
Illustration 13 :	Visualisation de l'intempérie du 7-8 juin 2015 (somme de précipitations pour 1 heure) et des interventions consécutives du SRZ durant la période [4], [5].....	15
Illustration 14 :	Visualisation de l'intempérie du 7-8 juin 2015 (somme de précipitations pour 3 heures) et des interventions consécutives du SRZ durant la période [4], [5].....	16
Illustration 15 :	Répartition des données d'intervention d'après les niveaux de danger liés à l'eau (inondation par des rivières, fleuves et lacs) (d'après [5], [8]).....	18

Illustration 16 : Densité de population en 2010 d'après [3] (gauche) et densité d'intervention dès le 12.11.2012 d'après [5] (droite) par hectare.	20
Illustration 17 : Comparaison de la densité de population [3] et du nombre d'interventions [5] (période du 12.11.2012 au 7.2.2018).....	20
Illustration 18 : Comparaison de la densité de population [3] et de la densité d'intervention [5] par hectare (période du 12.11.2012 au 7.2.2018).....	21
Illustration 19 : Résultats du partitionnement des données (trois groupes) pour les deux composantes principales.	24
Illustration 20 : Catégorisation selon le type de précipitations déclencheur. Distinction entre les catégories « indéfini » (catégorie 0), « précipitations de longue durée » (catégorie 1) et « précipitations intenses de courte durée » (catégorie 2).....	25
Illustration 21 : Interventions pour trois événements, colorées d'après leur catégorie ([5]). Des précipitations intenses de courte durée provoquées par des orages ont mené à des concentrations d'interventions en forme de cellule alors que les précipitations de longue durée ont conduit à un étalement des interventions sur le territoire.	26
Illustration 22 : Nombre d'heures (cas) par rapport au nombre d'interventions par heure.	27
Illustration 23 : Somme coulissante du nombre d'interventions en l'espace de six heures. D'après son expérience, un événement devient important pour le SRZ lorsque le nombre d'interventions qui s'ensuivent dépasse 50 en l'espace de six heures (ligne rouge).	27
Illustration 24 : Répartition des sommes pour x heures (gc_sum_x, à droite) et des intensités maximales par heure (gc_max_x, à gauche) pour des périodes de 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 et 72 heures (percentiles : 10 %, 25 %, médiane, 75 %, 90 %).....	29
Illustration 25 : Comparaison des paramètres de précipitations des événements importants pour le SRZ entre juillet 2005 et janvier 2018 (lignes) et la répartition des valeurs de précipitations pour l'ensemble des interventions durant cette période (boîtes) pour les précipitations intenses de courte durée (en haut) et les précipitations de longue durée (en bas).	30
Illustration 26 : Valeurs percentiles des précipitations intenses de courte durée (catégorie 2, gauche) et des précipitations de longue durée (catégorie 1, droite) pour différents nombres d'interventions définissant un événement important pour le SRZ.....	33
Illustration 27 : Percentiles (minimum, 5 %, 25 %, 50 %, 75 %, 95 %, maximum) pour les paramètres de précipitations « intensité horaire maximale » (droite) et « somme pour 12 heures » (droite) pour les 16 événements importants pour le SRZ.....	34
Illustration 28 : Événements majeurs liés aux précipitations trouvés au moyen des seuils d'intensité horaire maximale dans les trois heures précédant l'intervention et de somme pour 12 heures.	35
Illustration 29 : Part des stations indiquant depuis 1901 une tendance positive ou négative pour les fortes précipitations journalières du percentile de 99 % (a) et le nombre de jours durant lesquels le percentile de 99 % a été dépassé (b). Illustration tirée de [26].	38

Illustration 30 : Modélisation de la croissance de la population du canton de Zurich jusqu'en 2040 (gauche). Nombre d'habitants supplémentaire dans les régions menacées par des inondations ou le ruissellement de surface (droite). Sur la base de [3], [7], [8].	40
Illustration 31 : Corrélation entre fortes précipitations et interventions du service de protection et de sauvetage de Zurich : lorsqu'un des seuils est dépassé, une accumulation de plus de 50 interventions en l'espace de six heures est à attendre pour le SRZ.	42
Illustration 32 : Rapport entre les interventions et les processus de danger « inondation par des cours d'eau ou des lacs » et « ruissellement de surface ».	43
Illustration 33 : Évolution future des interventions suite au changement climatique et à la croissance démographique et des zones d'habitation.	44
Illustration 34 : Répartition saisonnière des précipitations pour les situations météorologiques 16 (South, anticyclonic), 17 (West, indifférent) et 18 (SouthWest, indifférent) selon la classification GWT26_Z500 [22].	49
Illustration 35 : Fréquence saisonnière des situations météorologiques entre le 12.11.2012 et le 7.1.2018 (ensemble des données, indépendantes des données d'intervention du SRZ). Classification GWT26_Z500 [28].	50
Illustration 36 : Extrait de la carte de risques « inondations » du canton de Zurich avec légende ([9],[10]).	53
Illustration 37 : État de la carte de risques « inondation » du canton de Zurich au 21.12.2015 [9]. Les communes pour lesquelles aucune carte de dangers et, par conséquent, aucune carte de risques n'était disponible ont été colorées en gris.	54
Illustration 38 : Répartition des interventions d'après leur type et le lieu de l'intervention (à l'intérieur/extérieur de bâtiments) [2], [5].	58
Illustration 39 : Les données d'intervention (point) sont complétées avec les indications relatives au niveau de danger selon la carte de dangers « eau ». Représentation schématique.	59
Illustration 40 : Répartition des données d'intervention et des bâtiments du canton de Zurich dans les régions à risque d'inondations.	60
Illustration 41 : Extrait de la carte de dangers « ruissellement de surface » [7]. Les bâtiments ont été considérés comme des obstacles, les revêtements durs et les routes comme des chemins d'écoulement privilégiés. Sur la base de [2], [7].	61
Illustration 42 : Compilation des indications concernant l'affectation par le ruissellement de surface et des données d'interventions (points), représentation schématique.	62
Illustration 43 : Chargements PCA après l'application à 16 variables relatives aux précipitations et à deux variables relatives aux risques.	63
Illustration 44 : Variance relative, somme sur 18 axes principaux.	64
Illustration 45 : Chargements PCA après application à 16 variables relatives aux précipitations.	64
Illustration 46 : Variance relative, somme pour 16 axes principaux.	65
Illustration 47 : Résultats du partitionnement des données, présentés avec les deux premières composantes principales.	66

Index des tableaux

Tableau 1 :	Différents attributs pour les interventions du SRZ selon la période, le type d'intervention/le code et le nombre d'interventions par catégorie (selon [5]).....	6
Tableau 2 :	Tableau croisé : répartition des 16 193 données d'intervention enrichies avec les données de précipitations dans la carte de dangers « eau » (inondation par des rivières, fleuves et lacs) ou la carte de dangers « ruissellement de surface ».....	19
Tableau 3 :	Résultats de la transformation des axes principaux : les interventions du SRZ peuvent s'expliquer à l'aide de deux composantes principales (variables latentes).....	23
Tableau 4 :	Évènements avec plus de 50 interventions en l'espace de six heures (par ordre chronologique). Catégorie 0 « indéfini », catégorie 1 « précipitations de longue durée », catégorie 2 « précipitations intenses de courte durée ».....	28
Tableau 5 :	Évaluation du percentile de 99 % des précipitations par heure pour la période totale et pour la période pour laquelle des données d'intervention sont à disposition.	33
Tableau 6 :	Comparaison des seuils avec les statistiques de valeurs extrêmes de trois stations (données : MétéoSuisse).....	34
Tableau 7 :	Évaluation des événements liés à des précipitations pour lesquelles les seuils ont été dépassés.....	36
Tableau 8 :	Croissance de la population menacée par des inondations ou le ruissellement de surface jusqu'en 2030 et 2040.....	41
Tableau 9 :	Attributs des données d'interventions fournies par le SRZ, y c. indications concernant le type/format, la définition d'un champ obligatoire et des explications [5].....	48
Tableau 10 :	Nombre d'interventions par situation météorologique (S) le jour de l'intervention (J) ou la veille de l'intervention (V) et fréquence relative.....	51

Documents référencés

Géodonnées

- [1] Abflussprozesskarte. Geographisches Informationssystem des Kantons Zürich (GIS-ZH). <https://geolion.zh.ch/geodatensatz/845> Stand : 26.06.2018
- [2] Amtliche Vermessungsdaten AV DM01-ZH, Grunddatensatz. Geographisches Informationssystem des Kantons Zürich (GIS-ZH). <https://geolion.zh.ch/geodatenprodukt/1035> Stand : 26.06.2018
- [3] Bevölkerungsverteilung 2010. Hektardaten aus GEOSTAT (STATPOP 2010).
- [4] CombiPrecip Niederschlagsdaten MeteoSchweiz. Hourly Precipitation Estimation through Raingauge-Radar : CombiPrecip. https://www.meteoschweiz.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/produkt/raeumliche-daten-combiprecip/doc/ProdDoc_CombiPrecip.pdf Stand : 26.06.2018
- [5] Einsatzdaten Schutz & Rettung Zürich 06.07.2005–07.01.2018. Unveröffentlichte Daten.
- [6] Einzugsgebietsgliederung Schweiz. BAFU <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/karten/einzugsgebietsgliederung-schweiz.html> Stand : 26.06.2018
- [7] geo7 (2018) : Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz im Auftrag von BAFU, SVV, KGV. <https://map.geo.admin.ch> Stand : 01.07.2018
- [8] Naturgefahrenkarte Wasser. Geographisches Informationssystem des Kantons Zürich (GIS-ZH). <http://www.geolion.zh.ch/geodatensatz/784> Stand : 01.01.2017
- [9] Risikokarte Naturgefahren. Geographisches Informationssystem des Kantons Zürich (GIS-ZH). <http://www.geolion.zh.ch/geodatensatz/show?gdsid=243> Stand : 01.01.2017

Bases techniques spécifiques

- [10] AWEL (2018) : Risikokarte Kanton Zürich. <https://awel.zh.ch/internet/baudirektion/awel/de/wasser/hochwasserschutz/risikokarte.html> Stand : 05.03.2018
- [11] BABS Bundesamt für Bevölkerungsschutz (2014) : Trendanalyse Bevölkerungsschutz 2025. Chancen und Herausforderungen aus den Bereichen Umwelt, Technologie und Gesellschaft. BABS, Zürich.
- [12] BAFU Bundesamt für Umwelt (2015) : Anpassung an den Klimawandel. Bedeutung der Strategie des Bundesrates für die Kantone. BAFU, Bern.
- [13] BAFU Bundesamt für Umwelt (2018) : Gefährdungskarte Oberflächenabfluss : Quantensprung für die Prävention von Wasserschäden <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/dossiers/gefaehrungskarte-oberflaechenabfluss-quantensprung-fuer-die-praevention-von-wasserschaeden.html> Stand : 28.08.2017
- [14] BBK Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (D) (2016) : Klimawandel – Herausforderung für den Bevölkerungsschutz. BBK, Bonn.

- [15] C2SM, MeteoSchweiz, ETH, NCCR Climate und OcCC Zürich (2011) : Swiss Climate Change Scenarios CH2011. www.ch2011.ch
- [16] C2SM, MeteoSchweiz, ETH, NCCR Climate und OcCC Zürich (2011) : CH2011 Extension Series : Projections of Extreme Precipitation in Switzerland. www.ch2011.ch
- [17] Ernste, H. (2011) : Angewandte Statistik in Geografie und Umweltwissenschaften. vdf, Zürich.
- [18] geo7 (2018) : Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz. Technischer Bericht. Im Auftrag von BAFU, SVV, KGV. BAFU, Bern.
- [19] Hartigan, J. A.; Wong, M. A. (1979) : A K-Means Clustering Algorithm. Journal of the Royal Statistical Society. Series C, Vol 28, No. 1, pp. 100-108.
- [20] Kutschker, T.; Trommler, M. (2013) : Auswirkungen von Starkregenereignissen auf die Gefahrenabwehr im Ballungsraum Rhein-Main. Projektbericht. Methoden zur Auswertung des Zusammenhangs zwischen Starkregenereignissen und Einsatzfähigkeit der Feuerwehr. Universität Wien, Wien.
- [21] Erdin R., 2009 : Combining rain gauge and radar measurements of a heavy precipitation event over Switzerland. Veröffentlichungen der MeteoSchweiz, MeteoSwiss.
- [22] MeteoSwiss (2010) Characterisation of Weather Type Classification GWT26_Z500. Internes Dokument.
- [23] Mobiliar Lab für Naturrisiken (2016) : Hochwasserrisiko Schweiz. <http://www.hochwasserrisiko.ch/HochwassergefaehrungCH/Karte.html> Stand : 27.02.2018
- [24] Panziera, L., Gabella, M., Zanini, S., Hering, S., Germann, U., Berne, A. (2016) A radar-based regional extreme rainfall analysis to derive the thresholds for a novel automatic alert system in Switzerland. Hydrol. Earth Syst. Sci. 20, 2317–2332.
- [25] Rajczak, J.; Schär, C. (2017) : Projections of future precipitation extremes over Europe : A multimodel assessment of climate simulations. Journal of Geophysical Research : atmospheres, 122, 10,773–10,800. <https://doi.org/10.1002/2017JD027176>
- [26] Scherrer, S. C., Fischer, E. M., Posselt, R., Liniger, M. A., Croci-Maspoli, M., Knutti, R. (2016) : Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. Journal of Geophysical Research Atmosphere 121, doi : <https://doi.org/10.1002/2015JD024634>
- [27] Sweeney, T. L. : Modernized Areal Flash Flood Guidance, NOAA Technical Report NWS HYDRO 44, Hydrology Laboratory, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD.
- [28] Weusthoff, T. (2011) : Weather Type Classification at MeteoSwiss – Introduction of new automatic classification schemes. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 235, 46 pp. MeteoSchweiz, Zürich.

National Centre for Climate Services NCCS

Le NCCS est conçu comme un centre virtuel regroupant actuellement huit unités administratives de la Confédération:

- Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse)
- Office fédéral de l'environnement (OFEV)
- Office fédéral de l'agriculture (OFAG)
- Office fédéral de la santé publique (OFSP)
- Office fédéral de la protection de la population (OFPP)
- Office fédéral de la sécurité alimentaire et des affaires vétérinaires (OSAV)
- ETH Zurich
- Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL)

Autres partenaires:

- Agroscope
- Centre Oeschger pour la recherche climatologique
- L'institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL)
- ProClim – Forum pour le climat et les changements globaux

Le centre a son siège au sein de MétéoSuisse.

Link: [NCCS - plateforme Internet](#)