



Inondations du 21 juin 2019 au Val-de-Ruz
Évaluation de la contribution des phénomènes de ruissellement et
de remontée de nappe dans l'évènement survenu à Villiers et
Dombresson
Projet de Master



Image extraite de la vidéo prise par l'hélicoptère de l'armée le lendemain de la crue, Route des Fontaines à Villiers

Auteur : Fanny Gretillat
Directeur : Giovanni De Cesare
Assistant : Christian Moertl
Collaboratrice : Myriam Robert

15 janvier 2021

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais d'abord adresser toute ma reconnaissance à Madame Myriam Robert, cheffe de la section Lacs et cours d'eau du SPCH (Service des Ponts et Chaussées) de l'État de Neuchâtel, qui m'a proposé, comme sujet pour ma thèse, un cas d'étude concret. Je rêvais de pouvoir allier un aspect pratique à ce travail académique. Merci à elle pour sa confiance, sa disponibilité et pour la liberté qu'elle m'a laissée dans l'orientation du projet.

Je désire remercier sincèrement ma responsable de stage Madame Stéphanie André, qui m'a encouragée à prendre contact avec Madame Myriam Robert et qui m'a recommandée auprès d'elle.

Je remercie spécialement Monsieur Giovanni De Cesare, directeur de ma thèse, qui a volontiers accepté de m'accompagner dans cette expérience de collaboration avec le SPCH du canton de Neuchâtel et sans qui ce travail n'aurait pas pu se concrétiser.

Je tiens à témoigner toute ma gratitude à mon superviseur Monsieur Christian Moertl, pour avoir beaucoup valorisé mon travail, mes efforts et m'avoir sincèrement encouragée. Merci aussi pour sa disponibilité et pour ses conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Un merci tout particulier à Monsieur Giona Preisig, maître assistant au CHYN (Centre d'hydrogéologie et de géothermie de l'Université de Neuchâtel), qui s'est accompli du rôle de superviseur inofficiel à ma plus grande satisfaction. Merci pour sa grande disponibilité, sa patience et le plaisir qu'il démontre à accompagner les étudiants. Merci à lui de m'avoir "coachée" dans chaque étape de mon travail de terrain, de s'être chargé du traitement des données de la campagne géophysique, de m'avoir aidée à l'interprétation des données.

Je tiens aussi à témoigner ma gratitude au CHYN, qui a couvert les frais de mon travail de terrain.

Merci à Roberto Costa, Arnaud Rüegg, Léa Perrochet, Isabelle Butty, Christian Rochat, Olivier Kessler, Massimo Vitalba, Elisenda Bardina, Patrick Vuilleumier, Emmanuel Marclay, Simon Scherrer pour leurs contributions diverses.

Un grand merci à ma maman, Carole, pour la relecture de ma thèse.

Enfin, je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les membres de ma famille, les amis et mon petit-ami qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Résumé

En Suisse, la cartographie des dangers naturels est un précieux outil d'aménagement du territoire. Les surfaces, délimitées au moyen du code couleur rouge, bleu ou jaune, correspondent respectivement à des zones d'interdiction, de réglementation et de sensibilisation. Le danger d'inondation, représenté par les crues des cours d'eau, est soumis à la cartographie. Pourtant, le débordement d'un cours d'eau n'est pas l'unique phénomène à l'origine d'inondations ; d'autres phénomènes tels que les remontées de nappe et le ruissellement de surface génèrent aussi ce type de danger. Ces derniers sont responsables d'importants dommages en Suisse et ils représentent une lacune dans la gestion intégrée des risques.

Le 21 juin 2019, les trois phénomènes de débordement de cours d'eau, de ruissellement et de remontée de nappe se sont combinés, causant CHF 12.7 millions de dégâts matériels, dans la zone de Villiers et Dombresson (Val-de-Ruz, canton de Neuchâtel). Le concept de protection contre les crues a été confié à un bureau d'ingénieur. Les phénomènes de ruissellement et de remontée de nappe sont, quant à eux, au coeur du présent travail.

Tout d'abord, l'attribution, a posteriori, des sinistres recensés par l'établissement cantonal d'assurance et de prévention (ECAP), aux trois phénomènes en jeu, est réalisée par le biais de la carte de danger INO et d'autres indices. La classification montre que la crue est à l'origine d'une part très majoritaire des sinistres, suivie par la remontée de nappe et, loin derrière, par le ruissellement.

Deux objectifs sont ensuite complétés, axés sur l'évènement du 21 juin 2019 et ses dommages associés dans le périmètre d'étude (bassins versants autour de Villiers et Dombresson).

En premier lieu, la validité des cartes existantes représentant le ruissellement et la remontée de nappe est évaluée dans une perspective d'amélioration de la gestion intégrée des risques en Suisse (volet académique). D'une part, l'évaluation de la carte de l'aléa ruissellement, publiée à l'échelle nationale, est réalisée par l'application d'une méthode d'évaluation quantitative utilisant les proxy (sinistres de l'ECAP). La validité de la carte se révèle être assez mauvaise, en tout cas son pouvoir prédictif. La méthode est probablement trop simplifiée et on suggère de l'appliquer à nouveau, plus exhaustivement, à d'autres cas d'étude. D'autre part, l'évaluation de la carte de remontée de nappe, établie selon une méthodologie spécialement conçue pour la zone d'étude, se base sur la compréhension générale du phénomène, complétée par revue de la littérature, collecte de données et par investigation géologique et hydrogéologique de la zone. Cette dernière consiste en la réalisation de relevés piézométriques et d'une campagne géophysique. La synthèse des éléments connus suggère que la cartographie de remontée de nappe devrait inclure l'hydrodynamique de la nappe et représenter les remontées sous la surface topographique.

En second lieu, des propositions de mesures de lutte adaptées à la zone d'étude sont proposées dans une perspective d'amélioration de la gestion des risques dans les villages de Villiers et Dombresson (volet pratique).

Summary

The mapping of natural hazards is a valuable tool for spatial planning in Switzerland. Areas delimited by means of color coding indicate zones of prohibition (red), regulation (blue) and awareness (yellow). The danger of flooding resulting from river spillover is represented by such maps. However, the overflow of a river is not the only phenomenon that causes flooding; other phenomena such as rising groundwater levels and surface runoff also lead to this danger. The latter are responsible for significant damage in Switzerland and represent a gap in integrated risk management.

On June 21, 2019, the three phenomena of river overflow, runoff and rising groundwater levels combined in the area of Villiers and Dombresson (Val-de-Ruz, canton of Neuchâtel), causing CHF 12.7 million in damage. An engineering office was tasked with the elaboration of a flood protection concept afterward. The required analysis of runoff and rising groundwater level risk is at the heart of this work.

First of all, the damages identified by the cantonal insurance and prevention establishment (ECAP), are a posteriori attributed to the three phenomena using the INO danger maps among others. The analysis shows that flooding accounts for the vast majority of claims, followed by rising groundwater levels and, far behind, runoff.

Two issues are then investigated based on the event of June 21, 2019 and its associated impacts on the study area (watersheds around Villiers and Dombresson).

First, the validity of the existing maps representing runoff and rising groundwater levels is assessed to improve integrated risk management in Switzerland (academic component). On the one hand, the assessment of the runoff hazard map, published at the national level, is carried out by applying a quantitative assessment method using proxies (ECAP claims). The predictive power of the map turns out to be very limited. However, the used method is likely to be oversimplified and a more detailed application to other case studies is suggested. On the other hand, the evaluation of the map of the rise of the groundwater table, established according to a methodology specifically designed for the study area, is based on a general understanding of the physical processes, supplemented by literature review, data collection and geological and hydrogeological investigations of the area. The latter consist of piezometric surveys and a geophysical analysis. The evidence suggests that upwelling mapping should include the hydrodynamics of the water table and represent upwelling below the topographic surface.

Second, proposals for control measures adapted to the study area are given to improve risk management in the villages of Villiers and Dombresson (practical component).

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Cartographie des dangers naturels en Suisse	1
1.1.1	Cadre légal, contenu et implications	1
1.1.2	Dangers d'inondation (crue, ruissellement, remontée de nappe)	2
1.2	Ruissellement	3
1.2.1	Phénomène	3
1.2.2	Dommages associés	4
1.2.3	Mesures de lutte	6
1.3	Remontée de nappe	9
1.3.1	Phénomène	9
1.3.2	Dommages associés	11
1.3.3	Mesures de lutte	12
1.4	Zone d'étude	14
1.4.1	Situation géographique	14
1.4.2	Danger d'inondation par les crues	14
1.5	Crue du 21 juin 2019 à Villiers-Dombresson	16
1.5.1	Description factuelle	16
1.5.2	Réaménagements effectués et compréhension a posteriori	17
1.5.3	Adéquation de la carte de danger avec l'évènement du 21 juin 2019	18
1.6	Objectifs du présent travail	19
2	Données du projet	21
2.1	Sources des données	21
2.2	Contenu de la carte de l'aléa ruissellement	22
2.3	Contenu de la carte de danger "remontée de nappe"	23
3	Méthodologie	25
3.1	Approche générale	25
3.2	Analyse des sinistres du 21 juin 2019	26
3.3	Ruissellement	30
3.3.1	Manifestation du phénomène dans la zone d'étude (21 juin 2019 et historique)	30
3.3.2	Méthode SCS-CN	32
3.3.3	Compatibilité du scénario modélisé par la carte et de l'évènement	39
3.3.4	Méthode d'évaluation de la carte de l'aléa ruissellement	41
3.4	Remontée de nappe	44
3.4.1	Manifestation du phénomène dans la zone d'étude (21 juin 2019 et historique)	44
3.4.2	Caractéristiques de la zone orientées "nappe"	46
3.4.3	Hypothèses sur les causes de la remontée de nappe du 21 juin 2019	52
3.4.4	Analyse des fluctuations de nappe aux Prés Royer	53
3.4.5	Méthodes d'investigation géologique et hydrogéologique	53
3.4.6	Reconstitution de l'évènement du 21 juin 2019	56

4 Résultats	57
4.1 Ruissellement	57
4.1.1 Quantification du ruissellement	57
4.1.2 Enquête de terrain	59
4.1.3 Évaluation quantitative de la carte de l'aléa ruissellement	60
4.2 Remontée de nappe	62
4.2.1 Fluctuations de nappe aux Prés Royer	62
4.2.2 Géologie et hydrogéologie	65
4.2.3 Reconstitution de l'évènement du 21 juin 2019	69
5 Discussion	73
5.1 Ruissellement	73
5.1.1 Évènement du 21 juin 2019	73
5.1.2 Validité de la carte de l'aléa ruissellement	74
5.1.3 Proposition de mesures	76
5.2 Remontée de nappe	77
5.2.1 Phénomène de remontée de nappe à Dombresson	77
5.2.2 Causes de la remontée de nappe du 21 juin 2019	78
5.2.3 Validité de la carte de danger "remontée de nappe"	79
5.2.4 Proposition de mesures	79
6 Conclusion	81
6.1 Synthèse	81
6.2 Gestion intégrée des risques en Suisse	82
Annexes	89
Annexe 1 : Signification des zones de danger et implications pour l'aménagement du territoire .	89
Annexe 2 : Coupe stratigraphique	90
Annexe 3 : Ruissellement - sortie de terrain du 30 octobre 2020	91
Annexe 4 : Remontée de nappe - travaux de terrain des 17, 18 novembre et 10 décembre 2020 .	94

Liste des abréviations

BV : Bassin versant

CEPRI : Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation

CHM : Chaumont

CHYN : Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie de l'Université de Neuchâtel

DOM : Dombresson

ECAP : Établissement Cantonal d'Assurance et de Prévention

FAR : Taux de fausses alarmes (False Alarm Ratio)

GISER : Gestion Intégrée Sol – Erosion – Ruissellement des services publics de Wallonie (Belgique)

INO : Inondation par les crues

INRAE : Institut National de la Recherche Agronomique (France)

MNT : Modèle Numérique de Terrain

PC : Petite Combe

POD : Probabilité de détection (Probability Of Detection)

UIR : Union Intercantonale de Réassurance

SDI-VdR : Service de Défense Incendie du Val-de-Ruz

SIG : Système d'Information Géographique

SITN : Système d'Information géographique du Territoire Neuchâtelois

SNCF : Société Nationale des Chemins de Fer Français

TOPPS : Train Operators to Promote Practices and Sustainability

Liste des figures

1	Diagramme intensité-probabilité pour l'attribution des degrés de danger [2]	2
2	Processus d'écoulement et réaction lors de fortes pluies [7]. Gauche : Hortonian overland flow - Centre : saturation overland flow - Droite : subsurface runoff	3
3	Situations de danger causées par la pluie [11]	5
4	Schéma des divers cheminements de pénétration d'eau dans un bâtiment [11]	6
5	Mesures de gestion de l'afflux d'eaux superficielles depuis les parcelles voisines [11]	7
6	Schéma en coupe d'un système typique d'écoulement d'eau souterraine [16]	9
7	Carte Siegfried première édition (1874) Fond de plan : Service WMS swisstopo	14
8	Danger d'inondation dans la zone de Villiers - Dombresson Fond de plan : Service WMS swisstopo	15
9	Plan de situation Fond de plan : Service WMS swisstopo	17
10	Modèle de pluie de la carte de l'aléa ruissellement [33]	22
11	Carte de dangers liés aux remontées de nappe dans la zone de Villiers - Dombresson Fond de plan : Service WMS swisstopo	24
12	Carte synthétique des effets géoréférencés Fond de plan : Service WMS swisstopo	26
13	Reclassification des causes des sinistres recensés par l'ECAP Fond de plan : Service WMS swisstopo	27
14	Répartition spatiale des sinistres couverts par l'ECAP Fond de plan : Service WMS swisstopo	29
15	Périmètre d'étude composé de sous bassins versants Fond de plan : Service WMS swisstopo	30
16	Historique des sinistres causés par le ruissellement hors zone de danger INO Fond de plan : Service WMS swisstopo	32
17	Ruissellement en fonction des précipitations et du CN selon l'équation 3	33
18	Organigramme de la méthodologie employée dans le système d'information géographique QGIS pour l'estimation du ruissellement de surface avec la méthode SCS-CN	34
19	Couverture du sol	38
20	Groupes hydrologiques de sol	38
21	Somme des précipitations lors de l'évènement du 21 juin 2019 (interpolé à partir du rapport Scherrer [27])	38
22	Position des stations météo DOM, CHM et PC Fond de plan : Service WMS swisstopo	39
23	Distribution temporelle des précipitations aux stations Chaumont, Dombresson, Petite Combe lors de l'évènement du 21 juin 2019	40
24	Lieux touchés par la remontée de la nappe le 21 juin 2019 ss. Fond de plan : Swissimage2017 © Swisstopo	44
25	Photos des lieux touchés par la remontée de nappe après l'évènement du 21 juin 2019	45
26	Atlas géologique (AG25) et zones de protection des captages des Prés Royer Sources : Service WMS swisstopo	46
27	Esquisse tectonique NW-SE du Val-de-Ruz et étendue topographique des bassins versants (BV) du Seyon et de la Serrière (profils 1 et 2 sur la Figure 26), tiré de la carte géologique du Val-de-Ruz [47]	47
28	Circulation souterraine dans la région des Prés Royer (adapté à partir de la thèse de Bernard Mathey [24])	49
29	Position des captages des Prés Royer [52]	50

30	Fluctuations des nappes libre et captive aux Prés Royer entre le 18 juin et le 12 juillet 2019 (hauteurs relatives, référence inconnue)	51
31	Position des forages à Villiers-Dombresson Fond de plan : Service WMS swisstopo	52
32	Position des piézomètres installés et des profils géophysiques réalisés dans le cadre de l'étude	54
33	Curve Number	57
34	Ruissellement du 21 juin 2019	57
35	Extrait des résultats obtenus (Villiers nord) avec les paramètres suivants : zone tampon de 6 m, sinistres du 21.06.19 seulement, $h > 0.10 m$ à gauche et $h > 0.25 m$ à droite. Fond de plan : Service WMS swisstopo	60
36	Fluctuations des nappes libre et captive aux Prés Royer entre fin 2018 et fin 2020	62
37	Précipitations à la station Chaumont entre décembre 2017 et novembre 2020	63
38	Débits de la source de la Serrière entre janvier 2019 et juillet 2020 (Les hauteurs d'eau mesurées ont été converties par Léa Perrochet (CHYN) en débits, en utilisant la courbe de tarage établie sur la base de plusieurs mesures manuelles au moulinet)	64
39	Niveaux piézométriques, température et précipitations à Dombresson (lame d'eau) NB : les précipitations de décembre sont tombées sous forme neigeuse	66
40	Niveaux piézométriques et paramètres physico-chimiques de PD3 et Piézo Seyon	67
41	Interprétation géologique de la tomographie de résistivité électrique du profil 1	68
42	Interprétation géologique de la tomographie de résistivité électrique du profil 2	68
43	Coupe transversale NS au lieu dit "verger", montrant l'Allée des Peupliers, qui le borde à l'est et le Passage des Condémines, qui le borde à l'ouest	69
44	Niveau présumé de la nappe lors de l'évènement du 21 juin 2019 et/ou jours suivants. Fond de plan : Swissimage2017 © Swisstopo	70
45	Surfaces de calcul	71
46	Débits de pointe (points rouges) estimés par Scherrer dans le périmètre d'étude [27]	74

Liste des tables

1	Probabilité d'un évènement en fonction de son temps de retour	2
2	Danger INO : Intensité en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement [3]	2
3	Débits retenus [m^3/s] pour la cartographie des dangers d'inondations	15
4	Sources des données du projet	21
5	Classes de profondeur d'eau [m] de la carte de l'aléa ruissellement	22
6	Contribution des phénomènes aux dommages du 21 juin 2019	28
7	Répartition des sinistres attribués au ruissellement entre les bassins versants délimités dans la section 3.3.1	31
8	Catégories de couverture du sol dans la couche SIG et reclassification réalisée pour l'estimation du ruissellement	34
9	Classes de conductivité hydraulique saturée (K en [$cm/jour$]) des quatre groupes hydrologiques de sols en fonction de la profondeur d'une couche imperméable [42]	36
10	Catégories de perméabilités et types de sols correspondant dans la couche SIG et reclassification réalisée, c'est à dire attribution d'un groupe hydrologique HSG, pour l'estimation du ruissellement	36
11	Matrice d'attribution des CN en fonction de la couverture du sol et du groupe hydrologique de sol	37
12	Antecedent Moisture Condition en fonction des 5 derniers jours et de la saison [39]	37
13	Conditions antérieures aux stations de Chaumont, Dombresson, Petite Combe	37
14	Comparaison des paramètres des pluies mesurées aux stations avec le scénario de modélisation	39
15	Table de contingence	42
16	Critères de performance (issu de [45] et complété)	42
17	Résultats de la méthode SCS-CN dans les sous-bassins du périmètre d'étude	57
18	Répartition des sinistres du 21 juin 2019 entre sous-bassins versants et hauteurs représentées au moyen de couleurs sur la carte d'aléa	60
19	Critères de performance évaluant le pouvoir prédictif de la carte de l'aléa ruissellement dans l'identification des zones présentant un risque avéré en utilisant diverses combinaisons	61
20	Débits du Seyon obtenus à partir des jaugeages au sel	65
21	Surfaces couvertes par l'étude Scherrer et l'étude ci-présente	74

1 Introduction

1.1 Cartographie des dangers naturels en Suisse

1.1.1 Cadre légal, contenu et implications

Les thématiques de dangers naturels et de cartes de dangers sont abordées dans trois domaines du droit suisse que sont l'aménagement du territoire, le droit forestier et le droit des eaux [1]. L'art 6 de la loi sur l'aménagement du territoire (LAT) stipule qu' *"en vue d'établir leurs plans directeurs, les cantons élaborent des études de base dans lesquelles ils désignent les parties du territoire qui sont gravement menacées par des forces naturelles ou par des nuisances"*.

Les buts des lois sur la forêt et sur l'aménagement des cours d'eau sont respectivement de :

- *"protéger des personnes et des biens matériels importants contre l'action dommageable des eaux, en particulier celle qui est causée par les inondations, les érosions et les alluvionnements (protection contre les crues)"* (LACE, art.1, al.1)
- *"contribuer à protéger la population et les biens d'une valeur notable contre les avalanches, les glissements de terrain, l'érosion et les chutes de pierres (catastrophes naturelles)"* (LFo, art.1, al.2)

Les articles 15 de l'ordonnance sur les forêts (OFo) et 27 de l'ordonnance sur l'aménagement des cours d'eau (OACE) désignent les cantons comme responsables de l'établissement des cartes de dangers. L'office doit quant à lui édicter des directives sur l'établissement des cadastres et des cartes de dangers (OACE, art.20). Les cantons doivent tenir compte de ces directives techniques et travaux réalisés par la Confédération (OFo art.15 et OACE art.27).

Dans le document "Cadre juridique des cartes de dangers" publié par la Plateforme Nationale des Dangers Naturels [1], la carte de danger est définie comme :

"une cartographie établie sur la base de critères rigoureusement objectifs et scientifiques comportant les indications suivantes pour l'ensemble du territoire, dans un périmètre d'investigation clairement délimité : menace ou absence de menace pour chaque portion du territoire, types de dangers, intensité et probabilité des risques."

Sur les cartes de danger sont délimitées les zones concernées par un danger certain et caractérisées au moyen de la matrice en Figure 1. Cette matrice permet d'attribuer un degré de danger (rouge = élevé, bleu = moyen, jaune = faible, hachuré = résiduel) en fonction de la probabilité et de l'intensité d'un événement. La probabilité est définie selon les critères de la Table 1. En plus de désigner des événements d'un temps de retour de "très faible", la trame hachurée jaune/blanc peut également indiquer les secteurs sécurisés par des mesures de protection. Des critères différents sont utilisés pour déterminer l'intensité du danger selon le phénomène étudié (ex : inondation par les crues (INO), chute de pierres et blocs (CPB), laves torrentielles (LTO), avalanche (AVA),...).

Les cartes de danger sont des outils de l'aménagement du territoire. La signification des zones de danger et leurs implications pour l'aménagement du territoire peuvent être consulté dans l'annexe 1.

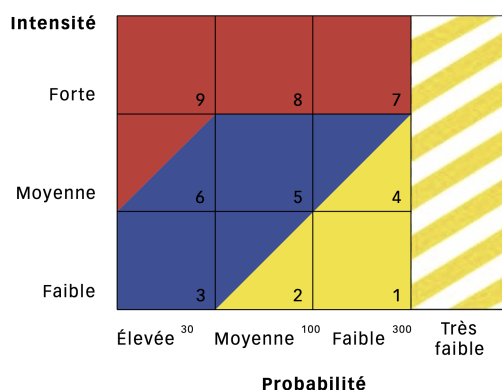


FIGURE 1 – Diagramme intensité-probabilité pour l'attribution des degrés de danger [2]

Probabilité	Temps de retour en années
Élevée	$T < 30$
Moyenne	$30 < T < 100$
Faible	$100 < T < 300$
Très faible	$T > 300$

TABLE 1 – Probabilité d'un évènement en fonction de son temps de retour

1.1.2 Dangers d'inondation (crue, ruissellement, remontée de nappe)

Le danger engendré par les crues des cours d'eau doit être représenté sur la carte de danger d'inondation. Les critères utilisés pour déterminer l'intensité du danger sont les suivants (Table 2) :

Intensité	Hauteur d'eau [m]		Hauteur d'eau \times Vitesse d'écoulement [m^2/s]
Forte	$h > 2$	ou	$v \times h > 2$
Moyenne	$2 > h > 0,5$	ou	$2 > v \times h > 0,5$
Faible	$h < 0,5$	ou	$v \times h < 0,5$

TABLE 2 – Danger INO : Intensité en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement [3]

Le ruissellement ne fait pas partie des phénomènes soumis à la cartographie des dangers. Depuis juillet 2018, il existe cependant une carte de l'aléa ruissellement à l'échelle nationale. Le terme "aléa" peut être défini comme la "*manifestation d'un phénomène ou processus naturel d'occurrence et d'intensité définies*" [4]. Lors de sa parution, cette carte est décrite comme "*un précieux outil supplémentaire ... pour combler les lacunes en matière de protection contre les inondations*" [5]. Il est expliqué que "*les crues ne sont pas toujours les seules responsables d'inondations ... l'eau de pluie qui ne peut pas s'infiltrer dans les sols et qui, partant, s'écoule sur les surfaces ouvertes peut, elle aussi, en causer. Le ruissellement provoque jusqu'à la moitié des dommages occasionnés par les inondations*" [5]. La section 2.2 traite en détail du contenu représenté par la carte.

Le phénomène de remontée de nappe n'est pas non plus soumis à la cartographie de danger. Dans un rapport du Conseil Fédéral intitulé "Gestion des dangers naturels en Suisse" [6] qui décrivait, en 2016, l'état de la gestion des dangers naturels et identifiait les domaines dans lesquels il y avait lieu d'agir pour mettre en oeuvre une gestion intégrée des risques, on peut lire que "*des processus guère considérés*

jusqu'ici dans les documents de base sur les dangers causent également d'importants dommages (p. ex. ruissellement superficiel, remontée de nappe phréatique ou tsunami lacustre)".

1.2 Ruissellement

Cette section donne les bases nécessaires à la compréhension générale du phénomène étudié et de l'analyse qui en est faite par la suite.

1.2.1 Phénomène

Le guide pratique destiné à évaluer les crues dans les bassins versants de Suisse [7] et le livre "Watershed Hydrology, Management and Modeling" [8] font état des processus d'écoulement connus suivants :

- *les écoulements de surface (Hortonian overland flow)* sont générés lorsque l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'infiltration¹ du sol (Figure 2 à gauche) ;
- *les écoulements superficiels par saturation (saturation overland flow)* sont générés lorsque le sol est saturé (Figure 2 au centre) ;
- *les écoulements de subsurface (subsurface runoff / interflow)* représentent la partie des précipitations infiltrées qui se déplace latéralement à travers les couches supérieures du sol (sous la surface du sol mais au-dessus de la nappe phréatique) (Figure 2 à droite) ;
- *les infiltrations en profondeur (deep percolation / baseflow)* font référence à l'eau qui percole sous la zone racinaire et contribue à la recharge des eaux souterraines. Le cours d'eau peut être alimenté par cette partie même pendant les périodes sans précipitations.

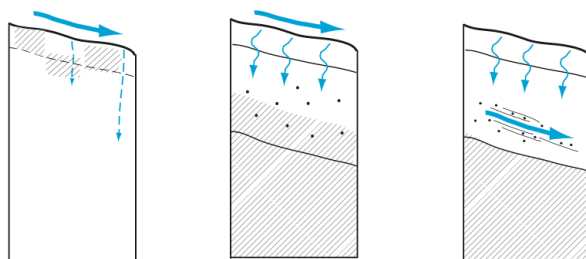


FIGURE 2 – Processus d'écoulement et réaction lors de fortes pluies [7].

Gauche : Hortonian overland flow - Centre : saturation overland flow - Droite : subsurface runoff

Le ruissellement au sens large désigne donc les trois premiers types d'écoulement. Le ruissellement de surface (surface runoff), quant à lui, est seulement constitué des deux premiers types d'écoulement [8]. Dans le présent travail, le phénomène étudié est le ruissellement de surface. L'utilisation du terme "ruissellement" seul se rapporte toujours au ruissellement de surface défini ci-avant.

Facteurs qui influencent le ruissellement

Les facteurs qui influencent l'apparition du ruissellement sont physiographiques (taille, forme et pente du bassin versant, utilisation du sol, type de sol, humidité du sol, densité de drainage,...) et climatiques (type, intensité, durée et distribution des précipitations, direction prédominante du vent,...) [8].

1. capacité d'infiltration : flux d'eau maximal que le sol est capable d'absorber à travers sa surface [9]

Le ruissellement de surface est constitué des précipitations auxquelles sont retranchées les diverses pertes subies : interception, stockage dans les dépressions, infiltration dans les couches superficielles du sol ou infiltration en profondeur, évapotranspiration [9]. *"L'estimation de l'importance du processus d'infiltration permet de déterminer quelle fraction de la pluie va participer à l'écoulement de surface, et quelle fraction va alimenter les écoulements souterrains"*[9].

Sur les sols non saturés, les caractéristiques qui agissent sur l'infiltration sont la couverture végétale, la macroporosité (galeries de vers de terre, racines, fissuration et voies d'eau structurelles), l'hydrophobicité, le soubassement rocheux, la compacité, la perméabilité et l'épaisseur du sol. [7]

Les facteurs les plus impactant sont, pour une même topographie [9] :

- *le type de sol (structure, texture, porosité)* : les caractéristiques de la matrice du sol influencent les forces de capillarité et d'adsorption dont résultent les forces de succion, qui elles-mêmes, régissent en partie l'infiltration ;
- *la couverture du sol* : la végétation influence positivement l'infiltration en 1) ralentissant l'écoulement de l'eau à la surface, lui donnant ainsi plus de temps pour pénétrer dans le sol, 2) améliorant la perméabilité du sol par son système racinaire, 3) protégeant le sol de l'impact de la pluie par son feuillage et diminuant ainsi le phénomène de battance ;
- *la teneur en eau initiale du sol (conditions antécédentes d'humidité)* : l'humidité du sol est un facteur essentiel du régime d'infiltration, car les forces de succion sont aussi fonction du taux d'humidité du sol. Le régime d'infiltration au cours du temps évolue différemment selon que le sol est initialement sec ou humide.

Finalement, le ruissellement de surface se produit sous deux formes différentes [10] :

- *forme concentrée* : sous forme d'un écoulement localisé, le long d'une petite dépression du terrain ou dans un fond de vallée (vallon) ;
- *forme diffuse* : sous forme d'une fine lame d'eau, sur un terrain sans relief, sans organisation bien définie des filets d'eau.

Les processus d'écoulements à l'origine des crues

Les processus de formation des écoulements ont une importance capitale sur la genèse des crues. *"La nature du terrain naturel ... a une grande influence sur le débit des crues. La part de précipitation se transformant en écoulement dépend de la capacité de rétention des sols. Cette capacité leur permet de stocker des quantités d'eau plus ou moins grandes et de les restituer aux cours d'eau avec plus ou moins de retard"*[7]. Outre la nature des terrains, le temps de propagation des écoulements dans le bassin versant et dans les chenaux joue un rôle sur les débits de pointes. *"La nature du sol est la caractéristique déterminante pour la formation des crues. La végétation, la densité du réseau hydrographique, la géomorphologie, la géologie et la répartition des pluies dans l'espace et le temps jouent aussi un rôle non négligeable."*[7]

1.2.2 Dommages associés

Les établissements cantonaux d'assurance ont publié une recommandation visant à protéger les objets contre les dangers naturels météorologiques [11]. Le chapitre 4 est consacré à la pluie. On peut y lire :

"La pluie génère rapidement des écoulements incontrôlés d'eaux superficielles qui provoquent des inondations endommageant les matériaux des sols et des parois à l'intérieur et autour des bâtiments. Les toits plats et les balcons peuvent être le siège d'accumulations momentanées d'eau stagnante. Des places sont inondées temporairement par des eaux superficielles s'écoulant de terrains avoisinants et par l'excédent d'eau provenant de toits plats. Lorsque la pluie intense est accompagnée d'une tempête, les feuilles et les branches cassées provoquent un engorgement des orifices collecteurs des dispositifs d'évacuation des eaux"

Cette recommandation indique les dommages qui peuvent survenir et les mesures applicables pour protéger les objets. Elle fait état de cinq situations de danger engendrées par la pluie. La Figure 3 schématise quatre d'entre elles ; la cinquième n'est pas représentée car elle se rapporte aux cas où *"la pluie est accompagnée d'une tempête, si bien que de l'eau chassée par le vent peut pénétrer dans le bâtiment au travers des façades"* et n'est dès lors pas en lien avec les écoulements de surfaces.

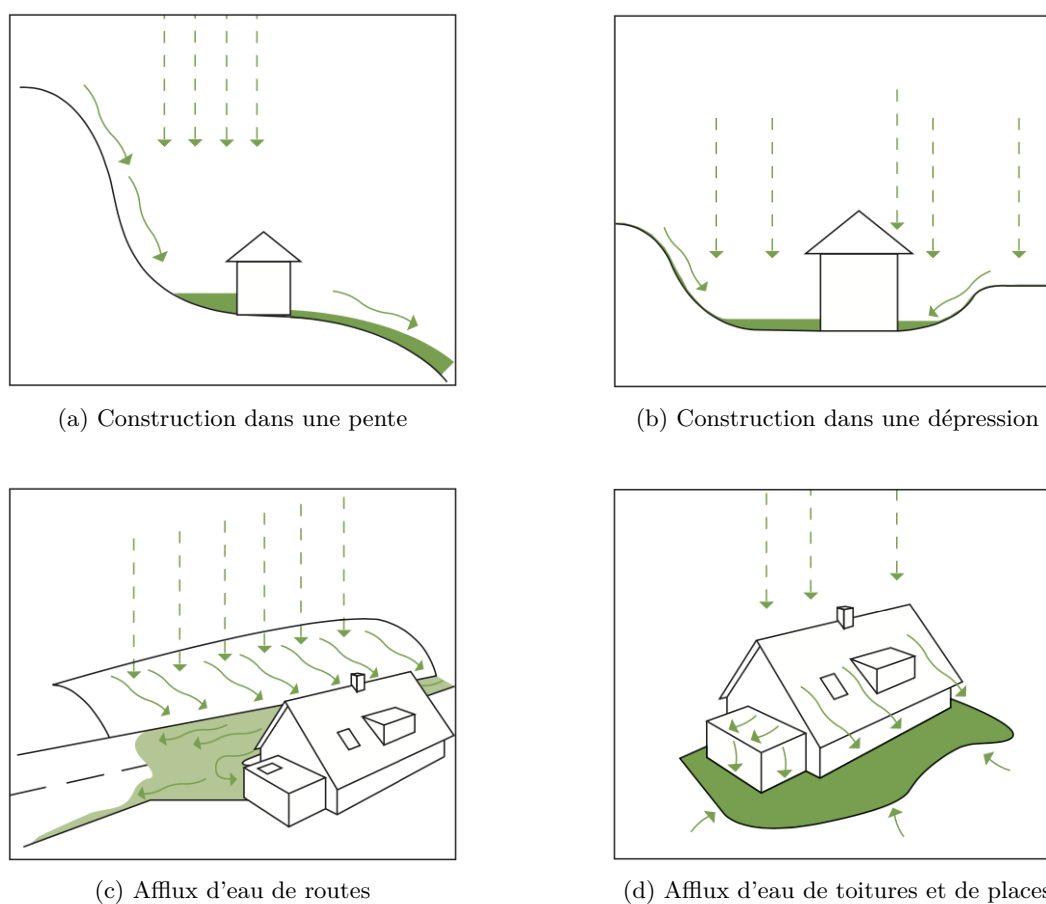


FIGURE 3 – Situations de danger causées par la pluie [11]

Sur la Figure 4 sont indiqués les divers points de passage de l'eau dans un bâtiment [11]. Les numéros 4 à 6 concernent les eaux superficielles.

4. les eaux superficielles s'écoulent par les soupiraux et les fenêtres de la cave ;
5. les eaux superficielles percolent à travers les parois extérieures ;
6. les eaux superficielles pénètrent par les ouvertures des portes et des fenêtres.

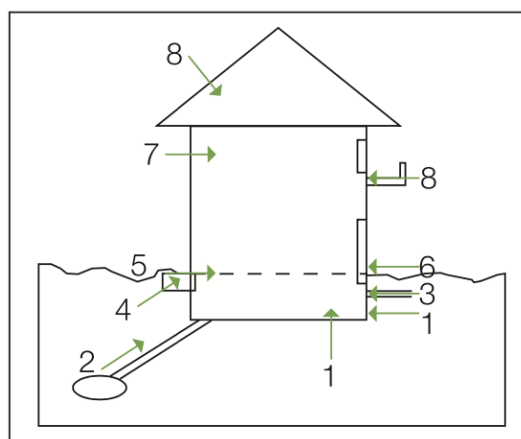


FIGURE 4 – Schéma des divers cheminements de pénétration d'eau dans un bâtiment [11]

1.2.3 Mesures de lutte

Comme dans le domaine des concepts de protection contre les crues des cours d'eau, le ruissellement doit être géré à l'échelle du bassin versant, en intégrant les effets à l'aval et à l'amont d'un aménagement réalisé sur le chemin de l'eau (continuité hydraulique depuis l'amont jusqu'à l'exutoire, cours d'eau ou collecteur). Une gestion efficace du ruissellement comporte deux étapes [10] :

1. délimitation des bassins versants et caractérisation en termes de ruissellement diffus et concentré ;
2. réalisation d'aménagements de protection à proximité du site touché et/ou mise en place de mesures de prévention sur l'ensemble du bassin versant.

Les actions de gestion, de protection et de prévention portent sur trois axes de travail simultanés [10] :

- *limiter le ruissellement* : diminuer les volumes d'eau ruisselés et protéger le sol des effets de battance ;
- *réduire la vitesse des écoulements* : ralentir les eaux de ruissellement et diminuer l'intensité des flux en aval (avec un effet certain sur le pic de crue et le dépôt de sédiments) ;
- *conduire et stocker* : guider les flux jusqu'à l'exutoire, favoriser l'immersion temporaire, amortir les variations de débits.

La nomenclature des familles de mesures et la classification des mesures au sein des catégories diffèrent selon les sources consultées. La classification présentée ci-après se veut aussi logique et exhaustive que possible. Elle constitue un mélange entre les classifications proposées dans divers documents publiés par la cellule GISER (Gestion Intégrée Sol – Erosion – Ruissellement des services publics de Wallonie, en Belgique)[10], le CEPRI (Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation)[12] et le TOPPS (Train Operators to Promote Practices and Sustainability)[13]. Les mesures de lutte contre la pluie proposées par les Établissements cantonaux d'assurance[11] ont été ajoutées en complément.

Les phénomènes de ruissellement, d'érosion et de coulées de boue sont liés. Dans ce contexte, il vaut la peine de mentionner que la Confédération a publié un cahier de fiches techniques permettant de réduire les risques de l'érosion hydrique des sols agricoles [14]. Ces fiches techniques présentent des moyens d'action sur les facteurs de l'érosion. Les mesures proposées sont culturales, végétales et de génie civile.

On peut distinguer deux variétés de mesures ; la première n'agit pas sur le phénomène de ruissellement mais sur la réduction des risques sur les infrastructures à l'échelle de la parcelle. On les appelle "mesures objets". La seconde, qui inclut toutes les autres mesures permettant d'influencer directement la genèse du ruissellement et sa propagation dans le temps et dans l'espace.

Mesures objets

Le chapitre, dédié à la pluie, de la recommandation pour la protection des objets contre les dangers naturels météorologiques [11], fait état des catégories de mesures ci-après :

- *conception du bâtiment et de ses abords* : emplacement du bâtiment, aménagement du terrain, hauteur du rez-de-chaussée, hauteur des ouvertures, dispositif antireflux dans les canalisations ;
- *étanchéité* : enveloppe du bâtiment, ouvertures
- *évacuation des eaux* : rigoles et chambres collectrices, drains, rétention / infiltration, cuvette en plein air ;
- *écran* : position surélevée, digue / rampe / bordure / mur ;

Sur la Figure 5 sont schématisées les mesures qui empêchent les écoulements superficiels d'atteindre les bâtiments à protéger.

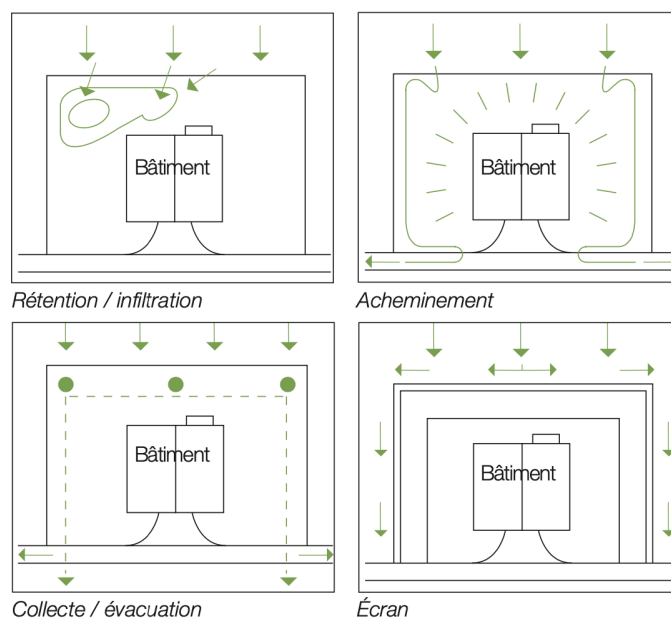


FIGURE 5 – Mesures de gestion de l'afflux d'eaux superficielles depuis les parcelles voisines [11]

Mesures agronomiques et pédo-agronomiques

En milieu rural, les pratiques agricoles peuvent conditionner de façon non négligeable la genèse du ruissellement. *"Les pratiques favorables à la diminution de l'aléa ruissellement portent sur 3 domaines : l'organisation du parcellaire, la couverture du sol et la qualité du sol"* [10]. La bonne pratique consiste à *"gérer les terres agricoles de manière à maintenir une couverture végétale la plus permanente possible, à préserver la structure du sol pour conserver sa capacité d'infiltration et à donner au sol un certain*

micro-relief lui permettant de stocker de l'eau en surface". La même logique doit être appliquée aux espaces boisés et aux espaces verts" [10].

Il s'agit à la fois de la gestion du sol et des pratiques culturales. Par exemple, certaines techniques de travail de la terre (granulométrie, profondeur d'attaque et sens de passage) limitent le phénomène de battance, la vitesse et la concentration du ruissellement. Les techniques et la temporalité des semis jouent aussi un rôle [12].

Mesures d'hydraulique douce

Les aménagements d'hydraulique douce sont des zones tampons composées de nombreuses techniques végétales. Ces zones ont l'avantage de donner la possibilité aux eaux de ruissellement de surface de s'infiltrer, de freiner les eaux de ruissellement de surface et de capturer les sédiments. Il s'agit de mesures de rétention et dispersion. Ce type de mesures consiste par exemple en la réalisation de [10] :

- *bandes enherbées* : zone plus ou moins large (en pratique de 6 à 20 mètres), semée avec un mélange à base d'herbes, installée en bordure (ou au milieu) d'un champ. L'efficacité est la meilleure sur les zones amont ou en milieu de pente, là où le ruissellement n'est pas encore concentré ou à fort débit. Leur fonction est de faire barrière au ruissellement en nappe (ruissellement **diffus**).
- *barrages filtrants* : barrières épaisses faites de matériel végétal (branchages, copeaux, paille) maintenues solidement par des piquets avec ou sans grillage, disposés perpendiculairement au ruissellement. Par la densité et la résistance de la végétation, ils créent une zone de sédimentation. Leur fonction est de ralentir le ruissellement **concentré**.

Plus généralement, l'eau peut être ralentie au moyen d'aménagements tels que des haies, des systèmes fossés-talus et des aménagements végétaux légers [10]. Ces éléments linéaires forment un maillage de résistance hydraulique sur le bassin versant. En plus d'agir sur le ruissellement à proprement parler, la limitation des vitesses d'écoulement permet la réduction de l'érosion des sols et l'atténuation des impacts qualitatifs (pollution des eaux causée par le lessivage des sols) et quantitatifs (pic de débit différé ou étalé) sur les milieux récepteurs. [12]

Finalement, l'utilisation des coins de champ humides, thalwegs, fossés, talus, voiries peut servir à créer des zones de stockage et d'acheminement du ruissellement en excès jusqu'à l'exutoire.

1.3 Remontée de nappe

1.3.1 Phénomène

La Figure 6 et les définitions qui la succèdent [15] permettent d'introduire quelques notions de bases d'hydrogéologie.

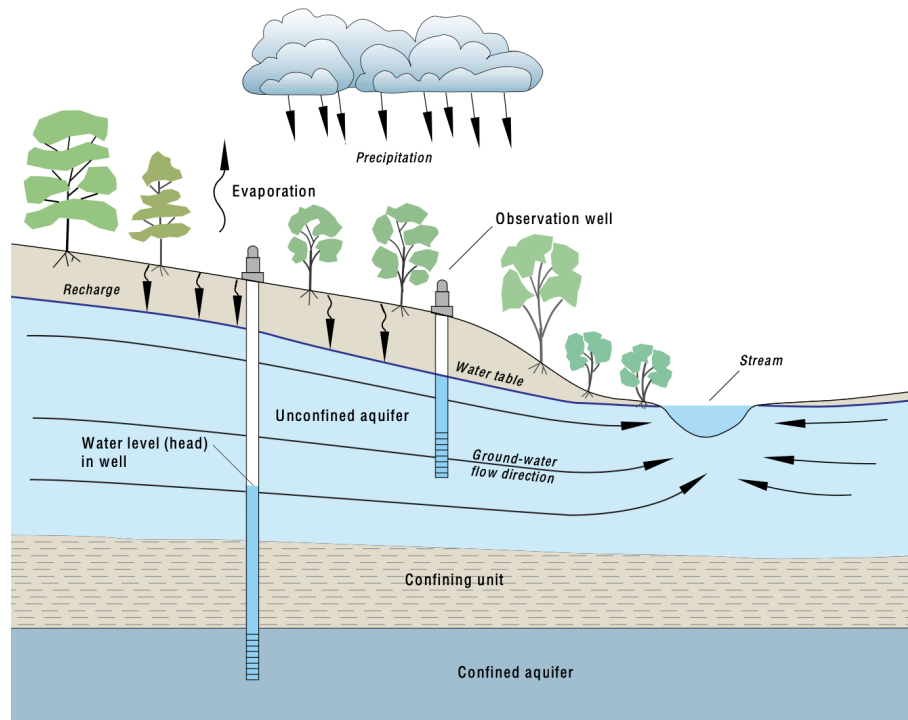


FIGURE 6 – Schéma en coupe d'un système typique d'écoulement d'eau souterraine [16]

Aquifère - masse rocheuse qui contient des vides (tels que des pores, des fissures ou des joints) et est donc capable de conduire les eaux souterraines. L'eau peut être pompée à des débits économiquement intéressants.

Aquitard - formation ou ensemble de formations géologiques capable de stocker de l'eau souterraine mais pas de la transmettre rapidement à des débits économiquement intéressants. L'écoulement est essentiellement vertical si des couches aquifères se situent en dessous et/ou au-dessus.

Zone saturée - partie du sous-sol où tous les vides sont remplis d'eau.

Zone non saturée - zone située entre la surface du sol et le niveau des eaux souterraines (zone saturée).

Charge hydraulique H [m] - indicateur de l'énergie totale disponible pour déplacer l'eau souterraine à travers un aquifère ou hauteur de la colonne d'eau au-dessus d'une élévation de référence telle que le niveau moyen de la mer. $H = h + z$, h : potentiel de pression [m], z : potentiel d'altitude [m]

Gradient hydraulique i [-] - changement de charge hydraulique sur une distance spécifiée dans une direction donnée. $i = \Delta H / \Delta L$, H : charge hydraulique [m], L : distance [m]

Niveau piézométrique - altitude à laquelle le potentiel de pression h est nul ($h = 0$).

Niveau phréatique - altitude de l'interface entre la zone saturée et la zone non-saturée dans un aquifère non confiné.

Nappe d'eau souterraine - corps d'eau contenu dans un aquifère.

Nappe phréatique ou libre - la surface de l'eau libre et la surface potentiométrique correspondent (niveau piézométrique = toit de l'aquifère).

Nappe captive - l'eau de l'aquifère est "confinée" sous pression par un corps géologique beaucoup moins perméable que l'aquifère lui-même (niveau piézométrique > toit de l'aquifère).

Nappe artésienne - cas particulier d'une nappe captive où le niveau piézométrique se trouve au dessus de la surface topographique (niveau piézométrique > surface topographique).

Nappe alluviale - nappe contenue dans des roches meubles, de nature pétrographique variée et à granulométrie grossière, essentiellement composée de sables, graviers et galets, transportés et déposés par les cours d'eau.

Sur la Figure 6, est représenté un aquifère confiné par une unité géologique peu perméable. Au dessus, un second aquifère non-confiné contient une nappe libre. Cette nappe peut également être qualifiée de "phréatique". Deux puits d'observation indiquent le niveau piézométrique ou la charge hydraulique des nappes. Sur cette représentation, la direction d'écoulement des eaux souterraines montre que la nappe libre est drainée par le cours d'eau. On peut distinguer trois autres situations que sont : 1) cours d'eau alimentant la nappe, 2) cours d'eau et nappe à l'équilibre, et finalement 3) cours d'eau et nappe indépendants. L'absence d'échanges se produit quand les berges et le fond du lit sont imperméables (ex : colmatées) [17].

Facteurs qui contrôlent le niveau des nappes

Le niveau des eaux souterraines dépend de l'équilibre entre la recharge, le stockage et le débit sortant d'un aquifère [16]. Cet équilibre est fonction des propriétés physiques de l'aquifère telles que la porosité, la perméabilité (conductivité hydraulique) et l'épaisseur des roches ou des sédiments qui le composent. Il dépend aussi de facteurs climatiques et hydrologiques, comme le moment et la quantité de recharge fournie par les précipitations, les échanges entre la nappe et les eaux de surface ou encore l'évapotranspiration. [16]

De plus, le niveau d'eau des nappes dépend des relations que les formations aquifères peuvent entretenir les unes avec les autres. On peut citer ici deux autres types d'échanges potentiels [17] :

- les échanges avec les terrains encaissants (phénomènes de transfert et de surverse) ;
- les apports via le substratum (phénomène de drainance).

La double fonction d'accumulateur et de conducteur hydraulique des nappes souterraines assure leur pérennité et la régularité des écoulements à leurs émergences. L'alimentation des nappes est, quant à elle, en général irrégulière et discontinue. En particulier celle des nappes libres, qui sont majoritairement alimentées par l'infiltration des pluies. [18]

Dans le cas particulier des aquifères alluviaux, les événements climatiques épisodiques ont une influence sur la recharge totale, souvent dominée par les afflux liés aux inondations. Les crues sont à l'origine d'une recharge importante de l'aquifère pour plusieurs raisons [19] :

- la perméabilité du lit du cours d'eau augmente en raison de l'affouillement de la couche de colmatage par des écoulements à grande vitesse ;
- le cours d'eau couvre une surface plus large faisant ainsi augmenter la surface de contact entre les eaux de surface et les eaux souterraines à travers laquelle les interactions peuvent avoir lieu ;
- la différence entre la charge hydraulique de la nappe et celle du cours d'eau augmente.

Risques d'inondation par remontée de nappe

On comprend que le niveau des nappes s'élève lorsque la vitesse de la recharge de l'aquifère est supérieure à la vitesse de sa décharge. Dans ces conditions, le toit de la nappe peut se rapprocher de la surface topographique, voire la dépasser, et une inondation par remontée de nappe peut se produire.

Peu de documentation officielle sur les risques de remontée de nappe en Suisse a été trouvée. À titre d'exemple, sur le site du canton du Valais, une page est consacrée à l'étude du comportement de la nappe phréatique à Viège [20]. En revanche, en France, ce risque est davantage décrit. Sur le site d'information dédié à l'évaluation des risques tenu par le Ministère de la Transition écologique français, une page entière est dédiée aux inondations par remontée de nappe [21]. On peut y lire que les nappes capables de causer des inondations sont les "*nappes phréatiques dites "libres" (qui ne sont pas séparées du sol par une couche de terrain imperméable) et dont la zone non saturée (couche de terrains contenant à la fois de l'eau et de l'air) est mince*". Selon cette même source [21], plusieurs paramètres contrôlent le déclenchement et la durée des inondations par remontée de nappe :

- une suite d'années à pluviométrie excédentaire, entraînant des niveaux d'étiages de plus en plus élevés ;
- une amplitude importante de battement annuel de la nappe, dépendant étroitement du pourcentage d'interstices de l'aquifère ;
- un volume global important d'eau contenue dans la nappe, à l'intérieur des limites du bassin versant d'un cours d'eau (le volume contributif de la nappe à l'échelle du bassin versant hydrogéologique).

1.3.2 Dommages associés

Dans un rapport traitant de la remontée des nappes d'eau souterraine en site urbain [18], la classification des conséquences de remontées de nappe sur les ouvrages et l'environnement suivante a été suggérée :

- *arrivées d'eau et inondations (effet "hydraulique")* : sous-sols de bâtiments, vallons secs ou dépressions topographiques, zones de travaux, canalisations, tunnels, galeries ;
- *déformations et ruptures (effet "mécanique")* : sur les ouvrages : fissurations, déformations ou ruptures de parois enterrées, dallages, radiers, fondations superficielles ou profondes (conception et dimensionnement insuffisants pour résister à l'accroissement des poussées et sous-pressions, aux tassements différentiels, aux variations de sollicitations entre l'amont et l'aval hydraulique), dégradations de chaussées, chemins de fer, soulèvements de conduites, de cuves ; sur les terrains : tassements, gonflements, mouvements de terrains, liquéfaction des sols fins, effet renard (érosion interne) ;
- *désordres à caractère physico-chimique* : réactions des matériaux des structures avec les eaux souterraines ;

- *désordres à caractère "bio-physico-chimique"* : corrosion, émanations de biogazs ;
- *dommages de type "pollution des eaux"* : lessivages, migrations de polluants ;
- *autres types de dommages* : gênes d'exploitation, pertes de jouissance, dangers,...

Les cheminements possibles d'infiltration de l'eau souterraine dans les bâtiments (Figure 4, numéros 1 à 4), sont [11] :

1. la nappe traverse les parois ou le sol de la cave ;
2. l'eau reflue dans le bâtiment par les canalisations ;
3. la nappe pénètre par des joints ou des raccordements non étanches (introduction de conduites, câbles noyés dans la maçonnerie) ;
4. la nappe s'écoule par les soupiraux et les fenêtres de la cave.

1.3.3 Mesures de lutte

Sur le site d'information dédié à l'évaluation des risques tenu par le Ministère de la Transition écologique français [21], on lit que *"lorsque les conditions sont réunies pour que le phénomène se produise, celui-ci ne peut être évité. En revanche certaines précautions doivent être prises pour éviter les dégâts les plus importants :*

- *éviter la construction d'habitation dans les vallées sèches, ainsi que dans les dépressions des plateaux calcaires ;*
- *déconseiller la réalisation de sous-sol dans les secteurs sensibles, ou réglementer leur conception (préconiser que le sous-sol soit non étanche, que le circuit électrique soit muni de coupe-circuit sur l'ensemble des phases d'alimentation, y réglementer l'installation des chaudières et des cuves de combustible, y réglementer le stockage des produits chimiques, des phytosanitaires et des produits potentiellement polluants ...);*
- *ne pas prévoir d'aménagements de type collectifs (routes, voies ferrées, trams, édifices publics, etc...) dans ces secteurs ;*
- *mettre en place un système de prévision du phénomène. Dans les zones sensibles à de tels phénomènes, un tel système doit être basé sur l'observation méthodique des niveaux de l'eau des nappes superficielles."*

D'autre part, on peut agir sur l'apparition du phénomène ou sur la protection des ouvrages existants en mettant en place des mesures actives et passives [22] :

Mesures actives - Cette catégorie de mesures a pour but d'abaisser le niveau de la nappe au moyen de drains et galeries avec exhaure par écoulement gravitaire ou au moyen de puits et forages avec exhaure par pompage.

Mesures passives - Cette catégorie de mesures consiste à reprendre les bâtiments en sous-oeuvre pour les munir d'équipements qui empêchent les nuisances et désordres occasionnés par le phénomène. Ils peuvent prendre la forme d'un cuvelage étanche (protège des inondations) et/ou de dispositifs de lestage et ancrage (améliorent la stabilité).

Finalement, il existe deux catégories de mesures préventives [22] : 1) les mesures de prévention indirectes, qui servent à estimer et quantifier l'évolution des remontées de nappe dans le temps et l'espace afin de concevoir et d'adopter des techniques de construction adaptées des infrastructures et 2) les mesures de prévention directes, qui permettent de limiter la remontée de nappe. Cette dernière catégorie agit sur les recharges artificielles accidentelles :

- éviter les ruptures de canalisations, réseaux d'égouts et les adductions d'eau percées en veillant au bon entretien des installations ;
- ne pas mettre à nu des terrains perméables ou décolmater le fond de canaux qui permettraient une recharge supplémentaire de la nappe. A l'inverse, veiller à ce que les tranchées drainantes ne se colmatent pas ;
- dans les zones urbaines, veiller à l'évacuation systématique des eaux pluviales (sinon des zones d'accumulation d'eau de ruissellement peuvent se former et induire des infiltrations ponctuelles).

1.4 Zone d'étude

1.4.1 Situation géographique

La zone d'étude comprend les villages de Villiers et Dombresson qui se trouvent à l'est du Val-de-Ruz, dans le Canton de Neuchâtel.

1.4.2 Danger d'inondation par les crues

Anciens tracés des Seyon et Ruz Chasseran

Les deux cours d'eau susceptibles de causer des inondations dans ce périmètre, en cas de crue, sont le Ruz Chasseran et le Seyon. Le Ruz Chasseran coule en provenance du Pâquier. La source du Seyon se trouve à quelques centaines de mètres au sud-est de Villiers. Le tracé historique des deux cours d'eau apparaît en Figure 7. Actuellement, les deux cours d'eau se rejoignent au centre de Villiers et forment ensemble le Seyon, qui s'écoule dans un lit canalisé en ligne droite.

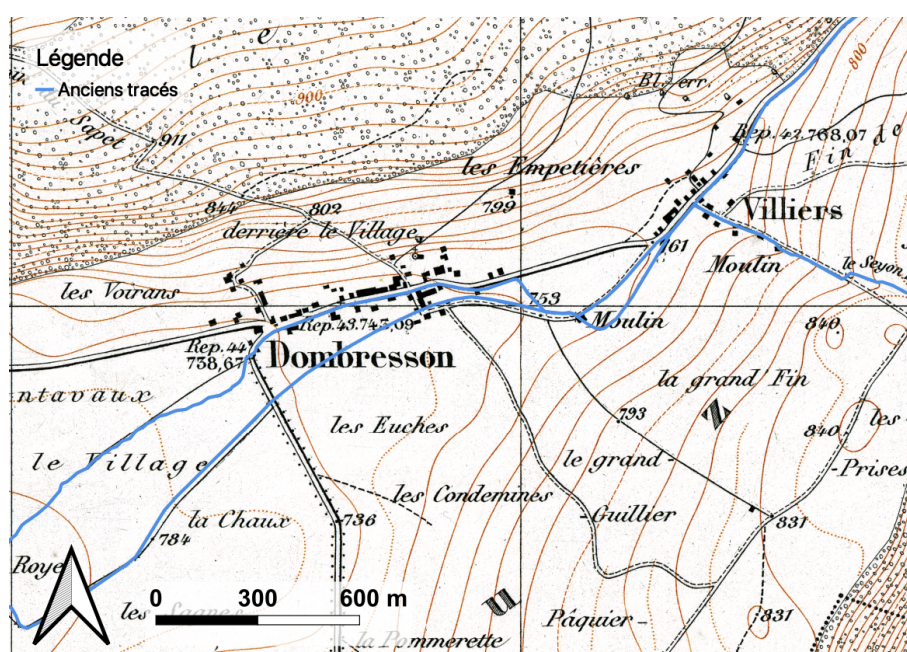


FIGURE 7 – Carte Siegfried première édition (1874)
Fond de plan : Service WMS swisstopo

Carte de dangers et hypothèses sous-jacentes

La cartographie des dangers naturels liés à l'eau dans les secteurs "Val-de-Ruz" et "Entre deux lacs" a été confiée au groupement GEDANA (composés des bureaux ECOgestion Sàrl, Norbert SA, CERA Ingénierie Sàrl et De Cérenville Géotechnique SA) en 2009. La première phase de l'étude a révélé qu'une cartographie détaillée dans les zones urbaines de Villiers et Dombresson était nécessaire. La carte de dangers établie à l'issue de la phase II est représentée en Figure 8. Les informations, présentées ci-après, qui documentent la conception de la carte, proviennent du rapport technique [23] délivré avec la carte de dangers.

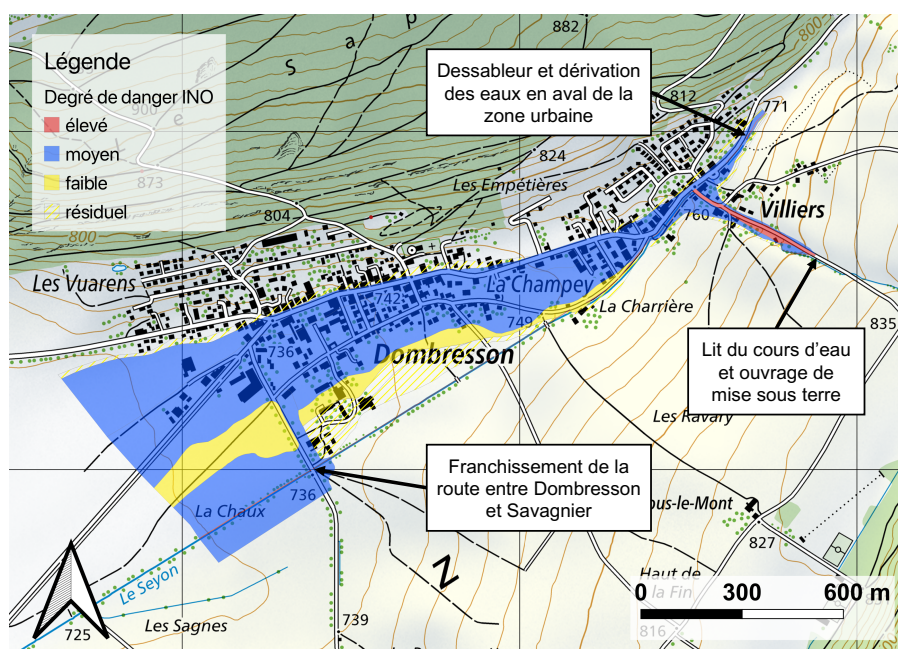


FIGURE 8 – Danger d’inondation dans la zone de Villiers - Dombresson
Fond de plan : Service WMS swisstopo

L'estimation de l'hydrologie a été réalisée grâce à un ajustement régional du modèle GESREAU. Les débits tricennaux, centennaux, tricentennaux et extrêmes retenus sont indiqués dans la Table 3.

	Q_{30}	Q_{100}	Q_{300}	Q_{ext}
Ruz Chasseran aval	13.36	15.72	17.77	28.00
Seyon amont	4.90	5.76	6.51	11.50

TABLE 3 – Débits retenus [m^3/s] pour la cartographie des dangers d'inondations

La capacité des différents tronçons d'écoulement ainsi que la capacité des ouvrages ont été déterminées. Le logiciel Flow Master a été utilisé pour les calculs de capacité des ouvrages. Ceci a permis d'identifier les points faibles suivants (Figure 8) [23] :

- **Ruz Chasseran : le dessableur - la dérivation des eaux en aval de la zone urbaine**
Cet ouvrage, situé à l'arrivée du cours d'eau dans le village de Villiers, a été mis en place en 1998 pour lutter contre les inondations récurrentes. La capacité de $4.4 m^3/s$ du canal principal additionnée à celle de $5.6 m^3/s$ du canal de dérivation permettent de faire transiter jusqu'à $10 m^3/s$ à travers le village de Villiers. Grâce au dessableur, les risques d'obstruction de la dérivation sont faibles et ont dès lors été exclus des scénarios.
- **Seyon : l'ouvrage de mise sous terre et le lit en amont**
Entre la source du Seyon et sa mise sous terre, la capacité du lit du cours d'eau est insuffisante. La capacité de l'ouvrage de mise sous terre est également insuffisante. À l'endroit de la mise sous terre se trouve une grille, au travers de laquelle le passage de l'eau risque d'être entravé par des dépôts de matériaux charriés. Le scénario d'embâcle complet a donc été retenu et la totalité des débits de crue sont débordés pour la modélisation du danger d'inondation.
- **Seyon : franchissement de la route entre Dombresson et Savagnier**
Cet ouvrage a une capacité suffisante pour faire transiter les débits restants dans le lit du Seyon

après débordements des eaux plus en amont. Un embâcle de l'ouvrage par du bois flottant est toutefois possible et représente un danger pour les habitations proches et les surfaces agricoles qui bordent le Seyon.

– Côté : Gouffre de Pertuis

Le gouffre de Pertuis² (Figure 9) désigne un ouvrage de dérivation des eaux du Côté dans l'aquifère de la Serrière [24]. Bien que le risque d'embâcle de cet ouvrage puisse être fortement limité par un entretien régulier, il se peut que le gouffre de Pertuis soit entièrement plein (aquifère de la Serrière saturé) et donc incapable d'accueillir les eaux de surface. Dans ce cas là, l'entier de la crue extrême se déverse dans le talweg d'écoulement du ruisseau du Côté et par la suite dans le Ruz Chasseran. En raison de la difficulté à attribuer une probabilité d'occurrence à ce phénomène, la surface inondée est cartographiée en danger résiduel dans les villages de Villiers et Dombresson.

Des zones de conflits supplémentaires ont été répertoriées en amont de Villiers mais n'ont pas fait l'objet d'une cartographie détaillée car aucun objet à protéger, à l'exception de la route des Fontaines qui borde le Ruz Chasseran, n'était concerné par le danger. On peut citer ici le franchissement de la route des Fontaines entre Le Pâquier et Les Bugnenets et le franchissement du parking des installations du Crêt du Puy. En cas de crue, il a été estimé que, au vu de la topographie, les débits débordés retournent au cours d'eau. Les embâcles à ces endroits ne peuvent être exclus mais les eaux retournent dans ce cas là également au cours d'eau [23].

La carte de dangers est le produit des résultats de simulations de crues effectuées avec le logiciel Flo2D. Un modèle numérique de terrain (maillage 5x5m) et les différents scénarios de débordement (volumes débordés aux points faibles lors des crues de temps de retour 30, 100, 300, extrême) ont servi d'inputs pour les simulations [23].

1.5 Crue du 21 juin 2019 à Villiers-Dombresson

1.5.1 Description factuelle

Dans la nuit du 21 au 22 juin 2019, une inondation d'une rare intensité a touché les villages de Villiers et de Dombresson, causant de très importants dommages. En aval du village Le Pâquier, le cours d'eau "Ruz Chasseran", normalement sec [25], est sorti de son lit et a largement débordé sur la route cantonale [26] (voir Figure 9). A Villiers, la capacité de transit est de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ grâce à un canal de dérivation, mis en place en 1998 pour palier aux inondations historiques de plus ou moins grande ampleur [25]. Le 21 juin, la crue dépassait de loin cette capacité [27]. L'excédent de débit a emprunté la route qui traverse les villages de Villiers et Dombresson, la transformant en véritable torrent. L'eau a emporté de nombreux véhicules sur son passage. Les pertes matérielles ont dépassé les 10 millions de francs. Quatre personnes ont été blessées dans le sinistre [28], dont une a succombé à ses blessures [29].

2. Une description plus complète du gouffre en lien avec les bassins de la Serrière et du Seyon est faite dans la section 3.4.2 consacrée à la géologie et à l'hydrogéologie de la zone d'étude

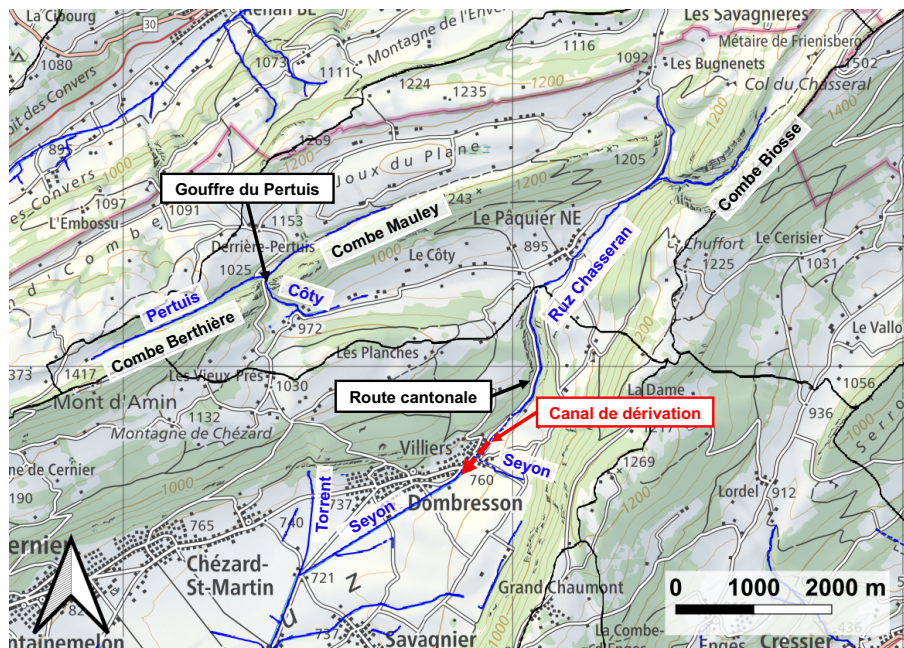


FIGURE 9 – Plan de situation
Fond de plan : Service WMS swisstopo

1.5.2 Réaménagements effectués et compréhension a posteriori

Suite à l'évènement, le bureau BG a été mandaté pour élaborer le concept succinct de protection contre les crues du Ruz Chasseran. Il a assisté le SPCH/OENT (Service des Ponts et Chaussées / Office de l'Entretien) du canton de Neuchâtel dans le projet et la direction des travaux du rétablissement de la route cantonale ainsi que dans le réaménagement du Ruz Chasseran en amont de Villiers. Un rapport a été délivré en décembre 2019 [25]. Les travaux d'urgence, réalisés en fin d'année 2019, ont inclus notamment l'augmentation du gabarit et la stabilisation du lit, l'aménagement de zones de dissipation et une protection de la route pour les débits supérieurs à $10 \text{ m}^3/\text{s}$. D'autres travaux ont été reportés et des mesures complémentaires futures ont été émises. Le bureau BG travaille actuellement à l'élaboration d'un concept de protection contre les crues du Ruz Chasseran en traversée de Villiers et Dombresson et contre le ruissellement au Pâquier.

Une évaluation de la crue et une mise à jour des données hydrologiques du Ruz Chasseran a également été demandée par le SPCH au bureau Scherrer. Un rapport a été délivré en novembre 2019 [27]. Cette étude a entre autres permis :

- de déterminer que les forts débordements du Ruz Chasseran ont été causés par un orage centré sur les Bugnenets, dans les environs immédiats du Pâquier et dans la région à l'est de la forêt de Cheneau. Les quantités d'eau précipitées lors de cet évènement ont été estimées à 73 mm en moyenne sur l'ensemble du bassin versant, avec un maximum de 100-120 mm relevé au Pâquier. Les pluies mesurées au Pâquier auraient un temps de retour de 300 ans alors que les pluies observées à Dombresson n'auraient qu'un temps de retour de 10 ans.
- d'évaluer les débits de pointe du Ruz Chasseran à $9 \text{ m}^3/\text{s}$ au Pâquier, à 10 à $17 \text{ m}^3/\text{s}$ en aval de la forêt de Cheneau, à 13 à $17 \text{ m}^3/\text{s}$ à Villiers et à $20 \text{ m}^3/\text{s}$ à Dombresson (en incluant les apports latéraux). Le temps de retour de la crue a été estimé à 150-300 ans.

1.5.3 Adéquation de la carte de danger avec l'évènement du 21 juin 2019

Les débits reconstitués a posteriori par le bureau Scherrer valent respectivement 13 à 17 m^3/s et 20 m^3/s à Villiers et Dombresson. Ces débits correspondent approximativement au Q_{100} (Seyon + Ruz Chasseran) retenu pour la cartographie des dangers. Cependant, il existe des divergences entre les scénarios modélisés par la carte et l'évènement du 21 juin 2019. Le rapport Scherrer [27], dans lequel on a reconstitué au mieux la crue du 21 juin 2019, par le biais de témoignages et de laisses de crue, reporte les éléments suivants :

- **Ruz Chasseran : le dessableur - la dérivation des eaux en aval de la zone urbaine**
Vraisemblablement l'entrée du canal s'est partiellement obstruée permettant à un débit de 2.5 m^3/s de transiter par l'ouvrage de dérivation (versus 5.6 m^3/s dans le scénario carte INO) ;
- **Seyon : l'ouvrage de mise sous terre et le lit en amont**
On mentionne les eaux de ruissellement en provenance des pentes depuis Chaumont et leur déversement par l'embouchure avec la Venelle des Moulins (rue qui borde le Seyon avant sa rencontre avec le Ruz Chasseran). En revanche, on ne fait pas état de débordement depuis la source du Seyon (versus débordement complet dans le scénario carte INO) ;
- **Seyon : franchissement de la route entre Dombresson et Savagnier**
Aucune obstruction n'est mentionnée ici (versus embâcle dans le scénario carte INO mais sans effet sur les villages de Dombresson et Villiers) ;
- **Côty : Gouffre de Pertuis**
Les eaux de la Combe du Pertuis ont pu être déviées vers le gouffre (versus embâcle dans le scénario carte INO et surface inondée en danger résiduel).

Malgré les dissimilitudes entre les scénarios représentés par la carte de dangers et la crue du 21 juin 2019, la carte donne une bonne idée de l'étendue de l'inondation. Il est effectivement mentionné dans le rapport de la carte de dangers [23], que la topographie en vallon du Val-de-Ruz a pour effet de ne faire que peu varier l'emprise des surfaces inondées en fonction des débits de crue simulés. Ceci a pu être confirmé en consultant les cartes d'intensités. À titre d'exemple, la limite nord de l'inondation est exactement la même avec Q_{100} et Q_{300} . On constate sur la Figure 8 qu'elle est très légèrement décalée avec Q_{ext} .

Dans la section 3.2, au regard de la répartition spatiale des sinistres, on fait l'hypothèse que le débordement du Ruz Chasseran a atteint une surface proche de celle simulée en cas de crue extrême Q_{ext} . Cette hypothèse est basée sur l'observation que tous les bâtiments (à quelques exceptions près), situés dans la zone inondée par le cours d'eau, ont été sujets à des dommages. Les dégâts aux bâtiments causés par le phénomène ruissellement sont, quant à eux, répartis de manière éparse.

1.6 Objectifs du présent travail

En plus du débordement du cours d'eau, les phénomènes de ruissellement et de remontée de nappe ont été constatés dans la région de Villiers-Dombresson lors de l'évènement du 21 juin 2019. La répartition spatiale des sinistres met en évidence le ruissellement alors que les inondations persistantes de sous-sols à Dombresson indiquent une remontée de la nappe. Ces deux phénomènes n'ont pas été étudiés jusqu'à lors.

Ce travail est motivé par le constat que les processus de ruissellement superficiels et de remontée de nappe sont responsables d'importants dommages en Suisse et qu'ils représentent une lacune dans la gestion intégrée des risques causés par les dangers naturels. Il comprend deux volets principaux, que sont :

- évaluer le pouvoir prédictif des cartes existant actuellement dans une perspective d'amélioration de la gestion intégrée des risques. Ces cartes sont i) la carte de l'aléa ruissellement et ii) la carte de danger "remontée de nappe" établie en 2009 par un bureau d'ingénieur selon une méthodologie spécialement conçue pour la zone d'étude (volet académique)
- proposer des mesures d'atténuation dans la zone d'étude (volet pratique)

Une bonne connaissance de la zone d'étude, des phénomènes et une analyse détaillée des phénomènes dans la zone étude (Quel est l'historique des dégâts engendrés par chacun des phénomènes ? Comment se manifestent-ils ? Quelles en sont les causes ?) est indispensable pour compléter ces deux objectifs.

A l'issue du travail, on répondra aux questions de recherches suivantes :

1. Dans quelle mesure les phénomènes de ruissellement et de remontée de nappe ont-ils contribué financièrement à l'évènement du 21 juin 2019 ?
2. Comment quantifier la contribution du phénomène de ruissellement aux abords de Villiers et Dombresson dans le débordement du cours d'eau ?
3. Comment qualifier l'adéquation de la carte d'aléa de ruissellement avec l'évènement du 21 juin 2019 ?
4. Quelles informations les données de terrain récoltées entre novembre et décembre 2020 fournissent-elles quant à la remontée de nappe du 21 juin 2019 ?
5. Quelles mesures pourraient être mises en place pour éviter qu'une situation d'une importance similaire ne se produise à l'avenir ? Quelle méthodologie, permettant d'inclure les remontées de nappe et le ruissellement dans les cartes de danger d'inondations, pourrait être suggérée ?

2 Données du projet

2.1 Sources des données

Données	Source	Format
Carte de danger d'inondation par les crues	SPCH (Neuchâtel)	Shapefile
Carte de danger d'inondation par remontée de nappe	SPCH (Neuchâtel)	PDF
Carte de l'aléa ruissellement	Service WMS swisstopo	Affichage
Simistres du 21 juin 2019	ECAP	Shapefile
Historique des sinistres 1988-2020	ECAP/SITN	Shapefile
Bâtiments, Couverture du sol	SITN	Shapefile
Aptitudes des sols (perméabilité)	Site de la Confédération (OFAG) [30]	Shapefile
Courbes de niveau 1 m 2018-2019	SITN	Shapefile
MNT 2016	SITN	Raster
Bassins versants partiels $2km^2$	Site de la Confédération (OFAG) [30]	Shapefile
Précipitations du 21 juin 2019 aux stations météo (PC notamment)	Scherrer SA, Simon Scherrer	Excel
Bâtiments touchés par la remontée de nappe, hauteurs d'eau dans les sous-sols	SDI-Vdr, Patrick Vuilleumier	Mail, PowerPoint
Historique des interventions "remontée de nappe" (2017-2020)	SDI-VdR, Patrick Vuilleumier	Mail, PowerPoint
Logs de forages dans la zone d'étude	SITN	Shapefile et PDF
Niveaux des nappes aux captages des Prés Royer (fin 2018-fin 2020)	Viteos, Christian Rochat	Série temporelle
Précipitations et températures à la station de Dombresson	Site de la station [31]	Série temporelle
Précipitations à la station de Chaumont	Site de la Confédération (OFEV) [32]	Série temporelle
Débîts de la source de la Serrière	CHYN, Léa Perrochet	Série temporelle
Niveaux absolus des sous-sols touchés par la remontée de nappe	Commune du Val-de-Ruz	Papier (plans)

TABLE 4 – Sources des données du projet

2.2 Contenu de la carte de l'aléa ruissellement

Le rapport technique, joint à la carte d'aléa, documente en détails sa conception [33]. La carte a été réalisée sur l'ensemble du territoire national au moyen du logiciel de modélisation FloodAreaHPC, basé sur les modèles numériques de terrain, la couverture du sol, les précipitations, la géologie et le régime de débits des eaux. On notera ici que, lorsque les MNT disponibles possédaient une résolution supérieure ou inférieure à la résolution de modélisation (1m), ils étaient convertis à une taille de grille de 1 mètre. Le scénario de précipitations utilisé dans la modélisation est un orage avec une période de retour d'environ 100 ans et une durée d'une heure (Figure 10). Le territoire a été subdivisé en 256 régions de modélisation. Pour chaque région, en concertation avec les cantons, une hauteur cumulée de pluie a été déterminée. Le drainage urbain ainsi que les écoulements souterrains n'ont pas été pris en compte dans la modélisation.

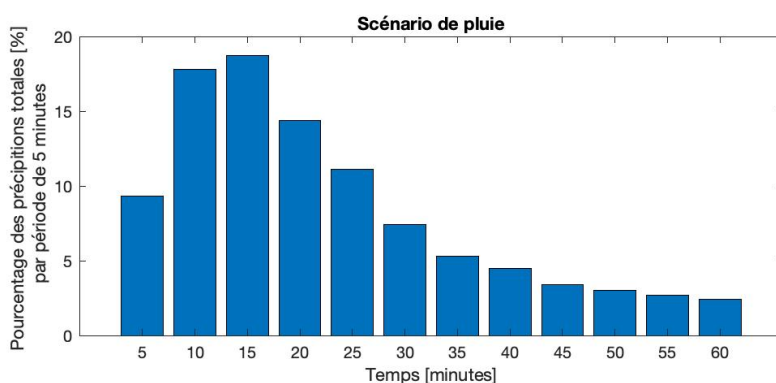


FIGURE 10 – Modèle de pluie de la carte de l'aléa ruissellement [33]

La carte d'aléa indique les voies d'écoulement du ruissellement de surface, les zones touchées et les profondeurs d'eau attendues (classées selon la Table 5) à une échelle de 1 : 12'500. La carte indique la profondeur maximale atteinte au cours de la simulation dans chaque cellule. Le seuil établi pour déterminer si une cellule est affectée ou non par le ruissellement de surface a été fixé à 1,5 cm.

	$(0.015) < h < 0.1$
	$0.1 < h < 0.25$
	$h > 0.25$

TABLE 5 – Classes de profondeur d'eau [m] de la carte de l'aléa ruissellement

La simulation du ruissellement sur le périmètre d'étude est réalisée avec, en données d'entrées, le Modèle Numérique de Terrain de 2010 / résolution de 1 mètre du canton et une pluie horaire de 55 mm.

L'analyse de sensibilité³, décrite dans le rapport technique de la carte d'aléa, a mis en évidence les effets qui suivent :

Intensité des précipitations et forme de l'hydrogramme - L'intensité maximale des précipitations a une influence importante sur le résultat de la modélisation (profondeur d'écoulement maximale). Ce n'est pas le cas pour la forme de l'hydrogramme ;

3. NB : l'analyse fait varier les paramètres en conservant toujours la même quantité de pluie (à l'exception de l'analyse de l'effet de la quantité de pluie), ce qui mènent à la modification d'autres paramètres.

Durée des précipitations - Les résultats de la modélisation sur des surfaces en pente dépendent fortement de l'intensité maximale des précipitations. Dans les zones moins pentues où apparaissent des zones d'accumulation, la quantité de pluie joue un rôle important ;

Quantité de pluie - Seuls des changements massifs de la quantité de précipitations ont des effets importants sur le résultat de la modélisation. Si elle est divisée par deux, les principales voies d'écoulement restent les mêmes. Si elle augmente de moitié, les surfaces augmentent très faiblement. Si elle double, les zones s'étendent significativement ;

Modèle de terrain - L'analyse a montré que ce paramètre a un effet clé sur la trajectoire des écoulements. Les principaux chemins d'écoulement sont pour la plupart cartographiés de manière très similaire. Les différences observées résident dans les voies d'écoulement secondaires. L'influence du modèle de terrain et de son traitement sur le résultat de la modélisation est plus grande que la quantité de précipitation ou la forme de la courbe de précipitation.

Le rapport mentionne que *"les principales voies de drainage à la périphérie des villes et dans les zones agricoles ou dans les zones ouvertes sont cartographiées de manière fiable. La fiabilité peut diminuer dans les agglomérations, car de nombreuses petites structures (bordures, murs, etc.) peuvent influencer les voies d'écoulement. Les changements de terrain et / ou les nouveaux bâtiments peuvent également modifier les voies d'écoulement des eaux de surface"*.

2.3 Contenu de la carte de danger "remontée de nappe"

Comme expliqué dans la section 1.1.2, il n'existe pas pour l'heure d'obligation légale de cartographier le danger causé par les remontées de nappe. Toutefois, l'État de Neuchâtel avait demandé au groupement GEDANA d'établir une cartographie des dangers liés aux remontées de nappe dans les secteurs "Val de Ruz" et "Entre deux lacs", en 2009. La carte de danger, rendue au format pdf, est affichée en Figure 11. Les informations, présentées ci-après, qui documentent la conception de la carte, proviennent des rapports techniques ([34] et [35]) délivrés avec la carte de danger. Des informations complémentaires ont également été récoltées auprès de Monsieur Emmanuel Marclay, qui avait oeuvré comme chef de projet sur cette cartographie pour le bureau Norbert.

Étant donné l'absence de documentation au niveau fédéral, cette carte est le fruit d'une méthodologie définie précisément pour cette étude. L'analyse a été menée indépendamment des inondations causées par d'autres phénomènes tels que les crues. Seules les inondations par débordement de nappe au dessus de la surface topographique ont été considérées. La vitesse de remontée de nappe n'a pas été prise en compte. Les degrés de danger ont été déterminés avec la matrice de danger usuelle des dangers d'inondation en ignorant les conditions de vitesse. L'analyse s'est basée sur les hypothèses suivantes :

- la nappe est libre ;
- le niveau du plan d'eau formé par remontée de nappe ne peut dépasser l'altitude des lits du Seyon et du Torrent (ces cours d'eau possèdent des sections et pentes qui permettent de drainer le système).

La confrontation des surfaces isopièzes et du modèle numérique de terrain (précision sur l'altitude de 30 à 50 cm) a permis de cartographier les zones de danger. Dans un premier temps, l'intensité (niveau du Seyon et du Torrent) a été fixée ainsi que les surfaces isopièzes correspondantes. Les surfaces sont construites en considérant la rivière comme le point bas de la vallée et un gradient hydraulique donné.

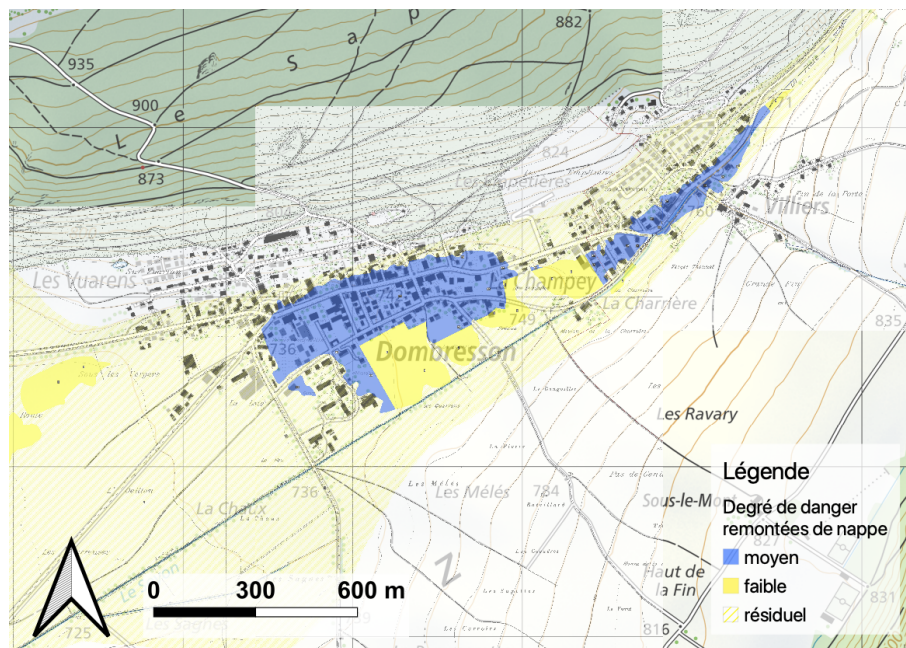


FIGURE 11 – Carte de dangers liés aux remontées de nappe dans la zone de Villiers - Dombresson
Fond de plan : Service WMS swisstopo

Dans un second temps, les informations à disposition (carte de phénomènes et cadastre des événements (données de l'ECAP)) ont servi à évaluer la probabilité d'occurrence. NB : ceci ne correspond pas à la démarche usuelle adoptée dans la cartographie des dangers naturels et a pour effet l'inexistence de carte d'intensité.

3 Méthodologie

3.1 Approche générale

L'approche générale utilisée consiste, tout d'abord, à déterminer quels sinistres, recensés le 21 juin 2019, peuvent être conférés à quels phénomènes et à analyser la répartition des coûts (section 3.2). Sur la base de ces résultats intermédiaires, deux procédures distinctes sont appliquées aux phénomènes de ruissellement et de remontée de nappe.

La procédure exacte, appliquée à la problématique du **ruissellement**, est :

1. Délimitation des bassins versants topographiques et recensement de l'historique des sinistres causés par le ruissellement dans le périmètre d'étude (section 3.3.1)
2. Quantification du ruissellement par la méthode SCS-CN (section 3.3.2)
3. Étude de la compatibilité du scénario modélisé par la carte d'aléa avec l'évènement du 21 juin 2019 (section 3.3.3)
4. Évaluation qualitative et quantitative de la carte d'aléa au moyen d'une enquête de terrain et d'une méthode d'évaluation utilisant les "proxy" (section 3.3.4)
5. Suggestions de mesures de lutte adaptées à la zone d'étude

La procédure exacte, appliquée à la problématique de la **remontée de nappe**, est :

1. Recensement de l'historique des sinistres causés par les remontées de nappe à Dombresson-Villiers (section 3.4.1)
2. Étude des caractéristiques de la zone orientées "nappe" (section 3.4.2) et formulation d'hypothèses sur les causes de la remontée du 21 juin 2019 (section 3.4.3)
3. Analyse des fluctuations de nappe aux Prés Royer (section 3.4.4)
4. Ajout de données au moyen d'un travail de terrain réalisé à Dombresson (section 3.4.5)
5. Reconstitution des niveaux atteints par la nappe lors de l'évènement du 21 juin 2019 et quantification de la remontée attribuable aux précipitations (section 3.4.6)
6. Évaluation qualitative de la carte de danger à l'aide de tous les éléments à disposition
7. Suggestions de mesures de lutte adaptées à la zone d'étude

3.2 Analyse des sinistres du 21 juin 2019

L'ECAP, Établissement Cantonal d'Assurance et de Prévention, assure tous les bâtiments situés sur le territoire du canton de Neuchâtel contre le feu et les éléments naturels. Les trois missions de l'établissement sont : l'assurance, la prévention et l'intervention. Dès lors, la tâche d' "*expertiser et indemniser (assistance aux propriétaires sinistrés, évaluation des dommages, indemnisation)*" [36], suite à l'évènement du 21 juin 2019, est revenue à l'ECAP. On notera ici que "*tous les bâtiments situés dans le canton sont obligatoirement assurés par l'établissement pour les risques qu'il assure à l'exception des bâtiments dont la valeur d'assurance est inférieure à 5'000 francs et qui ne peuvent pas être assurés avec le bâtiment principal, des bâtiments construits pour un usage temporaire, des constructions mobiles ou posées sur le sol sans fondement*" [37]. Les installations et parties du bâtiment assurées sont notamment "*toutes les installations aidant à rendre utilisables les locaux construits, à savoir les portes, escaliers, ascenseurs, fenêtres, volets, stores, les revêtements de sol de tout genre et les installations servant à chauffer, à ventiler et à éclairer les locaux ainsi que des installations sanitaires*" [37]. Par ailleurs, les dommages causés par "*les crues et les inondations extraordinaires dues à des précipitations soudaines et exceptionnelles*" sont couverts alors que ceux "*dus aux fluctuations des eaux souterraines et/ou de la nappe phréatique*" ne le sont pas [37]. En raison de la difficulté à distinguer les causes des dommages (remontée de nappe ou crue/eaux de surface) et leur contribution relative, l'ECAP a pris à sa charge tous les dommages du 21 juin 2019⁴. Des informations sur les sinistres enregistrés (ex : adresses, coordonnées xy, brèves descriptions des dommages, montants des indemnisations) ont été mises à disposition dans le cadre de ce travail. Grâce à une revue d'experts présents sur les lieux après les inondations, une classification simplifiée de la cause des dommages, excluant les remontées de nappe, a été réalisée⁴. C'est ainsi que chaque sinistre s'est vu attribuer le libellé "Crue (dès le 01.01.2018)" ou "Eaux de surface" (Figure 12).

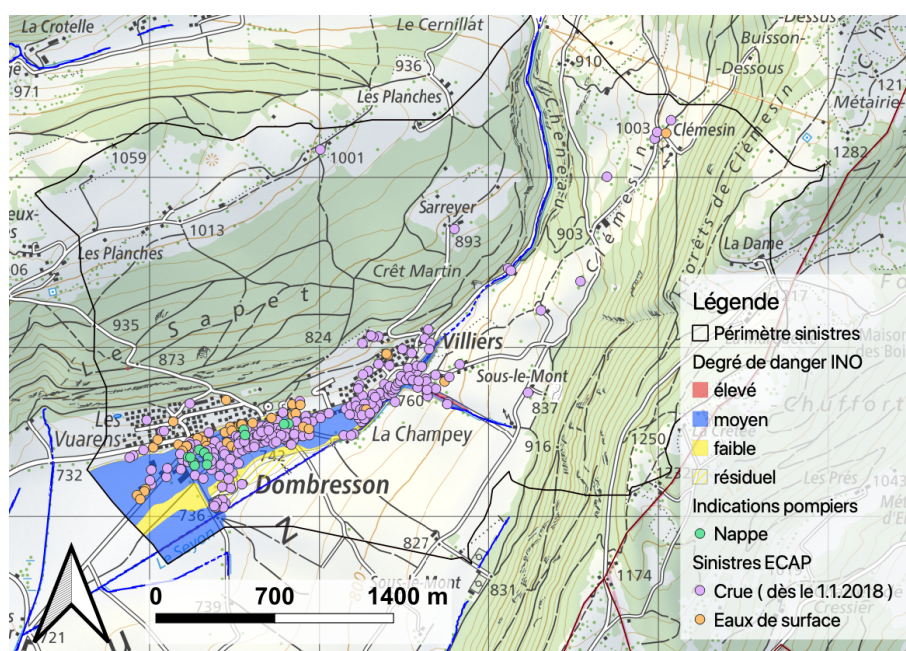


FIGURE 12 – Carte synthétique des effets géoréférencés
Fond de plan : Service WMS swisstopo

Le manque d'informations sur les effets de remontée de nappe a pu être comblé grâce à une personne de

4. Entretien du 23.10.20 avec Monsieur Massimo Vitalba, expert, responsable des sinistres au secteur assurance de l'ECAP

contact au sein des pompiers. Les bâtiments sujets à une inondation persistante des sous-sols (Figure 12) ont été désignés. Les nombreux pompages vains effectués dans ces bâtiments sont un bon indice pour la présence d'eau de la nappe phréatique.

Sur la Figure 12, certaines incohérences peuvent être remarquées : des sinistres apparus très loin géographiquement de la zone d'inondation du cours d'eau attribués à la crue, ou inversement, des sinistres situés au beau milieu de la veine d'écoulement de la crue attribués aux eaux de surface. L'entretien avec le responsable des sinistres⁴ a révélé que certaines erreurs ont pu être commises notamment en raison de la récence de cette distinction. En effet, la cause des inondations est différenciée seulement depuis le 01/01/2018. Une révision des causes des sinistres a été réalisée en respectant les critères qui suivent :

- tout sinistre qui touche à un bâtiment situé à l'intérieur (complètement ou partiellement) de la zone délimitée par la carte de danger (extension maximale représentée par le danger résiduel) est attribué à la crue. Il en va de même pour les sinistres en amont de Villiers, là où le danger n'est pas cartographié mais où les bâtiments sont proches du thalweg du Ruz Chasseran ;
- tout sinistre qui touche à un bâtiment situé complètement à l'extérieur de la zone délimitée par la carte de danger est attribué au ruissellement ;
- tout sinistre recensé sur un bâtiment également désigné par les pompiers comme ayant été touché par la remontée de nappe est attribué à la catégorie "Nappe (et crue)".

Le produit de cette classification se trouve en Figure 13. Un doute subsiste sur l'étendue exacte de la zone de débordement du Ruz Chasseran et donc sur les bâtiments endommagés à proximité de cette limite mais ceux-ci sont très peu nombreux par rapport à la totalité des sinistres.

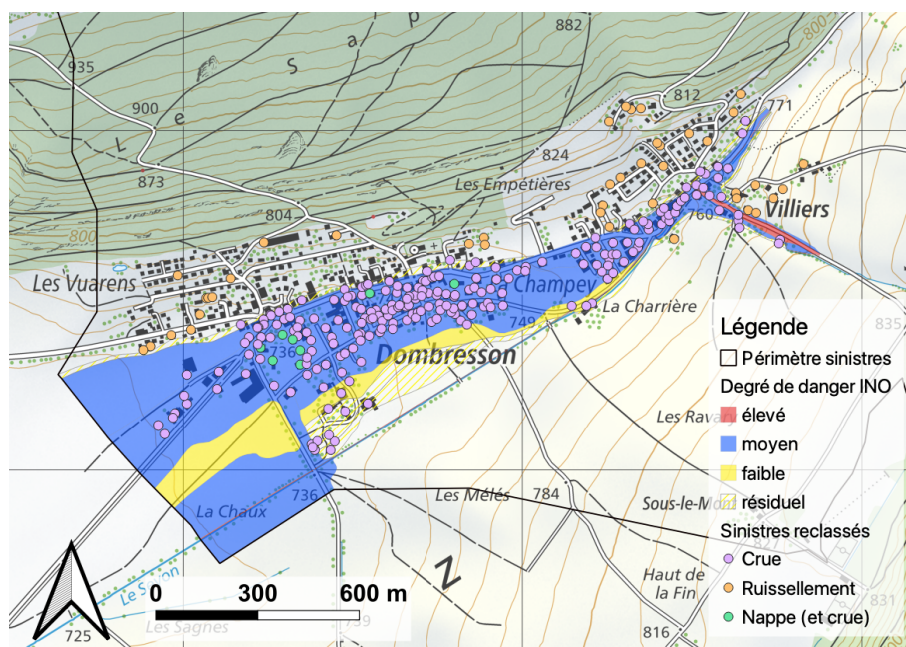


FIGURE 13 – Reclassification des causes des sinistres recensés par l'ECAP
Fond de plan : Service WMS swisstopo

Répartition entre phénomènes

Sur la base de la reclassification effectuée, les dommages couverts par l'ECAP peuvent être conférés aux différents phénomènes en jeu selon la Table 6.

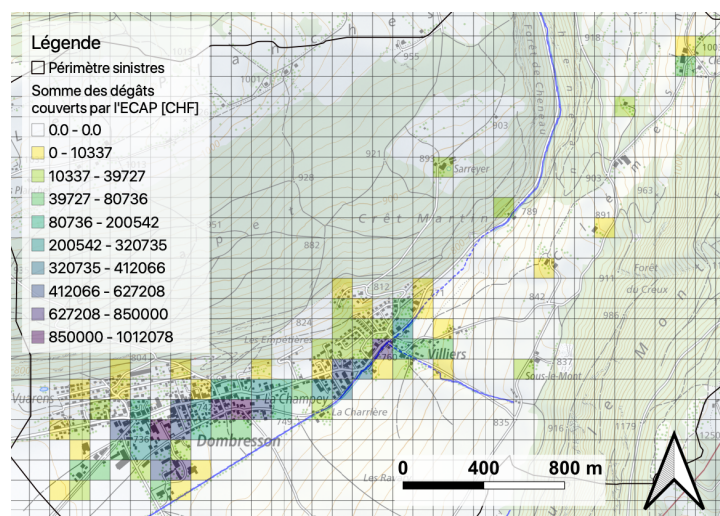
Phénomène	Nombre de sinistres	Montant des sinistres [mio CHF]	Part financière [%]
Crue	232	9.91	78
Ruissellement	52	0.71	5.6
Nappe (et crue)	8	2.08	16.4
Total général	292	12.7	100

TABLE 6 – Contribution des phénomènes aux dommages du 21 juin 2019

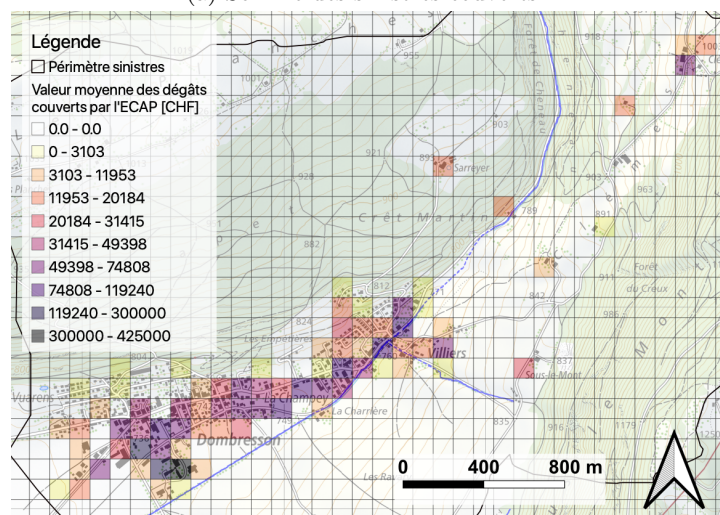
On constate d'abord la part très majoritaire du débordement du Ruz Chasseran (Crue) dans le montant total des sinistres. Par opposition, le ruissellement a causé seulement 5.6% du montant des dommages. La remontée de nappe combinée à la crue (Nappe et crue), malgré le très faible nombre de bâtiments touchés, se révèle avoir pris part à plus de 16% du montant des sinistres. Ce type de sinistre a coûté en moyenne 6 fois plus cher qu'un sinistre causé par le débordement seul (260'000 CHF contre 43'000 CHF). On l'explique par la nature des dégâts aux bâtiments qui diffère selon le phénomène à son origine (voir section 1.3.2) ou éventuellement par la valeur vénale supérieure des bâtiments touchés par la remontée de nappe.

Répartition spatiale

La Figure 14 indique la somme des sinistres ainsi que la valeur moyenne des sinistres couverts par l'ECAP dans chaque case de la grille conçue à cet effet (dimension 100m x 100m). Elle renseigne ainsi sur la répartition spatiale des dommages engendrés par l'évènement du 21 juin 2019, tous phénomènes confondus. Cette figure met en évidence d'une part, que les zones caractérisées par une somme de dommages élevées sont localisées là où se trouvaient les anciens lits du Seyon et Ruz Chasseran et d'autre part, que c'est aussi dans ces zones là que chaque sinistre a engendré le montant de dommages les plus élevés. Ceci démontre non seulement que la densité de sinistres est plus importante dans cette veine d'écoulement mais aussi que chaque sinistre y est en moyenne plus coûteux.



(a) Somme des sinistres couverts



(b) Valeur moyenne des sinistres couverts

FIGURE 14 – Répartition spatiale des sinistres couverts par l'ECAP
Fond de plan : Service WMS swisstopo

3.3 Ruissellement

3.3.1 Manifestation du phénomène dans la zone d'étude (21 juin 2019 et historique)

Le périmètre d'étude (Figure 15) correspond aux bassins versants qui bordent le Ruz Chasseran et le Seyon depuis l'aval du Pâquier jusqu'à la sortie de Dombresson. La délimitation des bassins versants est basée sur la délimitation des bassins versants dans l'étude Scherrer [27], la couche "Bassins versants partiels 2 km²", les courbes de niveau 1 mètre de 2018-2019 et la carte de l'aléa ruissellement.

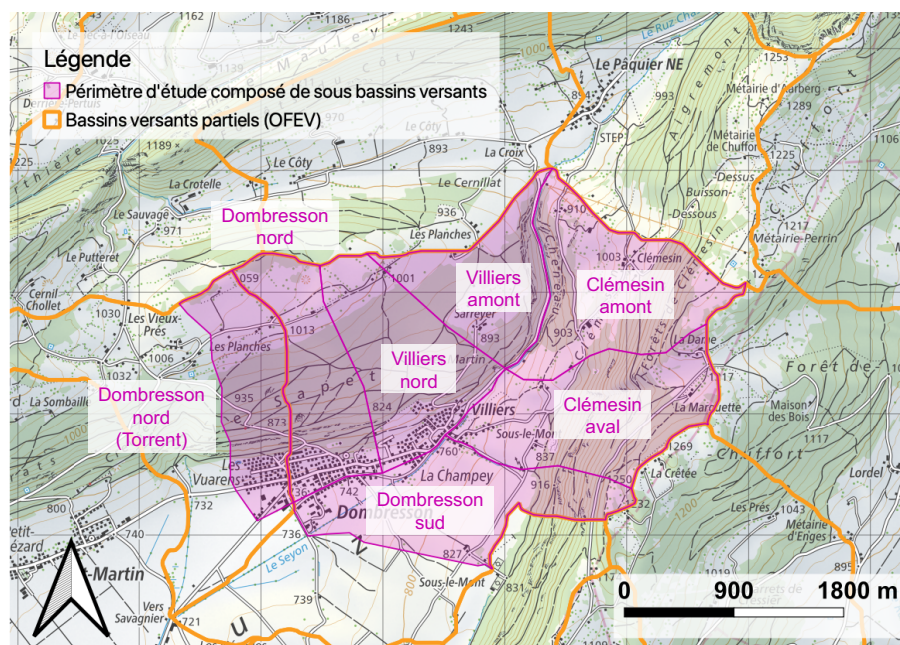


FIGURE 15 – Périmètre d'étude composé de sous bassins versants
Fond de plan : Service WMS swisstopo

Remarques :

Les bassins "Villiers amont" et "Clémesin amont" sont également inclus dans le périmètre d'étude de l'étude Scherrer [27]. Le bassin "Dombresson nord (Torrent)" fait partie d'un bassin versant partiel différent des autres sous-bassins. Il fait malgré tout partie de la zone étudiée car des sinistres ont été répertoriés au sud du bassin. Dans le village de Dombresson, les limites sont tracées approximativement car le lit du Seyon canalisé ne coïncide pas avec le thalweg.

Sinistres du 21 juin 2019

Sur la base des sinistres recensés par l'ECAP, la Table 7 a été complétée. Le montant des dommages est indiqué précisément pour chaque bassin versant à l'exception des bassins où un seul sinistre a été recensé. Étant donné que le montant des dommages dépend de la présence d'infrastructures dommageables, de leur valeur vénale et de leur vulnérabilité, il ne donne pas une indication fidèle du phénomène étudié. Pour cette raison, la colonne "pourcentage de bâtiments touchés" a été ajoutée. Elle représente le nombre de bâtiments sinistrés par le ruissellement par rapport au nombre de bâtiments total, sans compter ceux dans zone de débordement (selon l'emprise de la carte de danger d'inondation). En considérant que les bâtiments vulnérables sont répartis de façon homogène sur le territoire et sans considérer leur valeur vénale, cette colonne met bien en évidence l'importance croissante du phénomène de ruissellement d'aval en amont du vallon.

Bassins versants	Superficie [km^2]	Montant de dommages causés par le ruisselle- ment [CHF]	Pourcentage de bâtiments touchés [%]
Clémesin amont	1,58	127'167	20.0
Villiers amont	1,03	5'000-50'000	10.0
Clémesin aval	1,64	249'549	26.3
Villiers nord	1,37	224'100	13.9
Dombresson sud	1,51	0-5'000	7.1
Dombresson nord	1,14	4'457	4.5
Dombresson nord (Torrent)	1.02	78'099	3.8

TABLE 7 – Répartition des sinistres attribués au ruissellement entre les bassins versants délimités dans la section 3.3.1

Historique des sinistres

L'historique des sinistres de l'ECAP engendrés par les phénomènes "05-Inondation par un cours d'eau (Crue)" et "06-Ruissellement (Écoulement de surface)"⁵ a été obtenu auprès du SITN (Système d'Information du Territoire Neuchâtelois). Dans la base de donnée reçue, les sinistres sont classés ainsi :

- crue, inondation (jusqu'au 31.12.2017) ;
- eaux de surface ;
- inondation (dès le 1.1.2018) ;
- tempête, ouragan ;

Comme décrit dans la section 3.2, l'ECAP fait la distinction entre les causes des inondations depuis le 1^{er} janvier 2018 seulement. Le seul moyen de s'assurer qu'un sinistre de la première catégorie n'est pas causé par le débordement du Ruz Chasseran ou du Seyon est d'exclure tous les sinistres dans les limites de la carte de danger. Les sinistres des trois premières catégories, situés en dehors de la zone de danger INO, sont affichés en Figure 16. Les sinistres, qui couvrent la période 1988-2020 (événement du 21 juin 2019 excepté), sont au nombre de 23. Le ruissellement du 21 juin 2019 est donc responsable de plus de deux tiers de la totalité des sinistres recensés ces 30 dernières années. Ceci démontre le caractère exceptionnel de l'évènement du 21 juin 2019.

5. Nouveaux codes des causes développé par l'UIR (Union Intercantonale de Réassurance)

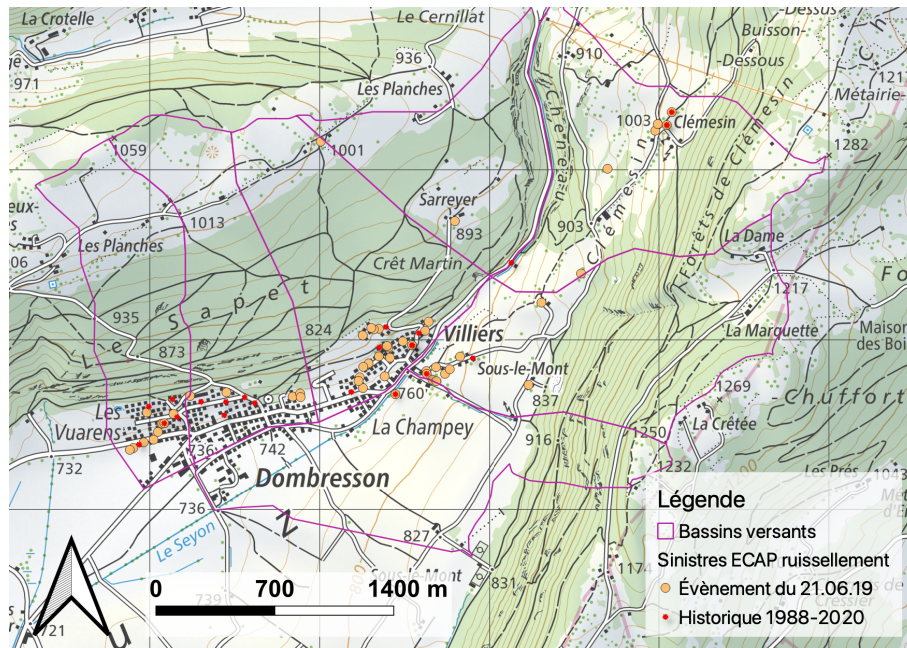


FIGURE 16 – Historique des sinistres causés par le ruissellement hors zone de danger INO
Fond de plan : Service WMS swisstopo

3.3.2 Méthode SCS-CN

La méthode utilisée pour quantifier le ruissellement est celle du Soil Conservation Service-Curve Number (SCS-CN). Elle a été développée par le département de l’agriculture des États-Unis et est décrite au chapitre 10 du livre "Part 630 Hydrology National Engineering Handbook" [38] ou encore dans le livre paru en 2013 intitulé "Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology" [39].

L’équation du ruissellement "Curve Number" s’écrit :

$$H_{rui} = \begin{cases} \frac{(P-I_a)^2}{P+I_a+S} & P > I_a \\ 0 & P \leq I_a \end{cases} \quad (1)$$

H_{rui} : Ruissellement [mm]

S : Rétenion maximum après que le ruissellement ait commencé [mm]

P : Précipitation [mm]

I_a : Abstraction initiale [mm]

Une relation empirique permet de relier I_a et S (Eq 2). En substituant l’équation 2 dans l’équation 1, on obtient la relation pluie-ruissellement (Eq 3).

$$I_a = 0.2S \quad (2)$$

$$H_{rui} = \begin{cases} \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} & P > 0.2 S \\ 0 & P \leq 0.2 S \end{cases} \quad (3)$$

La méthode SCS-CN permet de combiner divers paramètres qui influencent le ruissellement (couverture végétale, utilisation/exploitation du sol, type de sol, conditions de pluie préalables, conditions hydro-

giques [39]) en une seule variable sans dimension appelée CN (Curve Number). La gamme de valeurs que peut prendre cette variable va de 30 à 100. Un grand CN indique un fort ruissellement ou une mauvaise infiltration alors qu'un petit CN indique une bonne infiltration et ainsi peu de ruissellement. Les tables publiées dans le rapport technique TR-55 par le département de l'agriculture des États-Unis - service de conservation des ressources naturelles [40] sont utilisées pour assigner une valeur à la variable "Curve Number". Les paramètres d'entrées sont le type de sol (HSG - Hydrologic Soil Group) et la description de la couverture du sol, pouvant inclure le type de couverture, le type d'exploitation (pour les terrains agricoles) et les conditions hydrologiques. Le Curve Number peut ensuite être ajusté en prenant en considération les conditions de pluie préalables (AMC - Antecedent Moisture Condition).

La variable CN est reliée à S par l'équation 4. C'est ainsi que les variables CN et P suffisent à obtenir une estimation du ruissellement H_{ru} (Figure 17).

$$S = 25.4 \left(\frac{CN}{1000} - 10 \right) \quad (4)$$

CN : Curve Number [-]

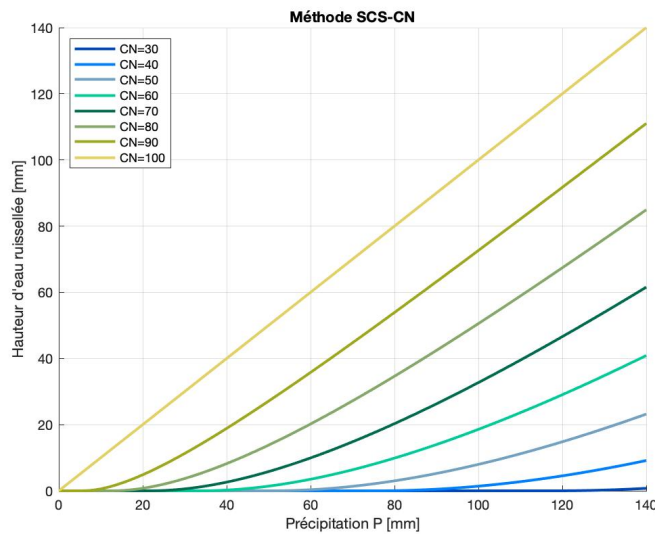


FIGURE 17 – Ruissellement en fonction des précipitations et du CN selon l'équation 3

Les calculs d'estimation du ruissellement ont été réalisés dans le logiciel QGIS. Le schéma ci-après (Figure 18) résume la méthodologie employée.

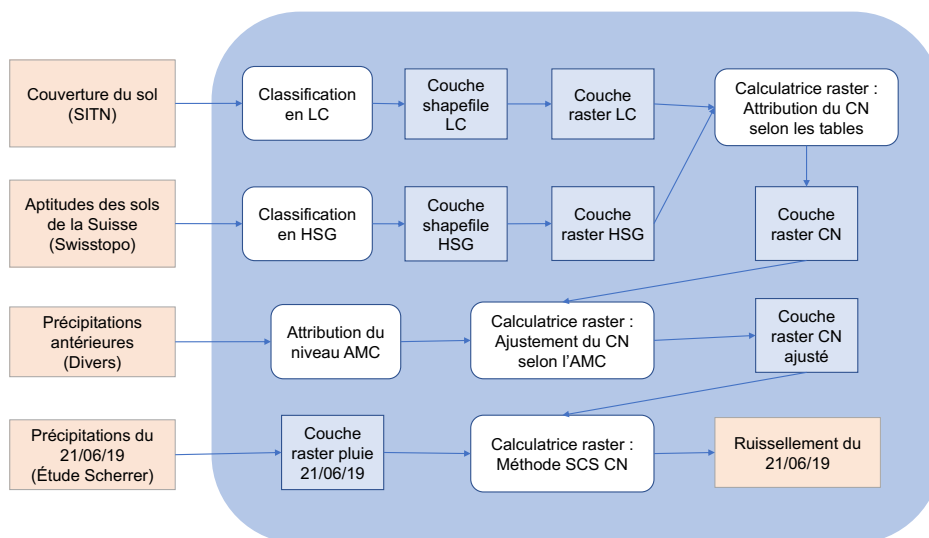


FIGURE 18 – Organigramme de la méthodologie employée dans le système d'information géographique QGIS pour l'estimation du ruissellement de surface avec la méthode SCS-CN

Les données utilisées, leur structure et la façon dont elles ont été exploitées sont décrites ci-après.

Couverture du sol

Ces données ont servi à définir à quelles "description du couvert" affichées dans les tables peuvent s'apparenter au mieux les sols dans notre périmètre d'étude. Les caractéristiques de couverture végétale et d'utilisation/exploitation du sol ont une influence importante sur le potentiel d'infiltration [40].

Les géodonnées sont catégorisées selon deux niveaux de détail (Tableau 8). Le niveau le plus général a été sélectionné car il a été jugé qu'il était en adéquation avec la précision du résultat souhaitée. La dernière colonne du tableau indique la reclassification effectuée : chaque classe est caractérisée par un code ; les classes "bâtiments", "surfaces à revêtement dur" et "surfaces sans végétation" sont réunies au sein de la même classe.

Catégories	Sous-catégories	Code LC
Bâtiments	-	3
Surfaces à revêtement dur	route/chemin, trottoir, îlot, chemin de fer, place d'aviation, bassin, accès/place, autre surface dure ;	3
Surfaces vertes	pré-champ, pâturage, vigne, verger, jardin, tourbière, marais, autre surface verte ;	2
Eaux	eau stagnante, cours d'eau, roselière ;	4
Surfaces boisées	forêt, pâturage boisé, tourbière boisée, autre surface boisée ;	1
Surfaces sans végétation	rocher, éboulis/sable, gravière, décharge, inculte, enrochement ;	3

TABLE 8 – Catégories de couverture du sol dans la couche SIG et reclassification réalisée pour l'estimation du ruissellement

Les correspondances effectuées sont affichées ci-après :

Code LC	Description du couvert dans les tables [40]
1	bois (woods, good hydrologic condition)
2	cultures en lignes (row crops - straight row - good hydrologic condition)
3	surface imperméable (impervious areas : paved parking lots, roofs, driveways, etc)
4	aucun

Remarque : les surfaces vertes sont en très grande majorité du pré-champ et ont dès lors été entièrement assimilées à des cultures en lignes sur la base de la visualisation de photos aériennes.

Aptitudes des sols de la Suisse

Ces données ont été utilisées pour déterminer dans quels groupes hydrologiques de sols peuvent être classés les sols présents dans notre périmètre d'études. Les taux d'infiltration des sols sont considérablement affectés par la perméabilité des couches superficielles [40]. Les groupes de sols hydrologiques, tels qu'ils sont définis par le département de l'agriculture des Etats-Unis - service de conservation des ressources naturelles [41], sont décrits ci-après :

Groupe A - Les sols de ce groupe ont un faible potentiel de ruissellement lorsqu'ils sont complètement humides. L'eau est transmise librement à travers le sol . Les sols du groupe A contiennent généralement moins de 10% d'argile et plus de 90% de sable ou de gravier et ont des textures de gravier ou de sable.

Groupe B - Les sols de ce groupe ont un potentiel de ruissellement modérément faible lorsqu'ils sont complètement humides. La transmission de l'eau à travers le sol se fait sans entrave. Les sols du groupe B ont généralement entre 10 et 20 % d'argile et 50 à 90 % de sable et ont des textures de sable limoneux ou de limon sableux.

Groupe C - Les sols de ce groupe ont un potentiel de ruissellement modérément élevé lorsqu'ils sont complètement humides. La transmission de l'eau à travers le sol est quelque peu limitée. Les sols du groupe C ont généralement entre 20% et 40% d'argile et moins de 50% de sable et ont des textures de limon, limon argileux sableux, limon argileux.

Groupe D - Les sols de ce groupe ont un potentiel de ruissellement élevé lorsqu'ils sont complètement humides. Le mouvement de l'eau à travers le sol est restreint ou très limité. Les sols du groupe D ont généralement plus de 40% d'argile, moins de 50% de sable et ont des textures argileuses.

La classification proposée par le département de l'agriculture des Etats-Unis repose essentiellement sur la conductivité hydraulique saturée de la couche la moins transmissive des 50 premiers centimètres depuis la surface. Les valeurs limites des quatre groupes diffèrent en fonction de la présence ou non d'une couche imperméable entre 50 et 100 cm de profondeur (Tableau 9).

Profondeur de la couche imperméable	HSG			
	A	B	C	D
plus de 100 cm	$K > 864$	$864 \geq K > 345.6$	$345.6 \geq K > 34.56$	$34.56 \geq K$
entre 50 et 100 cm	$K > 3456$	$3456 \geq K > 864$	$864 \geq K > 86.4$	$86.4 \geq K$

TABLE 9 – Classes de conductivité hydraulique saturée (K en [$cm/jour$]) des quatre groupes hydrologiques de sols en fonction de la profondeur d'une couche imperméable [42]

La couche est composée de 144 unités cartographiques différentes déterminées à partir des propriétés du sols. Chaque unité représente une combinaison des six propriétés suivantes : "profondeur", "pierre-sité", "capacité de rétention hydrique", "capacité de rétention en substances nutritives", "perméabilité" et "mouillure" [43]. La couche possède également un champs "Type de sol" mais seule la propriété "perméabilité" a été utilisée pour déterminer à quels groupes hydrologiques de sols s'apparentent le mieux les sols dans notre périmètre d'étude. La perméabilité a été mesurée en laboratoire sur des échantillons cylindriques saturés. L'horizon le moins perméable des 50 cm supérieurs a été pris en considération [44].

La classification effectuée (Tableau 10) repose sur la comparaison des conductivités hydrauliques (ou perméabilité). La première ligne du Tableau 9 a été choisie en raison de l'absence d'information sur la présence d'une couche imperméable entre 50 et 100 cm. À titre informatif, les types de sols correspondant aux degrés de perméabilités sont indiqués dans la colonnes "Type de sol" mais n'ont pas été étudiés plus en détails. Il s'agit des sols situés dans la zone d'étude et ses abords. Aucun sol caractérisé par une perméabilité "très ralenti" n'est inclus dans le périmètre d'étude.

Perméabilité	[$cm/jour$]	Type de sol	Code HSG
Excessif	8640 - 865	Lithosol ; eutric, calcaric Regosol ; Ranker ; Rendzina	1 (A)
Normal	864 - 86	eutric, dystic Regosol ; Rendzina (Jura), calcaric Regosol ; Podzol ou Eutric Cambisol, Rendzina (Jura) ; humic Cambisol ; eutric Regosol ou Eutric Regosol ; Rendzina (Jura) ; Ranker ; Lithosol	2 (B et C)
Légèrement ralenti	85.9 - 8.6	eutric, calcaric, gleyic Cambisol ; eutric Cambisol (feinkörnige Variante)	3 (C et D)
Ralenti	8.5 - 0.8	eutric, calcaric, gleyic Cambisol ; eutric Cambisol (feinkörnige Variante)	4 (D)
Très ralenti	0.7 - 0.08	eutric, gleyic Cambisol ; mollic, humic Gleysol	-

TABLE 10 – Catégories de perméabilités et types de sols correspondant dans la couche SIG et reclassification réalisée, c'est à dire attribution d'un groupe hydrologique HSG, pour l'estimation du ruissellement

Matrice d'assignation du Curve Number

La matrice ci-après a été constituée sur la base des informations pré-citées et des tables publiées par le département de l'agriculture des États-Unis - service de conservation des ressources naturelles dans son rapport technique TR-55 [40]. Pour les sols à cheval sur deux groupes hydrologiques (BC et CD), la valeur moyenne a été calculée. Les surfaces couvertes d'eau se sont vu attribuer "100" peu importe le groupe hydrologique de sol.

Couverture du sol	Hydrological Soil Group			
	A (1)	BC (2)	CD (3)	D (4)
boisée (1)	30	63	74	77
verte (2)	67	73	87	89
dure, bâtiments, sans végétation (3)			98	
eau (4)			100	

TABLE 11 – Matrice d’attribution des CN en fonction de la couverture du sol et du groupe hydrologique de sol

Précipitations antérieures

Ces données ont été utilisées pour déterminer la condition d’humidité antérieure (AMC). Ce paramètre fait référence au degré de saturation du sol avant le début des précipitations. Dans le cas où le sol est complètement saturé, toute la quantité de pluie se convertira directement en ruissellement sans pertes d’infiltration et si le sol est complètement sec, il est possible que toute la quantité de pluie soit absorbée par le sol, conduisant à aucun ruissellement de surface. Ainsi, les conditions d’humidité antérieures affectent considérablement le processus de ruissellement des précipitations [39].

AMC	Somme des précipitations des 5 jours précédents (cm)	
	Saison de dormance	Saison de croissance
I (dry)	<1.3	<3.6
II (moderate)	1.3 - 2.8	3.6 - 5.3
III (wet)	>2.8	>5.3

TABLE 12 – Antecedent Moisture Condition en fonction des 5 derniers jours et de la saison [39]

Le Tableau 13 montre les lames d’eau précipitées aux stations de Chaumont (CHM), Dombresson (DOM) et Petite Combe (PC) pour différentes périodes précédant le 21 juin 2019. La position des stations se trouve en Figure 22. Les précipitations enregistrées aux trois stations indiquent une condition d’humidité antérieure AMC I (sec) puisque juin correspond à la saison de croissance. Malgré ce résultat, aucun ajustement du CN n’a été réalisé car le mois de juin 2019 a été particulièrement humide comme mentionné dans le rapport Scherrer [27] et comme en atteste la dernière ligne du tableau.

Période	Stations		
	CHM	DOM	PC
20/06	25 mm	24.4 mm	27.2 mm
16/06 - 20/06	25 mm	24.4 mm	27.2 mm
01/06 - 20/06	139.8 mm	112.6 mm	103.8 mm

TABLE 13 – Conditions antérieures aux stations de Chaumont, Dombresson, Petite Combe

Précipitations du 21 juin 2019

Dans l’étude Scherrer [27], une analyse météo a permis de reconstituer la distribution spatiale de la lame d’eau totale précipitée sur toutes la durée de l’évènement du 21 juin 2019. Ce résultat apparaît au format d’une carte constituée d’isohyètes générée à partir des données pluviométriques des diverses stations météorologiques privées et publiques (Figure 3.3 p.12 du rapport [27]). Les données ont ensuite été interpolées.

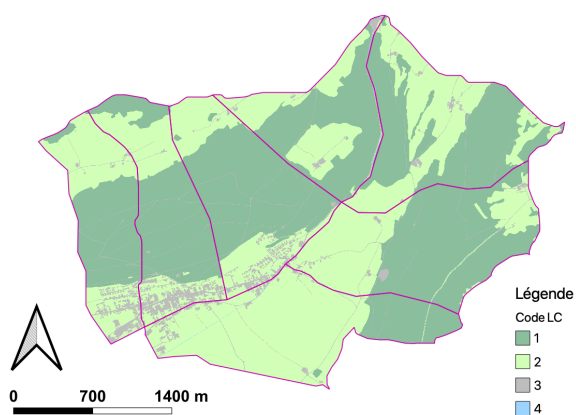


FIGURE 19 – Couverture du sol

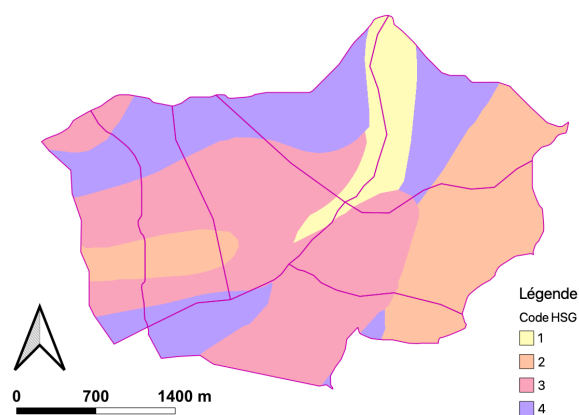


FIGURE 20 – Groupes hydrologiques de sol

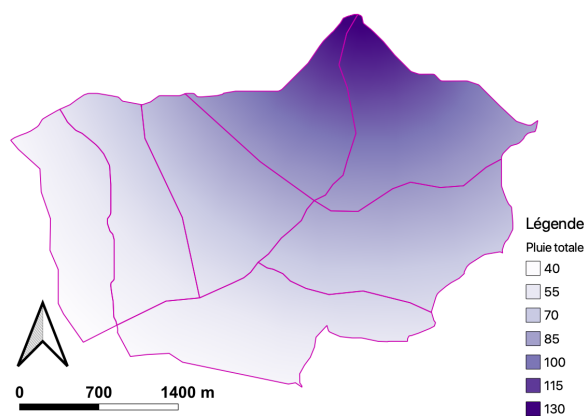


FIGURE 21 – Somme des précipitations lors de l'évènement du 21 juin 2019 (interpolé à partir du rapport Scherrer [27])

3.3.3 Compatibilité du scénario modélisé par la carte et de l'évènement

Dans le but de juger de la fidélité de la carte d'aléa avec les écoulements causés par l'évènement du 21 juin 2019, la répartition temporelle et spatiale des précipitations ce jour là a été examinée. Les stations météo les plus proches qui ont monitoré l'évènement sont Petite Combe (PC), Dombresson (DOM), Chaumont (CHM) (Figure 22). Sur la Figure 23 sont indiquées les lames d'eau enregistrées à ces stations et, en comparaison, le scénario de pluie représenté sur la carte d'aléa de ruissellement. Le scénario de modélisation a été calé par rapport à l'emplacement du pic maximum. La valeur entre parenthèses à côté de l'acronyme des stations indique la quantité totale précipitée entre 21h00 et 00h30 (en *mm*)⁶. La Table 14 a été complétée sur la base de la Figure 23.

Station	Forme de l'hydrogramme	Quantité	Intensité maximale	Durée
Chaumont	Similaire	Inférieure (22%)	Inférieure (18%)	Similaire
Dombresson	Similaire	Similaire (78%)	Supérieure (150%)	Similaire
Petite Combe	Similaire	Supérieure (160%)	Inférieure (50%)	Supérieure (300%)

TABLE 14 – Comparaison des paramètres des pluies mesurées aux stations avec le scénario de modélisation

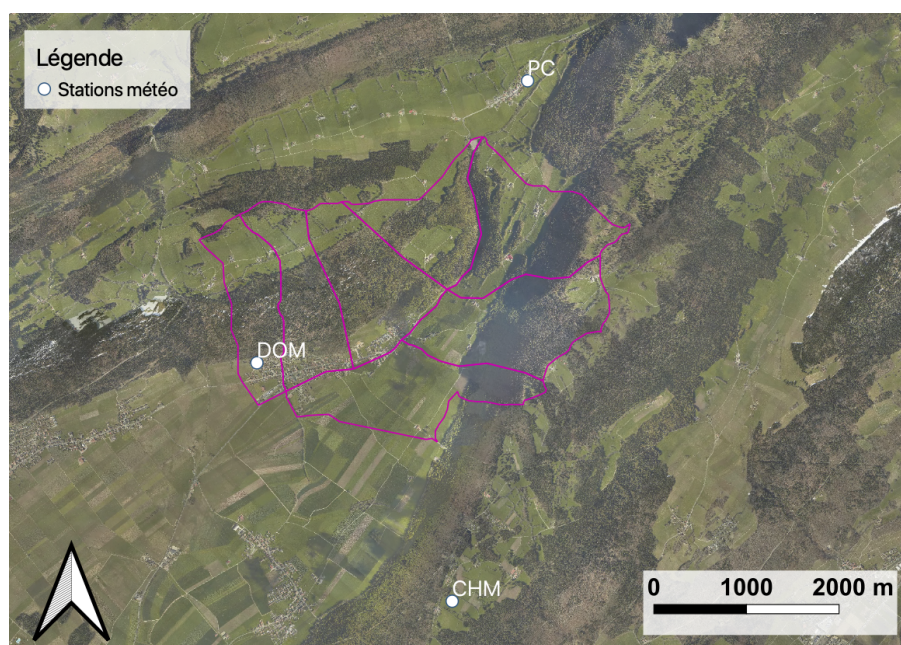


FIGURE 22 – Position des stations météo DOM, CHM et PC
Fond de plan : Service WMS swisstopo

6. Le temps de retour estimé des précipitations à Dombresson par le bureau Scherrer (10 ans) interpelle au regard de la similitude entre la pluie horaire modélisée (55 *mm/h*, temps de retour 100 ans) et la pluie horaire mesurée à Dombresson (43 *mm/h*). La consultation de la figure 3.4 en page 13 du rapport Scherrer [27] (courbe intensité-durée-fréquence de la station de Chasseral) suggère, selon nous, plutôt un temps de retour de 30 ans.

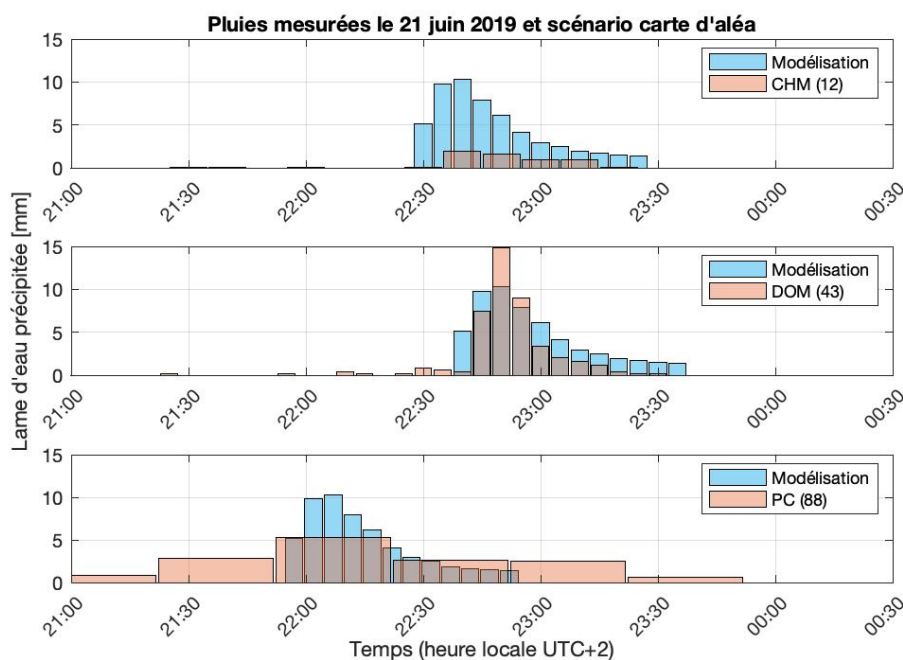


FIGURE 23 – Distribution temporelle des précipitations aux stations Chaumont, Dombresson, Petite Combe lors de l'événement du 21 juin 2019

Sur la base des informations provenant du rapport technique de la carte d'aléa [33] et la répartition temporelle et spatiale des précipitations du 21 juin 2019, l'observation des effets suivants est attendue :

- représentation plus fidèle en zone agricole qu'en zone urbaine où les petites structures (bordures, murs,...) peuvent influencer les écoulements. De plus, le MNT utilisé pour produire cette carte date de 2010 ; d'autres constructions ont pu modifier l'altitude du terrain entre 2010 et 2019. En revanche le MNT possède une résolution de 1m. L'analyse de sensibilité de la simulation a démontré les effets considérables du MNT sur les écoulements modélisés, en particulier les veines d'écoulement secondaires ;
- éventuellement une surévaluation des écoulements en zone urbaine en raison du réseau d'évacuation d'eau pluviales non considéré qui absorbe une partie des précipitations. Cet effet peut toutefois être très faible voire inexistant car le réseau est dimensionné pour un temps de retour de 5 à 10 ans [11] ;
- assez bonne représentation de l'événement du 21 juin 2019 par la carte d'aléa sur l'ensemble du périmètre d'étude. L'analyse de sensibilité du rapport technique a révélé que les paramètres de précipitations qui ont le plus d'influence sur les résultats de la modélisation sont l'intensité maximale ainsi que la quantité. À la station de Chaumont, située hors du périmètre d'étude, ces paramètres sont nettement inférieurs. En revanche, à Dombresson, la quantité est légèrement inférieure et l'intensité maximale est supérieure. À Petite Combe, c'est l'inverse ; l'intensité maximale est inférieure mais la quantité est très nettement supérieure. Finalement, les différences entre le scénario modélisé et les pluies effectives pourrait mener à des surestimation ou des sous estimations des surfaces touchées par les écoulements de surface ou des hauteurs d'eau mais globalement, les veines principales et secondaires d'écoulement devraient rester les mêmes.

3.3.4 Méthode d'évaluation de la carte de l'aléa ruissellement

Évaluation qualitative

L'évaluation qualitative a été réalisée par le biais d'une enquête de terrain menée dans le but d'obtenir des témoignages et relever les éventuelles traces de ruissellement qui pourraient être observées. La visite sur site s'est déroulée le vendredi 30 octobre 2020 en compagnie de Monsieur Christian Moertl (superviseur EPFL). Cinq sous-bassins ont été visités partiellement : Dombresson nord et nord (Torrent), Villiers aval, Clémesin aval et amont.

Évaluation quantitative

Pour l'évaluation d'un modèle qui cartographie le danger de ruissellement intense, l'utilisation de données "proxy" des impacts liés au ruissellement est possible. La méthodologie de cette évaluation est exposée dans un article, co-écrit par la SNCF et l'INRAE, où elle a été appliquée au contexte ferroviaire [45]. Dans l'article pré-cité, les "proxy" sont définies comme des informations sur les impacts du ruissellement "*collectées et rapportées à partir de différents supports : enquêtes post-événement pour recueillir la localisation des impacts sur les infrastructures ou sur les réseaux de transport, les sinistres sur les bâtiments ou infrastructures, les analyses de la presse et des réseaux sociaux ou la science citoyenne*". La méthode s'articule en quatre étapes :

1. *Définition de la zone d'évaluation* - La nature spatiale des données proxy et de la carte évaluée est différente (information localisée vs continue). La zone dans laquelle des mesures quantitatives sont calculées doit être directement en lien avec la zone où les données d'impacts du ruissellement sont disponibles.
2. *Caractérisation de la vulnérabilité et du risque dans la zone d'évaluation*⁷ - D'une part, la vulnérabilité des infrastructures influence la survenance d'impacts causés par une situation de danger (une infrastructure qui possède une structure de protection est moins vulnérable au ruissellement). D'autre part, dans le but de comparer les données proxy aux indications de la carte à évaluer, il faut choisir quels degrés de danger peuvent générer un risque. Finalement, les zones à risque peuvent être déterminées en respectant la logique selon laquelle "plus la vulnérabilité est élevée, plus le niveau de danger déclenchant un risque est faible".
3. *Évaluation quantitative de la carte* - Dans un premier temps, une table de contingence (Table 15) est complétée. Si un impact a été observé dans une zone considérée à risque, l'impact est compté comme un "hit". Si aucun impact n'a été observé dans une zone considérée non à risque, l'impact est comptabilisé comme un "vrai négatif". Si un impact a été observé et que la zone n'est pas déclarée à risque, l'impact est compté comme un "miss". Enfin, si aucun impact n'a été observé mais que la zone est déclarée à risque, l'impact est comptabilisé comme une "fausse alarme".

L'évaluation quantitative consiste alors à calculer les critères de performance : probabilité de détection, ratio des fausses alarmes, test du χ^2 (Figure 16). Ce dernier permet de définir si la dépendance entre les niveaux de risque et la survenue des impacts est significative. Pour cela, le χ^2 est comparé à celui de la distribution théorique en toute indépendance du risque et des impacts.

7. risque = probabilité de danger \times dommages potentiels OU risque = aléa \times vulnérabilité [4]

	Zone déclarée à risque	Zone déclarée non à risque
Impact observé	"Hits"	"Misses"
Aucun impact observé	Fausses alarmes	Vrais négatifs

TABLE 15 – Table de contingence

	Formule	Interprétation
Probabilité de détection (POD)	$\frac{\text{Hits}}{\text{Hits} + \text{Misses}}$	Compris entre 0 et 1 Score parfait : 1
Ratio de fausses alarmes (FAR)	$\frac{\text{Fausses alarmes}}{\text{Hits} + \text{Fausses alarmes}}$	Compris entre 0 et 1 Score parfait : 0
Test du χ^2	$\sum \frac{(\text{Obtenus} - \text{Théoriques})^2}{\text{Théoriques}}$	$P(\chi^2 \geq 10.83) = 0.001$ "Extrêmement significatif" $P(\chi^2 \geq 7.88) = 0.005$ "Très significatif" $P(\chi^2 \geq 6.63) = 0.01$ "Significatif" $P(\chi^2 \geq 5.02) = 0.025$ $P(\chi^2 \geq 3.84) = 0.05$ $P(\chi^2 \geq 2.71) = 0.1$ $P(\chi^2 \geq 1.32) = 0.25$

TABLE 16 – Critères de performance (issu de [45] et complété)

4. *Prise en compte des mesures de mitigation du risque* - Si une zone est à risque, les acteurs peuvent avoir mis en place des mesures d'atténuation qui expliquent l'absence d'impacts observés et les fausses alarmes qui en résultent. Les structures d'atténuation peuvent prendre diverses formes : protection des bâtiments, bassins de rétention, ouvrages hydrauliques traversant sous les infrastructures de transport ou actions de résilience comme une supervision renforcée en cas d'alerte de fortes pluies. Une zone classée à risque qui a fait l'objet d'une mesure de ce genre et où aucun impact n'a été répertorié peut être considérée comme un "hit" au lieu d'une fausse alarme. À l'inverse, les vrais négatifs peuvent être déplacés dans la catégorie des "misses" si la zone a fait l'objet d'une mesure d'atténuation.

Les résultats exposés dans l'article indiquent que l'information sur la vulnérabilité et les mesures d'atténuation est nécessaire pour diminuer le taux de fausses alarmes. La manière dont les mesures d'atténuation sont prises en compte a une influence sur la probabilité de détection. Si une compilation de données d'impact est disponible sans informations sur la vulnérabilité, il est possible de calculer des estimations fiables de la POD mais pas du FAR.

Une comparaison quantitative entre la carte d'aléa du ruissellement et les impacts localisés du ruissellement dans le périmètre d'étude, basée sur cette méthodologie, a été réalisée. Les données proxys à disposition sont les sinistres recensés par l'ECAP (événement du 21 juin 2019 seul et historique complet). Ce sont des proxys de type ponctuel. Les étapes 2 et 4 ont été respectivement simplifiée et supprimée en raison de l'absence de données permettant de caractériser la vulnérabilité des cibles et de l'absence de données sur les mesures de mitigation en place.

Étape 1 : Définition de la zone d'évaluation

La zone d'évaluation choisie exclut tous les bâtiments entièrement ou partiellement à l'intérieur de la carte de danger INO ou à l'extérieur du périmètre d'étude. Les bâtiments de plus de 12 m² sont conservés, puis deux zones d'évaluation sont générées : une zone tampon de 6 m et une zone tampon de 3 m autour

des bâtiments.

Étape 2 : *Caractérisation du danger dans la zone d'évaluation*

La vulnérabilité des bâtiments n'est malheureusement pas connue. Seul l'aléa est pris en considération. En ce qui concerne ce dernier, la couche de données de la carte d'aléa n'a pas pu être obtenue auprès de l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV). La donnée a dès lors été reconstituée en effectuant un export de la carte d'aléa affichée dans QGIS, puis en la géoréférençant à nouveau dans le logiciel. La donnée qui résulte de cette manipulation possède une résolution de 1×1 m. Étant donné que l'aléa le plus faible (rose clair) couvre une très grande majorité de la surface, ce degré a été écarté de l'analyse. Les deux degrés conservés sont donc $h > 0.1$ m (rose foncé et violet) et $h > 0.25$ m (violet uniquement).

Étape 3 : *Évaluation quantitative de la carte*

Les tables de contingences et les critères de performances correspondant peuvent être consultés dans les résultats.

Étape 4 : *Prise en compte des mesures de mitigation du risque*

Cette étape n'a pas été réalisée.

3.4 Remontée de nappe

3.4.1 Manifestation du phénomène dans la zone d'étude (21 juin 2019 et historique)

Évènement du 21 juin 2019

Les pompiers ont du faire face à des problèmes de remontée de nappe à l'Allée des Peupliers, au Passage des Condémines ainsi qu'à Grand'Rue (Figure 24).

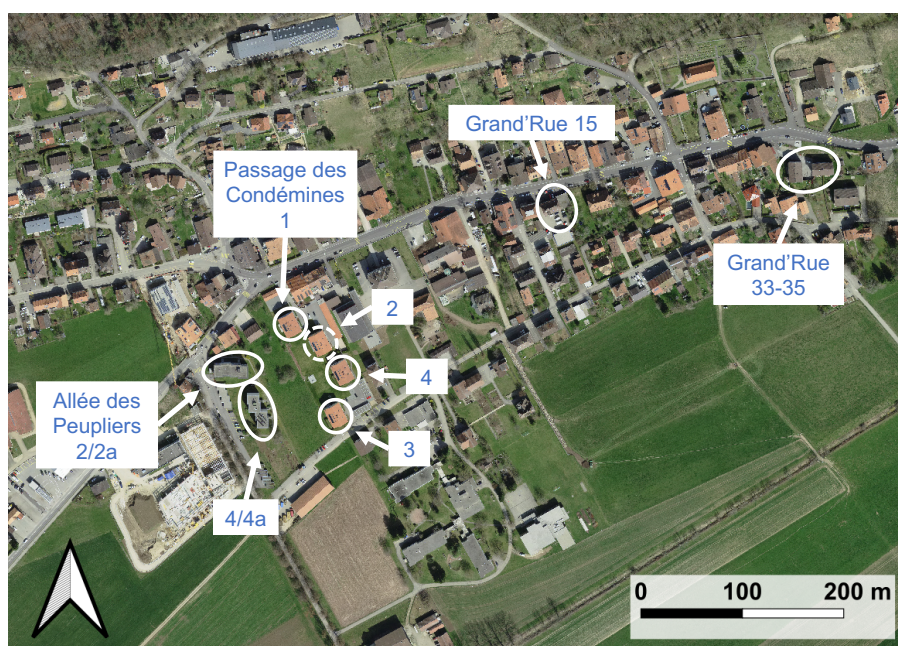


FIGURE 24 – Lieux touchés par la remontée de la nappe le 21 juin 2019 ss.
Fond de plan : Swisimage2017 © Swisstopo

	Évènement du 21 juin 2019	Historique depuis 2017 ?
Allée des Peupliers	Hauteurs d'eau entre 120 et 150 cm dans les sous-sols. Les images 25a et 25b montrent l'état de saturation en eau du sol	non
Passage des Condémines	Hauteurs d'eau entre 120 et 150 cm dans les sous-sols (Figure 25c). Vraisemblablement, le bâtiment au Passage des Condémines 2 a été moins touché que ses trois "frères". Les niveaux altimétriques de l'entrée du bâtiment et des sous-sols seraient sensiblement plus haut	oui
Grand'Rue 15	Hauteur d'eau environ 50 cm	oui
Grand'Rue 33-35	Eau dans le regard au milieu de la place en enrobé pendant 2-3 jours (Figure 25d)	non



(a) Allée des Peupliers



(b) Allée des Peupliers



(c) Passage des Condémines



(d) Grand'Rue 33-35

FIGURE 25 – Photos des lieux touchés par la remontée de nappe après l'évènement du 21 juin 2019

Historique d'interventions depuis fin 2017

L'historique d'intervention des pompiers, en lien avec des remontées de nappe à Dombresson-Villiers, est le suivant ⁸ :

Passage des Condémines

Début janvier 2018 - Pompe de relevage défectueuse. Contexte de période hivernale avec pluies régulières et abondantes sur plusieurs jours en lien avec la tempête Eleanor ;

Autre - Sollicitation confirmée dans ce secteur par les sapeurs-pompiers sans pouvoir être plus précis. Vraisemblablement dans une situation d'orage avec multiples interventions et à nouveau avec un problème de pompe de relevage.

Grand'Rue 15

Mars 2020 - Pompe de relevage défectueuse. Contexte de période de pluie. Le rapport d'intervention précise une remontée d'eau dans des locaux en lien avec "la nappe phréatique" ;

Autre - Sollicitation confirmée dans ce secteur par les sapeurs-pompiers sans pouvoir être plus précis à nouveau avec un problème de pompe de relevage.

⁸. Le code couleur (rouge : intervention datée / orange : intervention non datée) sera repris dans la partie résultats (section 4.2.1)

3.4.2 Caractéristiques de la zone orientées "nappe"

Sur la Figure 26 est affiché l'atlas géologique AG25 qui fournit des renseignements détaillés sur les couches géologiques superficielles du sous-sol. Les formations géologiques sont représentées au moyen de couleurs, et de figurés en fonction de leur âge, de la nature de leurs substances et de leurs relations stratigraphiques⁹. Sur la Figure 26 sont aussi représentées les zones de protection des eaux. On discutera des captages des Prés Royer, situés à environ 1.2 km au Sud-Ouest de Dombresson plus bas.

Le fond du Val-de-Ruz est recouvert dans son intégralité par les dépôts glaciaires würmiens. Dans la partie est du Val-de-Ruz, l'unique faciès est celui d'une moraine argileuse appelée moraine de fond. A l'Ouest de la source du Torrent, une moraine latérale caillouteuse recouvre le Crétacé et le Pürbeckien. Les cônes de déjection du Torrent et du Seyon recouvrent la moraine de fond entre la Rinceure, Villiers et St-Martin [24].

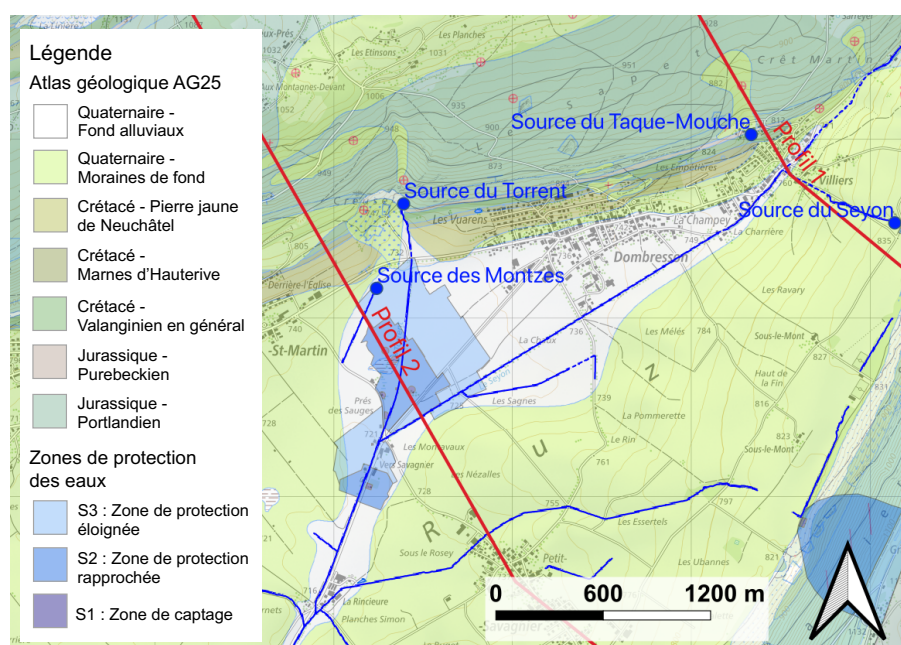


FIGURE 26 – Atlas géologique (AG25) et zones de protection des captages des Prés Royer
Sources : Service WMS swisstopo

Les deux coupes verticales (Profils 1 et 2) apparaissent sur la Figure 27. On y voit que le Val-de-Ruz est situé sur un synclinal bordé par l'anticlinal des Planches au Nord et l'anticlinal de Chaumont-Serroue au Sud. A la hauteur de Villiers, dans la partie est du Val de Ruz, se trouve un décrochement caractérisé par une orientation NS [46].

Bassins du Seyon et de la Serrière

Le village de Dombresson est situé au sein du bassin versant du Seyon. L'étendue de ce bassin est comprise dans celui de la Serrière (Figure 27). La frontière entre les deux bassins versants est majoritairement constituée par l'imperméable des Marnes d'Hauterive. Les formations plus récentes (Pierre Jaune de Neu-

9. Métadonnées de l'atlas géologique de la Suisse au 1:25000 (Office fédéral de topographie swisstopo) https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/258814a5-8fcf-47df-b0c6-160602b0078c/tab/complete, consulté le 09/12/20

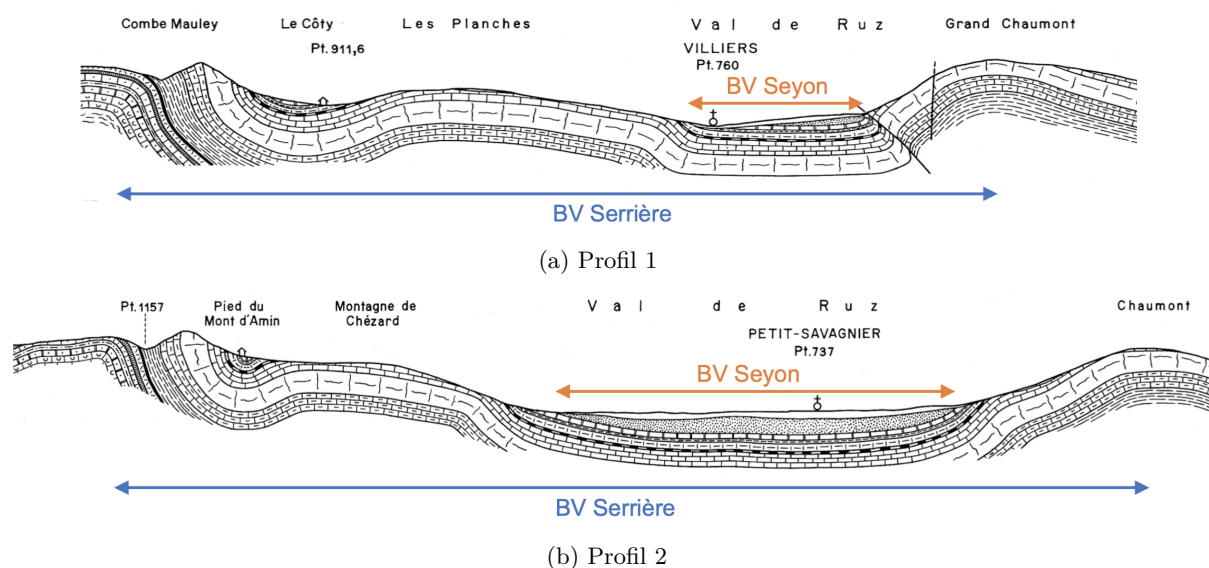


FIGURE 27 – Esquisse tectonique NW-SE du Val-de-Ruz et étendue topographique des bassins versants (BV) du Seyon et de la Serrière (profils 1 et 2 sur la Figure 26), tiré de la carte géologique du Val-de-Ruz [47]

châtel (Hauterivien supérieur), Molasse et dépôts du Quaternaire) forment le bassin versant du Seyon. Les formations plus anciennes (calcaires du Valanginien et du Malm), constituent le bassin versant de la Serrière [46]. La coupe stratigraphique peut être consultée dans l'annexe 2.

La Serrière est une source karstique qui émerge à l'est de la ville de Neuchâtel, à une distance de 600 m du lac dans lequel elle se jette. Son bassin alimentaire est formé par deux segments des deux premières chaînes anticlinales du Jura helvétique plissé (anticlinal de Chaumont et anticlinal de Mont Racine - Tête de Ran - Mont d'Amin) [24]. Les surfaces de ses bassins topographique et hydrogéologique sont respectivement $< 0.25 \text{ km}^2$ et 84.1 km^2 [48].

Le Seyon prend sa source au SE de Villiers. Historiquement, la rivière rejoignait le lac au droit de la basse ville de Neuchâtel. Elle a été détournée en 1639, suite à la construction d'un canal de 250 mètres à travers la colline du Château. La couverture du Quaternaire et du Tertiaire du synclinal du Val-de-Ruz représente le champ collecteur du Seyon. En période de crues, deux autres contributions ont été démontrées : d'une part, les eaux de la source du Torrent, située au pied de l'anticlinal des Planches (Figures 26 et 27a), qui s'active lors d'un trop plein du karst du Malm ; d'autre part, une partie des eaux qui ruissellent depuis les Combes Berthière, Mauley et Biosse (Figure 9) sur les marno-calcaires de l'Argovien et qui ne sont pas complètement absorbées vers la Serrière lors de leur passage sur les cluses calcaires [24]. Les surfaces de ses bassins topographique et hydrogéologique sont respectivement 113.5 km^2 et 43.8 km^2 [48].

En 1963, l'aire d'alimentation du bassin versant du Seyon a été réduite au profit du bassin de la Serrière par une galerie de dérivation des eaux du ruisseau du Pertuis dans le gouffre du même nom. Le ruisseau du Pertuis s'écoule dans la cluse du Pertuis et draine les Combes Berthière et Mauley. Autrefois, en cas de crue, le ruisseau enflait considérablement, inondait le synclinal du Côté et rejoignait le Ruz Chasseran. Les crues sont maintenant deversées dans le gouffre du Pertuis, qui absorbe les débits supérieurs à $1 \text{ m}^3/\text{s}$ vers le bassin de la Serrière [24].

Dans le rapport "Étude des dangers naturels liés à l'eau Secteur « Val de Ruz » et « Entre deux lacs » - Rapport phase I - Crues des cours d'eau et remontées des plans d'eau" [49], le système est décrit ainsi :

"Les bassins versants topographiques et hydrogéologiques du Seyon sont très différents. Le bassin versant hydrogéologique du Seyon varie en fonction de l'intensité des précipitations. Lorsque les couches perméables du bassin versant de la Serrière sont saturées, des résurgences en surface sont constatées sur le Ruz Chasseran et le Torrent. Ainsi, suivant le taux de saturation du sous-sol, le bassin versant de la Serrière participe à l'apport d'eau de surface dans le bassin versant du Seyon."

Dans ce même rapport, on a émis l'hypothèse que lorsque la source de la Serrière atteint un débit de $11 \text{ m}^3/\text{s}$, le bassin versant est saturé et l'eau excédentaire s'écoule dans le bassin versant du Seyon. Dans ce cas, les limites contributives du bassin du Seyon sont données par la topographie. Cette hypothèse est basée sur une analyse des débits de la Serrière entre 1982 et 1990, qui a montré un débit maximum d'environ $11 \text{ m}^3/\text{s}$.

Région des Prés Royer

Mathey [24] indique la présence de quatre formations aquifères séparées dans la région des Prés Royer :

- les graviers et sables fluvioglaciers et alluviaux des cônes de déjection du Seyon et du Torrent (3 à 13 mètres d'épaisseur), qui contiennent une **nappe phréatique** ;
- les graviers intercalés (entre 21 et 33 mètres de profondeur) en 2 ou 3 niveaux dans la moraine argileuse, qui contiennent une **nappe artésienne**. La nature géologique de ces formations n'est pas connue (fluvioglacière, moraine intraglacière, interglacière ?) ;
- les calcaires hauteriviens (Crétacé) ;
- le Malm et Valanginien.

Les couches imperméables qui les séparent sont de haut en bas : la moraine de fond argileuse, la molasse oligocène, les marnes hauteriviennes [24].

D'importants échanges hydrauliques ont été mis en évidence entre le Malm, le Crétacé et le Quaternaire dans la région des Prés Royer [24]. Ceux-ci apparaissent sur la Figure 28 et sont expliqués ci-après.

La zone alimentaire de la **nappe phréatique** inclut les formations alluviales et fluvioglaciers qui couvrent environ 1.8 km^2 entre Villiers, la Scierie Debrot et la source du Torrent et une partie des formations morainiques peu perméables qui les bordent. Les apports de la nappe artésienne et du Crétacé contribuent aussi à la recharge. Finalement, les cours d'eau du Seyon et du Torrent, canalisés avec des pierres sèches, permettent la décharge naturelle de la nappe et sa recharge en période de crue [24].

Dans la thèse de Mathey, on peut lire que la conductivité hydraulique des graviers superficiels est comprise entre $5 \cdot 10^{-3}$ et $5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ [24]. Lors de l'étude pour la délimitation des zones de protection des puits dans la nappe libre aux Prés Royer [50], les valeurs moyennes de conductivité hydraulique et de transmissivité obtenues par essais de pompage sont respectivement $3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ et $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

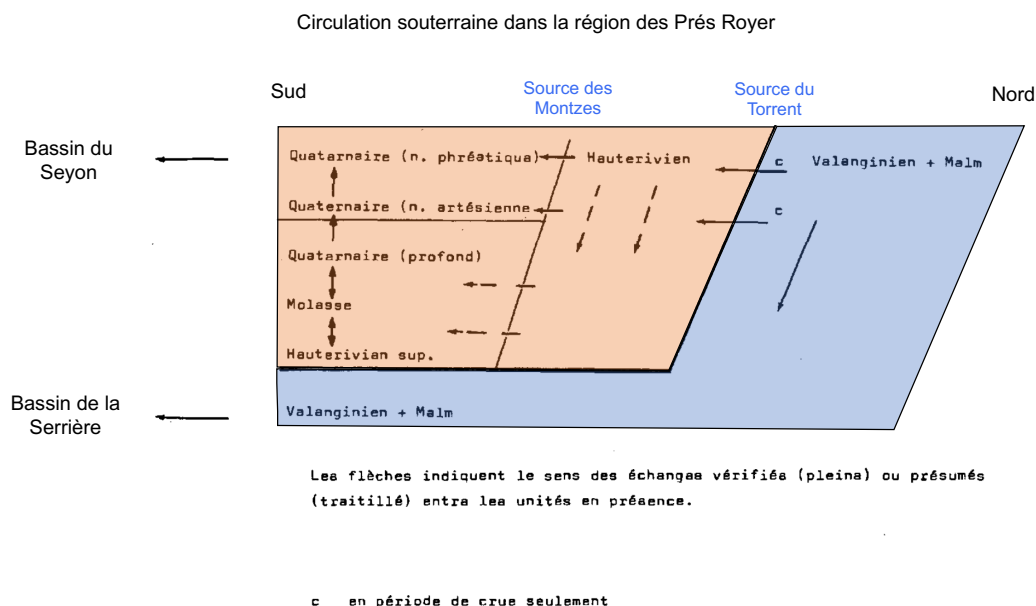


FIGURE 28 – Circulation souterraine dans la région des Prés Royer (adapté à partir de la thèse de Bernard Mathey [24])

L'extension et la géométrie de la **nappe artésienne** restent mal connues. En absence d'exploitation, elle est alimentée par les calcaires hauteriviens et se décharge par drainance au travers de la moraine peu perméable dans la nappe phréatique [24].

Entre Chézard et Villiers, la surface alimentaire des **calcaires hauteriviens** a été estimée à 0,5-0,8 km². En période de crue, l'hauteurivien se décharge à travers la *source des Montzes*. Cette source temporaire provoque des venues d'eau dispersées dans les champs au sud de la route Chézard - Dombresson de part et d'autre du Torrent [24].

En cas de crue exceptionnelle, la mise en charge de l'aquifère du **Malm et Valanginien** provoque la résurgence d'un grand nombre de venues karstiques telles que [24] :

- *source du Torrent* : source temporaire qui jaillit rarement plus d'une fois par an et quelques jours uniquement. Elle correspond à la saturation du réseau du Malm au delà de 750 m d'altitude. La source s'active vraisemblablement lorsque le débit de la Serrières dépasse 7 à 8 m³/s ;
- *source du Taque-Mouche* : source temporaire qui jaillit tous les 20 à 30 ans des calcaires du Valanginien, au NW de Villiers. Son débit ne dépasse pas quelques dizaines de litres par seconde ;
- *sources du Chenau* : série de sources de débordement qui jaillissent lors de crues exceptionnelles sur le Pürbeckien au nord de la route cantonale au-dessus de Villiers. Ensemble, leur débit atteint quelques mètres cubes par minute.

Captages des Prés Royer

Les captages des Prés Royer s'alimentent dans la nappe libre supérieure ainsi que dans la nappe captive inférieure (nappe artésienne selon Mathey [24]). Dans la nappe libre, on dénombre six puits : Swissboring,

Cernier, Chézard St-Martin 1 et 2, Dombresson [51] et Savagnier [50]. Ce dernier est hors-service [48]. Deux puits (Bertrand et Mornod) descendent plus profondément pour atteindre la nappe captive [52]. La Figure 29 indique la position des différents puits. Les étendues des zones de protection des captages apparaissent sur la Figure 26.

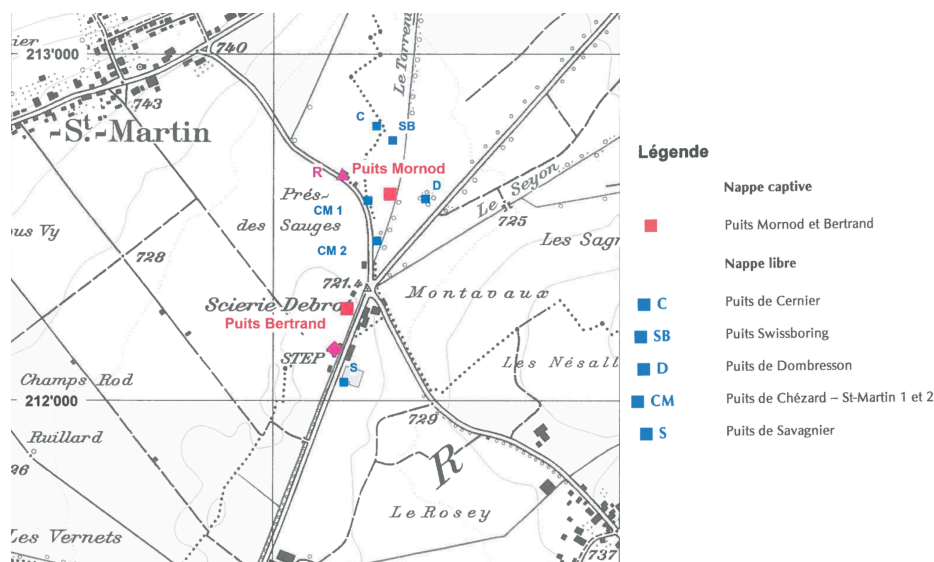


FIGURE 29 – Position des captages des Près Royer [52]

Les informations sur la gestion des captages lors de l'évènement du 21 juin 2019 et les données de fluctuation des nappes libre et captive (présentées dans la partie résultats) ont été obtenues par l'intermédiaire de Monsieur Christian Rochat, responsable production eau chez Viteos. Par ailleurs, une rencontre avec Monsieur Olivier Kessler a eu lieu le 10 novembre 2020 aux Près Royer afin de prendre connaissance des données disponibles et de comprendre leur signification. Cette visite aura notamment permis de constater la grande similarité des valeurs mesurées dans tous les puits qui s'alimentent dans la même nappe. Seules les données du puits Dombresson et du puits Mornod ont alors été récupérées.

L'exploitation des captages des Près Royer (Cernier, Fontainemelon, Chézard et Dombresson dans la nappe libre, ainsi que Mornod et Bertrand dans la nappe captive) a été interrompue le 22 juin 2019 au matin, suite à une alarme faisant état de problèmes liés à la chloration de l'eau. En raison de l'impossibilité d'exclure complètement un risque de contamination du réseau, les habitants des villages de Dombresson et Villiers ont alors été invités à bouillir l'eau avant de la consommer. Cette recommandation a été levée le 26 juin, après le retour à la normale de l'exploitation et les résultats d'analyses faites dans le réseau.

Sur la Figure 30 sont représentées les valeurs mesurées dans les puits Dombresson et Mornod avant, pendant et après l'évènement du 21 juin 2019. On peut y voir très distinctement les moments des arrêts et reprises du pompage ainsi que la hausse du niveau des nappes engendrée par l'évènement. Même si les valeurs mesurées ne correspondent pas à des niveaux piézométriques, elles donnent des informations sur les hauteurs relatives et ainsi les fluctuations du niveau des nappes. Ces données ont servi à déterminer que l'évènement du 21 juin 2019 a mené à un exhaussement des niveaux des nappes suivant :

- nappe libre : $\approx 0.8m$
- nappe captive : $\approx 1m$

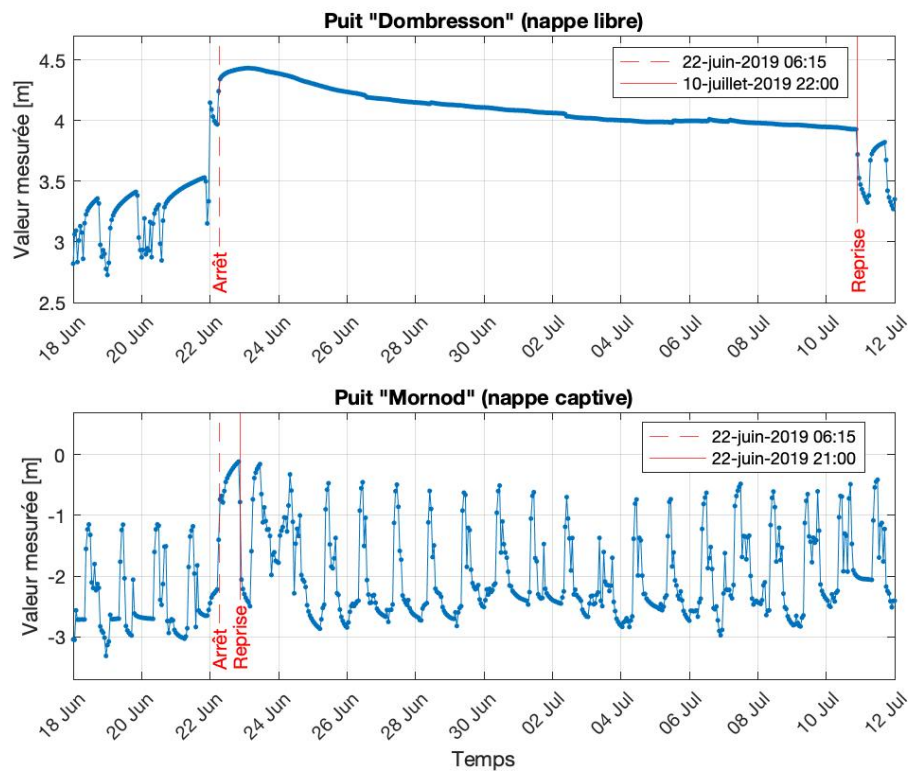


FIGURE 30 – Fluctuations des nappes libre et captive aux Prés Royer entre le 18 juin et le 12 juillet 2019 (hauteurs relatives, référence inconnue)

Forages à Dombresson-Villiers

Sur la Figure 31 sont affichées les positions des forages réalisés dans divers contextes tels que la mise en place de pompes à chaleur (PAC) ou l'investigation de sites pollués. La position des forages et leur log ont été obtenus auprès du Service de la géomatique et du registre foncier (département du développement territorial et de l'environnement).

Les forages les plus proches du quartier du Passage des Condémines et de l'Allée des Peupliers, sont les forages "sites pollués" de CODEC SA. Ce sont des forages effectués à l'aide de carottiers simples jusqu'à 15 m de profondeur. Ceux-ci montrent, dans les grandes lignes, une couche de graviers jusqu'à 5 mètres de profondeur ($\approx 729 \text{ m.s.m}$) puis une couche de limons jusqu'au fond des forages. Les venues d'eau ont été mesurées à 3-4 m de profondeur en juillet 2015 ($\approx 730.5 \text{ m.s.m}$). Malheureusement, ces forages ne font pas l'objet de suivi et ne sont plus accessibles¹⁰.

Au Nord de Dombresson, il existe quatre forages "pompe à chaleur" de 60 à 150 m de profondeur. Quatre autres forages du même genre ont aussi été réalisés au Nord de Villiers. Ces forages sont de type destructifs et ne donnent dès lors pas des informations suffisamment fiables et précises pour être exploitées dans le cadre de cette étude.

Dans la zone de la Champey, deux forages ont été réalisés à l'aide d'un marteau fond de trou. L'interprétation des logs de forage indique l'existence d'une couche susceptible de contenir une nappe captive comme cela a été décrit aux Prés Royer.

10. Information délivrée par CODEC SA

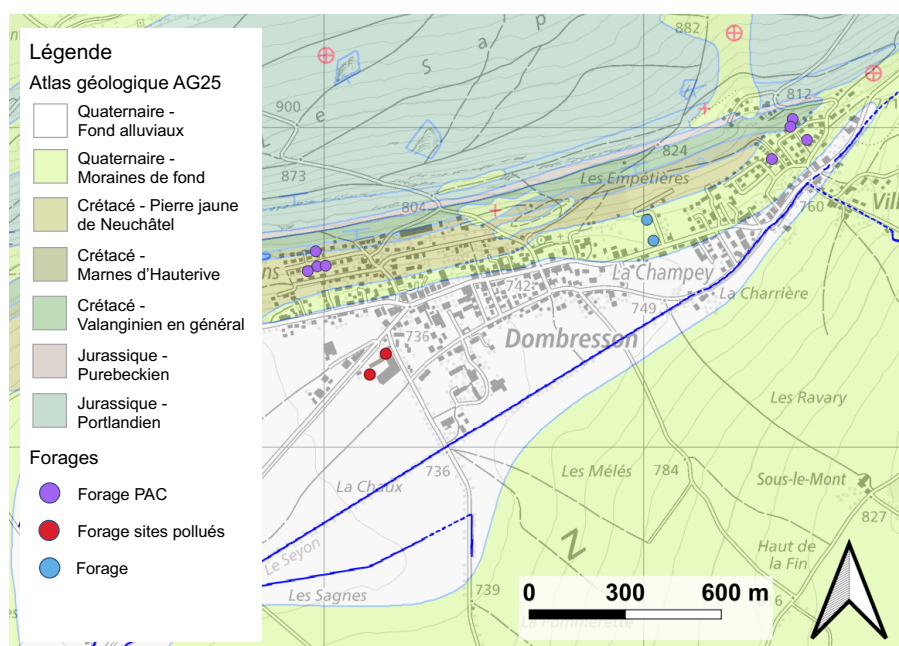


FIGURE 31 – Position des forages à Villiers-Dombresson
Fond de plan : Service WMS swisstopo

On terminera ici par noter que la couche imperméable sous-jacente aux alluvions récentes a été interprétée comme du glaciolacustre (non pas comme de la moraine de fond argileuse [24]) sur les logs de forages effectués en aval de Dombresson (La Rincieure, ancienne STEP).

3.4.3 Hypothèses sur les causes de la remontée de nappe du 21 juin 2019

Les informations connues appellent aux questions suivantes :

- Existe-t-il, à Dombresson, une nappe captive comme dans la région des Prés Royer ? Si elle existe, quelle est sa géométrie et est-elle liée hydrauliquement à la nappe libre sus-jacente ? et à la nappe captive des Prés Royer ?
- Lesquels des processus de recharge suivants se sont produits et ont dès lors contribué à l'exhaussement de la nappe libre ?
 1. l'infiltration des précipitations tombées sur la zone alimentaire de l'aquifère (formations alluviales et fluvioglaciaires et formations morainiques peu perméables qui les bordent) ;
 2. les apports souterrains via une nappe captive sous-jacente ;
 3. les apports souterrains de l'aquifère Hauterivien ;
 4. l'infiltration des apports causés par le ruissellement d'un trop-plein de l'aquifère Hauterivien ;
 5. l'infiltration des apports causés par le ruissellement d'un trop-plein de l'aquifère Malm-Valanginien ;
 6. l'infiltration des eaux de la crue via le lit du Seyon ;
 7. l'infiltration en surface des eaux débordées des Seyon et Ruz Chasseran.
- Lequel/Lesquels des processus précités a/ont contribué majoritairement ?

3.4.4 Analyse des fluctuations de nappe aux Prés Royer

L'analyse des fluctuations du niveau des nappes aux Prés Royer est pertinente étant donné que l'unité géologique aquifère qui contient la nappe libre s'étend jusqu'à Dombresson et que c'est aussi potentiellement le cas pour la nappe captive.

Les fluctuations à "long" terme (fin 2018-fin 2020) ont été mises en relation avec les précipitations, les débits de la source de la Serrière et l'historique d'interventions des pompiers à Dombresson.

Lien avec les précipitations

La station météorologique de Dombresson serait la mieux située pour être représentative de la recharge directe de la nappe par infiltration des pluies. Malheureusement, des données sont manquantes, notamment en janvier 2018 et mars 2020. Dès lors, les données utilisées sont celles de la station météo de Chaumont. Cette station se trouve à la frontière du bassin de la Serrière (Figure 22). Elle n'est donc pas comprise dans le bassin du Seyon mais elle est la plus à proximité du fond du vallon du Val-de-Ruz.

Lien avec les débits de la source de la Serrière

Il est établi que l'aquifère de la Serrière alimente le bassin du Seyon dans certaines conditions hydrologiques. Selon le groupement GEDANA, chargé de la cartographie des dangers liés à l'eau, c'est le cas quand le débit de la Serrière est supérieur à $11 \text{ m}^3/\text{s}$ [49]. Mathey a, quant à lui, établi que la source du Torrent s'active quand le débit de la Serrière est plus grand que 7 à $8 \text{ m}^3/\text{s}$ [24].

3.4.5 Méthodes d'investigation géologique et hydrogéologique

Afin de compléter le panorama des connaissances dans le village de Dombresson, où se sont manifestées les remontées de nappe, un travail de terrain a été planifié. Ce travail vise à déterminer quelles sont les interactions entre la nappe libre et le Seyon, à quel niveau se situe le toit de la nappe libre et à établir ou non la présence d'une nappe captive. Il a été effectué en collaboration avec Monsieur Giona Preisig, maître-assistant au CHYN.

Le travail de terrain s'est déroulé en deux temps. Les 17 et 18 novembre 2020, les travaux suivants ont été effectués :

- mise en place de trois piézomètres (PD1, PD2, PD3) dans le village de Dombresson ainsi qu'un tube (Piézo Seyon) dans le lit du Seyon (Figure 32). Les trous de forages ont été réalisés à l'aide d'une tarière mécanique et ont été munis de tubes en plastique, en partie crépinés, de diamètre $1' (2.54 \text{ cm})$;
- levée des coordonnées x y et de l'altitude du sommet des tubes avec un GPS différentiel ;
- essais d'infiltration dans les trois piézomètres PD1, PD2 et PD3. Plusieurs litres d'eau ont été versés dans les tubes piézométriques. La descente de l'eau a été enregistrée par des sondes de pression avec un pas de une ou deux secondes ;
- programmation et installation des sondes de pression/température (PD1 et PD2, Piézo Seyon) et de la sonde de pression/température/conductivité électrique (PD3) avec un pas de temps de 10 minutes ;

- programmation et installation d'une sonde de pression atmosphérique/ température au droit du Piézo Seyon avec un pas de temps identique ;
- jaugeage au sel dans le Seyon à proximité de Piézo Seyon. Un conductimètre, placé dans le cours d'eau, a mesuré le changement de conductivité électrique causé par l'ajout d'une masse de sel connue (ici NaCl), une dizaine de mètres en amont de l'appareil de mesure ;

Le 10 décembre 2020, une autre série de travaux a été réalisée :

- levée des données enregistrées par les sondes, reprogrammation et réinstallation de celles-ci ;
- essais de pompage dans les trois piézomètres PD1, PD2 et PD3. Avec une pompe péristaltique, le niveau d'eau a été abaissé dans les tubes piézométriques en pompant à débit constant ;
- deux profils de prospection géophysique par méthode électrique (Figure 32). L'agencement de capteurs et d'électrodes utilisé est celui de Wenner Schlumberger. Le profil 1 mesure 108 mètres et est composé de 36 électrodes distants de 3 mètres. Le profil 2 mesure 162 mètres et est composé de 54 électrodes distants de 3 mètres ;
- levée des coordonnées x y en plusieurs points des profils avec le GPS d'un smartphone ;
- nouveau jaugeage au sel dans le Seyon.

La Figure 32 indique l'emplacement des piézomètres et des profils géoélectriques. Les photos du travail de terrain peuvent, quant à elles, être consultées dans l'annexe 4 tout comme les coordonnées des profils géoélectriques et les logs de forage des piézomètres.

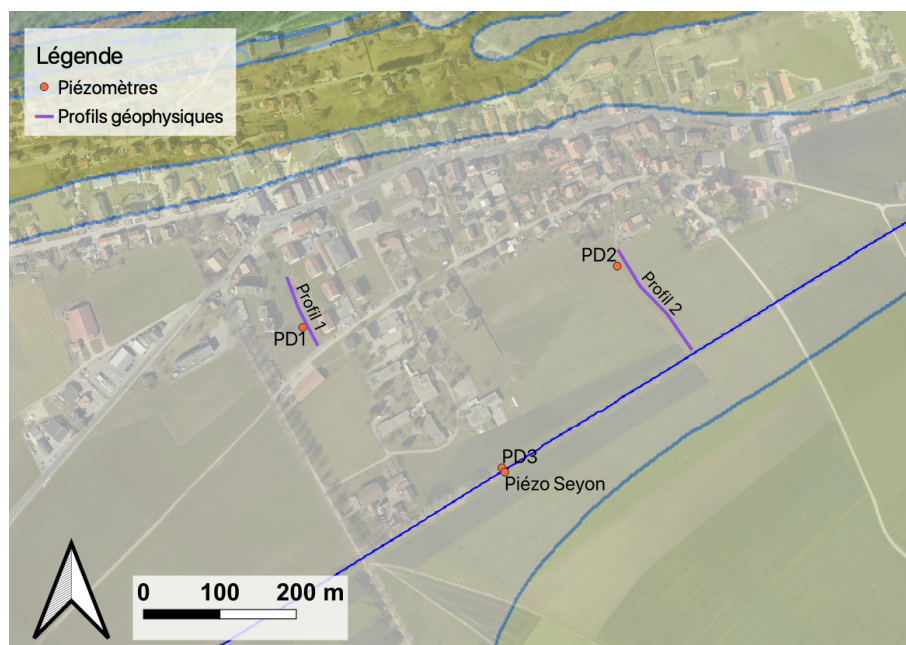


FIGURE 32 – Position des piézomètres installés et des profils géophysiques réalisés dans le cadre de l'étude

Traitement des données

Les **jaugeages au sel** renseignent sur le débit du cours d'eau. Le débit est calculé à partir des mesures du conductimètre avec l'équation 5. Celle-ci exprime le rapport entre la masse de sel injectée et la masse restituée (intégrale sous la courbe). Le facteur 0.5 vient du fait que 1 g/m^3 de NaCl induit une augmentation de la conductivité électrique d'environ 2 $\mu S/cm$. On considère généralement que l'erreur sur les résultats est de $\pm 10\%$.

$$Q = \frac{M}{0.5 \int_{t=0}^t (EC - EC_{eau}) dt} \quad (5)$$

- Q : Débit du cours d'eau [m^3/s]
- M : Masse de NaCl injectée [g]
- EC : Conductivité électrique mesurée par le conductimètre [$\mu S/cm$]
- EC_{eau} : Conductivité électrique de l'eau à l'état naturel [$\mu S/cm$]
- t : Temps [s]

Les **essais d'infiltration et de pompage** ont été conduits dans le but d'obtenir une estimation de la conductivité hydraulique. On trouve, dans la littérature, des formules permettant d'estimer ce paramètre dans diverses configurations (exemple : Dupuit). Il n'existe vraisemblablement pas de formule adaptée à la configuration crépinée de nos tubes. Ces essais permettent aussi de contrôler si les tubes fonctionnent correctement.

Les **sondes de pression**, insérées dans les tubes piézométriques, renseignent sur le niveau du toit de la nappe. Ces sondes mesurent la pression totale, composée d'une part de la pression atmosphérique, et d'autre part, de la pression de la colonne d'eau au dessus de la sonde. La conversion, décrite par l'équation 6, est donc nécessaire pour obtenir des niveaux altimétriques. Le niveau d'eau, mesuré manuellement depuis le sommet du tube (dont on connaît l'altitude) au moment de l'installation d'une sonde, est particulièrement important. C'est aussi le cas pour la mesure effectuée au moment de la récolte des données. Celle-ci permet de contrôler si la sonde est sujette à une dérive.

$$H_{abs}(t) = Ref - \underbrace{10(P(t=0) - P_{atm}(t=0))}_{H(t=0)} + \underbrace{10(P(t) - P_{atm}(t))}_{H(t)} \quad (6)$$

- H_{abs} : Niveau altimétrique [$m.s.m$]
- H : Hauteur d'eau au dessus de la sonde [m]
- Ref : Niveau altimétrique de référence, mesuré manuellement au temps $t=0$ [$m.s.m$]
- P : Pression mesurée dans le piézomètre [bar]
- P_{atm} : Pression atmosphérique [bar]

Les **tomographies de résistivité électrique** permettent de déterminer la répartition des matériaux dans le sous-sol par l'intermédiaire de leur résistivité. Cette méthode consiste à envoyer un courant continu dans le sous-sol à travers deux électrodes et mesurer la tension générée par celui-ci entre deux capteurs [53]. À partir de cette différence de potentiel, est dressé un profil des résistivités apparentes du sous-sol. Les résultats bruts de la tomographie, c'est à dire les résistivités apparentes, nécessitent d'être traités. Le traitement consiste, en premier lieu, à nettoyer les données en éliminant les mesures aberrantes

(outliers). En deuxième lieu, on procède à "l'inversion", qui doit être effectuée car les mesures apparentes intègrent les résistivités d'un certain volume du sous-sol. L'inversion permet de retrouver les épaisseurs et résistivités des différents corps présents. Celle-ci est réalisée par un logiciel qui élabore un modèle qui est amélioré, de manière itérative, en comparant le résultat des résistivités apparentes calculées par résolution du problème direct avec les résistivités apparentes mesurées. Le processus est répété jusqu'à ce que l'erreur ne diminue plus de manière significative. Les résistivités réelles, modélisées pour le sous-sol, permettant une bonne coïncidence entre les valeurs apparentes mesurées et calculées, sont retenues. [54]

L'interprétation géologique des tomographies a été réalisée avec l'aide de Giona Preisig. Elle repose sur les logs de forage de Codec, sur les connaissances géologiques générales de la zone et sur les valeurs de la littérature. On peut définir les classes de résistivité suivantes :

- Argiles limoneuses : 10 – 100 [Ohm.m]
- Moraine : 100 – 570 [Ohm.m]
- Alluvions graveleuses-sableuses : 150-2'000 [Ohm.m]

3.4.6 Reconstitution de l'évènement du 21 juin 2019

D'une part, les niveaux atteints par la nappe ont été reconstitués par combinaison des hauteurs d'eau dans les sous-sols et des niveaux absolus des sous-sols des bâtiments. Ces données proviennent respectivement des pompiers et de la commune du Val-de-Ruz, où ont été consultés les plans des bâtiments. Ceux-ci nous ont renseignés sur la hauteur absolue des sous-sols des immeubles au Passage des Condémines 1 et 3 (et 4 par analogie avec le 3). Les plans du Passage des Condémines n'ont pas pu être consultés. Les plans de l'Allée des Peupliers 2/2a et 4/4a nous ont informés sur la profondeur des sous-sols. Le niveau altimétrique a ensuite été déduit du niveau du terrain avoisinant donné par le MNT 2016 ;

D'autre part, la formule qui donne l'exhaussement d'une nappe, Δh [m], causé par l'infiltration d'un certain volume d'eau (Eq 7, [15]) a été utilisée pour tenter de déterminer la contribution des précipitations locales dans la remontée du 21 juin 2019.

$$\Delta h = \frac{V}{SA} [m] \quad (7)$$

V : Volume d'eau infiltré [m^3]

S : Coefficient d'emménagement [-]

A : Surface de l'aquifère [m^2]

4 Résultats

4.1 Ruissellement

4.1.1 Quantification du ruissellement

Les deux produits de la méthode SCS-CN sont affichés en Figures 33 et 34. La Table 17 a été complétée à partir de ces résultats.

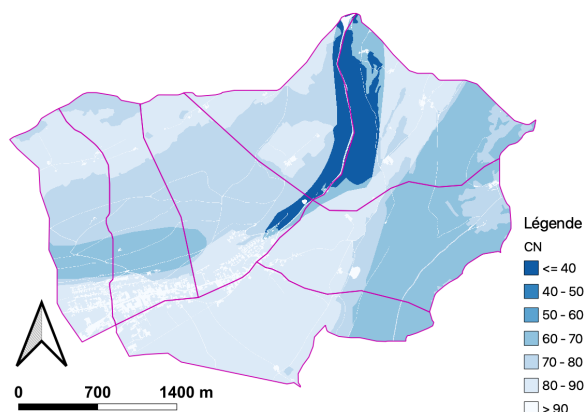


FIGURE 33 – Curve Number

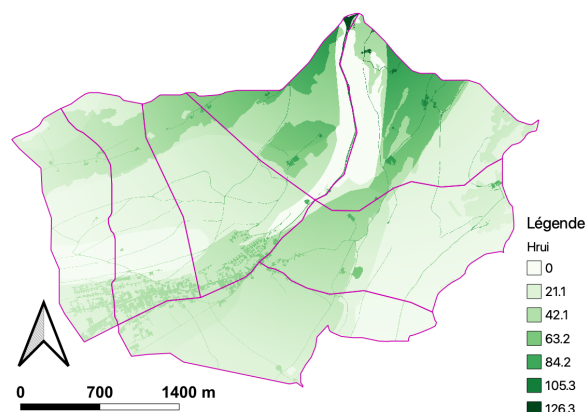


FIGURE 34 – Ruissellement du 21 juin 2019

Bassins versants	Superficie [km^2]	Curve Number moyen [-]	Lame d'eau ruissellée moyenne [mm]	Volume d'eau ruisselé [m^3]
Clémesin amont	1,58	67	36.0	56'752
Villiers amont	1,03	74	47.6	49'145
Clémesin aval	1,64	72	22.9	37'505
Villiers nord	1,37	78	29.9	41'061
Dombresson sud	1,51	84	22.9	34'548
Dombresson nord	1,14	79	21.4	24'304
Dombresson nord (Torrent)	1,02	80	16.8	17'162

TABLE 17 – Résultats de la méthode SCS-CN dans les sous-bassins du périmètre d'étude

Pour rappel, les résultats de la méthode SCS-CN renseignent sur deux aspects que sont l'aptitude générale au ruissellement, et la hauteur d'eau précipitée le 21 juin 2019, qui n'a pas pu s'infiltrer et se sera écoulée en surface :

- l'aptitude au ruissellement dépend des paramètres physiographiques des zones ; ces derniers ont été combinés au sein de la variable "CN". Ceci est valable avant de réaliser l'ajustement qui prend en considération les conditions préalables (précipitations antérieures). En l'occurrence, aucun ajustement n'a été réalisé ici. (Figure 33)
- le ruissellement de surface, lors d'un événement précis, dépend des facteurs physiographiques et climatiques. Cette information est donnée par la combinaison de l'aptitude au ruissellement (CN) et des précipitations. (Figure 34)

La Table 17 conduit aux constats suivants :

- les bassins qui possèdent les CN les plus faibles sont ceux qui bordent Villiers et Dombresson (partie aval de la zone d'étude) ;
- la tendance inverse est constatée pour les lames d'eau ruissellées moyennes le 21 juin 2019. C'est ici les bassins Clémesin amont et Villiers amont qui possèdent les valeurs les plus élevées ;

Sur la Figure 33, sont observés les effets suivants :

- les bassins en rives gauche du Ruz Chasseran sont caractérisés par de forts CN dans leur partie aval et de faibles CN dans leur partie amont ;
- la tendance inverse est observée en rive droite ;
- la bande à la jonction entre les bassins de Clémesin amont et Villiers est caractérisée par de très faibles CN, traduisant une infiltration complète des précipitations.

4.1.2 Enquête de terrain

La sortie de terrain a permis de recueillir divers témoignages. En revanche, aucune trace de l'évènement n'a été remarquée. Les cartes d'aléa des zones visitées ainsi que les photos peuvent être consultées en annexe 3.

Dans la zone à cheval sur les deux sous-bassins de Dombresson nord, quatre personnes ont été interrogées. Aucune d'entre elles n'avait subi de dommages. Les divers témoins ont fait état de cailloux sur la route au lendemain du 21 juin 2019 et d'une pluie particulièrement intense et longue. La route "Les Crêts" qui descend en bordure de forêt conduisait vraisemblablement quelques cm d'eau. Sur la *photo 2*, on observe effectivement un dévers du côté de la forêt, ce qui laisse penser que cela doit être un chenal d'écoulement lors de fortes pluies. Ceci ne figure pas sur la carte d'aléa. Sur la *photo 1*, on constate un dévers en direction de la maison ayant subi un sinistre. Ceci apparaît sur la carte d'aléa.

Dans la zone de Villiers aval, les trois groupes de témoins interrogés n'avaient pas non plus été sinistrés. Personne n'a fait état de la veine d'écoulement très importante qui apparaît sur la carte d'aléa au centre de la zone visitée (*photo 3*). Un témoin a mentionné que les chemins de la forêt en amont avaient été creusés. Un autre n'avait rien remarqué (crue dans le centre du village / ruissellement particulier) jusqu'au lendemain, mais il a mentionné que ses voisins avaient eu de l'eau dans leur cave (env 5 cm). Finalement, un couple de témoins a expliqué n'avoir subi aucun dommage en raison de la configuration de leur maison ; l'eau débordait depuis les chenaux à cause de la capacité insuffisante du système d'évacuation des eaux pluviales mais ne s'écoulait pas à l'intérieur grâce, par exemple, à des seuils surélevés.

Dans la zone de Clémesin aval, un témoignage a été recueilli à la route de Clémesin. Les témoins interrogés ont bénéficié d'une indemnisation de l'ECAP mais n'étaient pas présents lors de l'évènement. La caméra de surveillance de leur place de parc a enregistré des images vidéo qui montraient vraisemblablement un fort écoulement sur la route de Clémesin (*photo 4*). Ceci apparaît en rose clair sur la carte d'aléa. Ceux-ci ont toutefois décrit que les dommages n'avaient pas été causés par cet écoulement mais par la capacité insuffisante des chenaux. La vidéo n'a pas pu nous être transmise.

Dans la zone de Clémesin amont, le témoignage d'un agriculteur sinistré a été recueilli. Celui-ci a subi de gros dommages lors de l'évènement du 21 juin 2019. Il a rapporté que l'eau en provenance de l'amont avait coulé entre les deux routes qui se séparent juste en dessus de sa ferme. Cela apparaît en rose clair sur la carte d'aléa. Il a, depuis lors, réalisé un modelé de terrain afin que l'eau emprunte les routes et ne descende plus en ligne droite en direction de sa propriété (*photos 5 et 6*).

La répartition spatiale des pluies et donc du phénomène de ruissellement, croissant du nord-est au sud-ouest, est bien ressorti lors de l'enquête de terrain. Il a aussi été constaté que le débordement sans précédent du Ruz Chasseran a mené à une relativisation, voire à une éclipse, par les habitants, du phénomène de ruissellement sur les versants ainsi que de ses dommages associés. En effet, la population interrogée a souvent parlé spontanément de la crue lorsque le sujet de l'évènement du 21 juin 2019 était abordé. Finalement, certains dommages se sont avérés ne pas avoir été causés par les eaux de ruissellement de surface mais simplement par les eaux météoriques précipitées directement sur le bâtiment.

4.1.3 Évaluation quantitative de la carte de l'aléa ruissellement

La Table 18 recense le nombre de sinistres "ruissellement" dans chaque bassin versant et leur répartition au sein des classes de hauteur d'eau, représentées au moyen de couleurs sur la carte d'aléa. Elle a été complétée en examinant visuellement la présence de l'aléa le plus fort dans un périmètre de 6 mètres autour des bâtiments concernés par une indemnisation de l'ECAP. Ceci a été réalisé dans le but de s'assurer de la similarité des résultats avec ceux obtenus via le logiciel QGIS.





Site	Nombre de sinistres	Couleur sur la carte d'aléa			
					
Villiers amont	1	1	0	0	0
Clémesin amont	6	5	0	1	0
Dombresson sud	1	1	0	0	0
Dombresson nord (Torrent)	10	6	3	1	0
Dombresson nord	5	2	0	3	0
Villiers nord	19	6	6	6	1
Clémesin aval	10	3	3	4	0
Total	52	24	12	15	1
Part [%]	100	46.2	23.1	28.8	1.9

TABLE 18 – Répartition des sinistres du 21 juin 2019 entre sous-bassins versants et hauteurs représentées au moyen de couleurs sur la carte d'aléa

La quasi totalité des bâtiments sinistrés ont une partie en aléa dans une zone de 6 mètres autour d'eux. Presque la moitié sont en aléa fort.

Les deux zones d'évaluation définies (tampon de 3 ou 6 m autour des bâtiments), les deux niveaux de danger sélectionnés (aléa violet seul ou aléa rose foncé et violet) et les deux sets de proxy (historique complet ou évènement du 21 juin 2019 seul) ont mené aux résultats affichés en Table 19. La Figure 35 est un extrait des résultats obtenus dans la zone de Villiers nord.

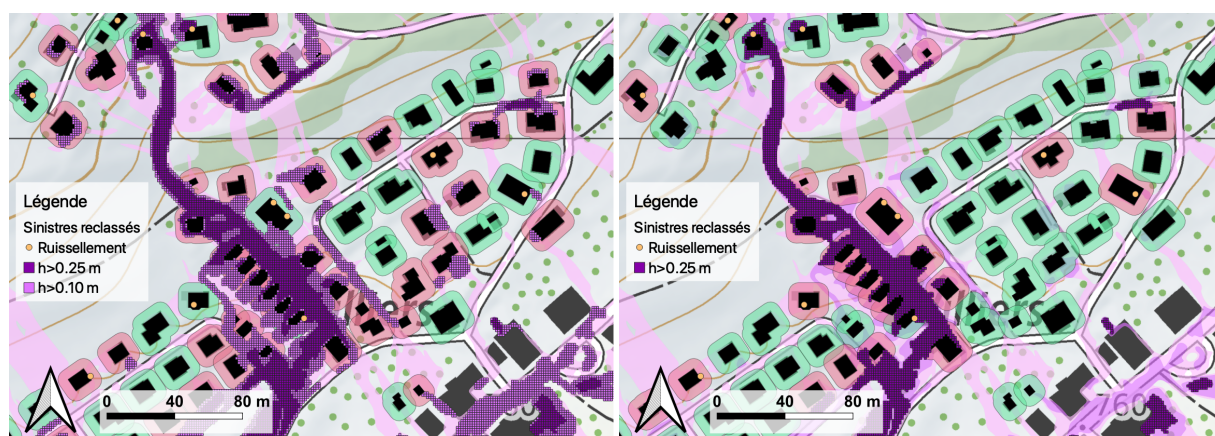


FIGURE 35 – Extrait des résultats obtenus (Villiers nord) avec les paramètres suivants : zone tampon de 6 m, sinistres du 21.06.19 seulement, $h > 0.10$ m à gauche et $h > 0.25$ m à droite.

Fond de plan : Service WMS swisstopo

Sinistres ECAP	21.06.19 seulement		historique complet			
	$h > 0.1$	$h > 0.25$	$h > 0.1$	$h > 0.25$	$h > 0.1$	$h > 0.25$
Aléa (hauteur d'eau en [m])	$h > 0.1$	$h > 0.25$	$h > 0.1$	$h > 0.25$	$h > 0.1$	$h > 0.25$
Taille tampon [m]	6	6	6	6	3	3
Nombre de "hits"	40	25	50	28	48	28
Nombre de fausses alarmes	243	124	233	121	228	102
Nombre de vrais négatifs	123	242	119	231	124	250
Nombre de "misses"	12	27	16	38	18	38
Probabilité de détection : POD (%)	77 (69)	48 (46)	76	42	73	42
Ratio de fausses alarmes : FAR (%)	86	85	82	81	83	78
χ^2	2.3	4.0	2.3	1.6	1.6	4.7
$P(\chi^2)$	10-25%	2.5-5%	10-25%	10-25%	10-25%	2.5-5%

TABLE 19 – Critères de performance évaluant le pouvoir prédictif de la carte de l'aléa ruissellement dans l'identification des zones présentant un risque avéré en utilisant diverses combinaisons

Les colonnes 2 et 3 permettent de comparer l'évaluation visuelle avec l'application de la méthode d'évaluation quantitative. La probabilité de détection issue de l'évaluation visuelle figure entre parenthèses dans la Table.

La Table 19 appelle aux constats suivants :

- il existe de légères divergences entre les résultats de l'évaluation visuelle et ceux de l'application de la méthode d'évaluation quantitative réalisée dans QGIS ;
- le taux de fausses alarmes est particulièrement élevé, peu importe la combinaison ;
- le test du χ^2 révèle que, peu importe la combinaison, aucun des résultats ne peut être considéré comme significativement différent d'une distribution théorique en toute indépendance des aléas et des sinistres ;
- le taux de détection des sinistres avoisine les 45% si seul le danger engendré par les hauteurs d'eau supérieures à 25 cm est pris en considération ; il avoisine 75% quand les hauteurs d'eau de plus de 10 cm sont observées ;
- la prise en considération de l'évènement du 21 juin seul ou de l'historique complet donnent des résultats très comparables ;
- la diminution de la taille de la zone tampon autour des bâtiments ne conduit pas à une baisse drastique du POD, ni même à une augmentation du FAR.

4.2 Remontée de nappe

4.2.1 Fluctuations de nappe aux Prés Royer

Les valeurs mesurées dans les deux mêmes puits, Dombresson et Mornod, entre fin 2018 et fin 2020 sont représentées sur la Figure 36. Des indications ont été rajoutées là où des phénomènes de remontée de nappe ont été avérés à Dombresson (rouge) ou bien quand on peut suspecter qu'ont eu lieu les autres interventions qui nous ont été rapportées par les pompiers (orange).

Les variations à court terme, caractérisées par une faible amplitude, sont induites par le pompage. La mise en marche des pompes provoque une baisse rapide du niveau d'eau et l'arrêt des pompes produit l'effet inverse. Le niveau tend alors vers celui de la nappe au repos. Les variations à long terme renseignent, quant à elles, sur le battement de la nappe et l'existence d'éventuels cycles annuels.

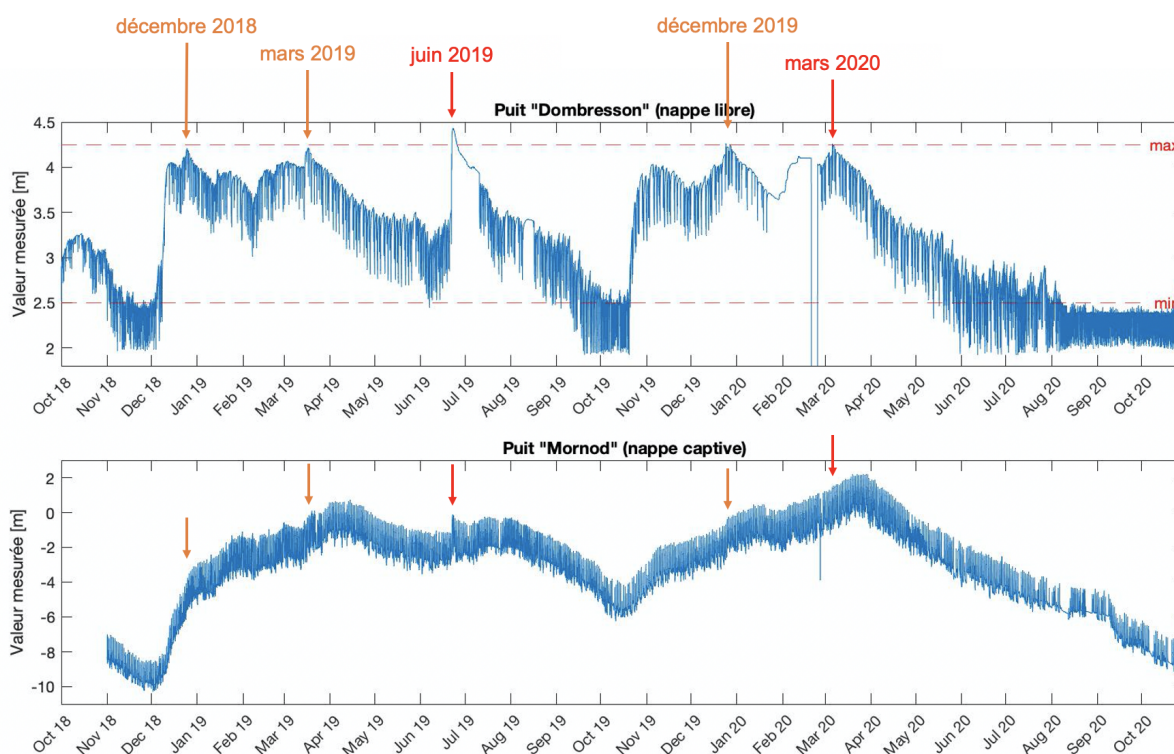


FIGURE 36 – Fluctuations des nappes libre et captive aux Prés Royer entre fin 2018 et fin 2020

La Figure ci-avant conduit aux constats suivants :

- le battement de la nappe libre est d'environ 1.75 m (différence entre le min et le max). Dans la nappe captive, le battement, moins évident à déterminer car les maximums et minimums diffèrent d'année en année, avoisine les 8-10 m ;
- une variabilité annuelle des niveaux d'eau peut être observée tant dans la nappe captive que dans la nappe libre. Dans la nappe libre, elle est caractérisée par des niveaux bas pendant les mois de septembre, octobre et novembre et des niveaux élevés en décembre, janvier, février et mars. La nappe s'abaisse à nouveau à partir du mois de mars. Dans la nappe captive, on observe également des niveaux bas pendant les mois d'octobre et novembre. La nappe s'exhausse ensuite jusqu'au mois de mars / avril ou elle atteint son maximum. S'ensuit un abaissement progressif ;

- l'évènement du 21 juin 2019 a mené aux valeurs mesurées dans la nappe libre les plus élevées de la série temporelle à disposition ;
- la remontée reportée à Dombresson en mars 2020 correspond à un niveau élevé de la nappe libre aux Prés Royer mais à un exhaussement bien moins important qu'en juin 2019, probablement en raison du niveau préalablement élevé ;
- des niveaux élevés ont été mesurés dans la nappe libre en décembre 2018, mars 2019 et décembre 2019. Il est possible que ces périodes coïncident avec les interventions des pompiers à Dombresson ;
- deux exhaussements, très marqués dans la nappe libre, un peu moins dans la nappe captive, se sont produits début décembre 2018 et mi-octobre 2019.

Investigation du lien avec les précipitations

Sur la Figure 37 sont représentées les pluies journalières enregistrées à Chaumont¹¹ ainsi que le cumul de pluie du jour j et des cinq jours précédents. Les problèmes de remontées survenus dans le village de Dombresson en janvier 2018, juin 2019 et mars 2020, indiqués en rouge, correspondent à des pics de pluies journalières de plus de 40 mm. En orange, sont désignés les pics importants qui sont potentiellement à l'origine des autres interventions dont on ignore la date.

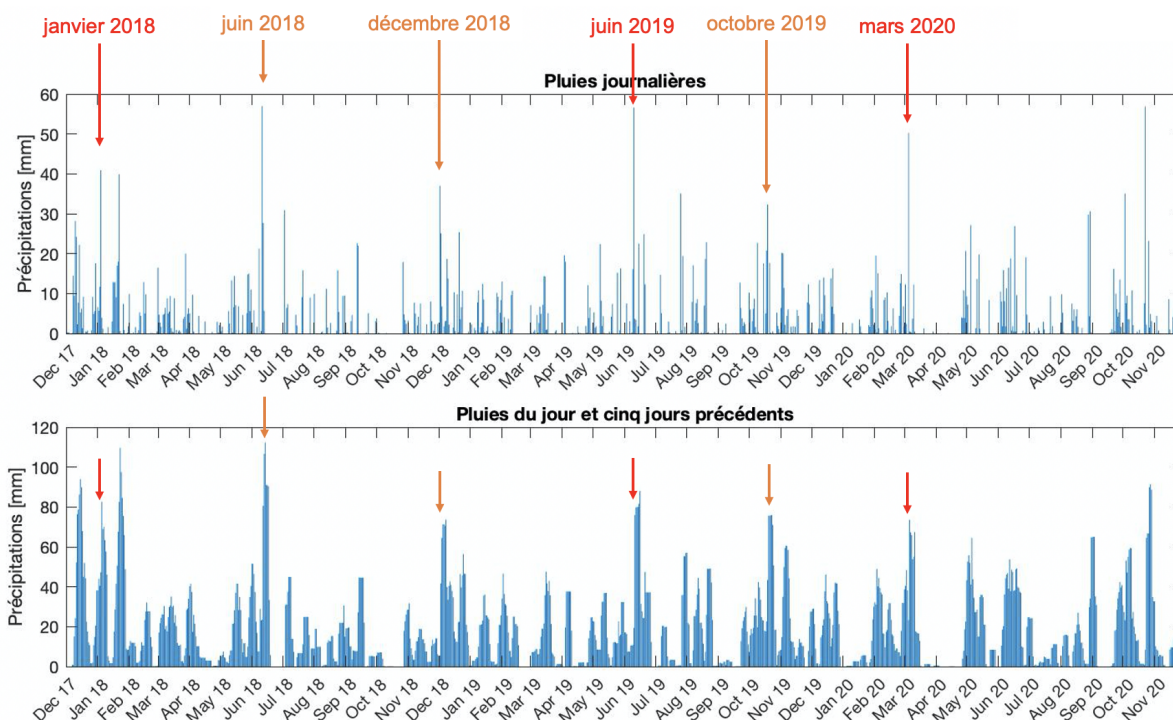


FIGURE 37 – Précipitations à la station Chaumont entre décembre 2017 et novembre 2020

On se limitera ici à la constatation que les épisodes de pluies abondantes relevées à Chaumont semblent être bien corrélés avec les exhaussements majeurs de la nappe libre des Prés Royer.

11. Position de la station en Figure 22

Investigation du lien avec les débits de la source de la Serrière

La série temporelle (Figure 38) montre que les remontées de nappe avérées de juin 2019 et mars 2020 correspondent à des débits plus grand que $11 \text{ m}^3/\text{s}$ de la source de la Serrière. On peut raisonnablement penser que le bassin de la Serrière était saturé lors de ces évènements. Ceci corrobore avec le témoignage de Monsieur Mathey, qui a observé que la source du Torrent s'est activée en juin 2019¹². Deux autres pics peuvent être constatés en mars 2019 et en décembre 2019. Ceux-ci correspondent aussi à des niveaux élevés de la nappe libre aux Prés Royer. Somme toute, chacun des moments où des niveaux hauts de la nappe libre aux Prés Royer ont été mesurés (entre janvier 2019 et juillet 2020, là où les données de débits de la Serrière existent), concorde avec une période de saturation de l'aquifère de la Serrière.

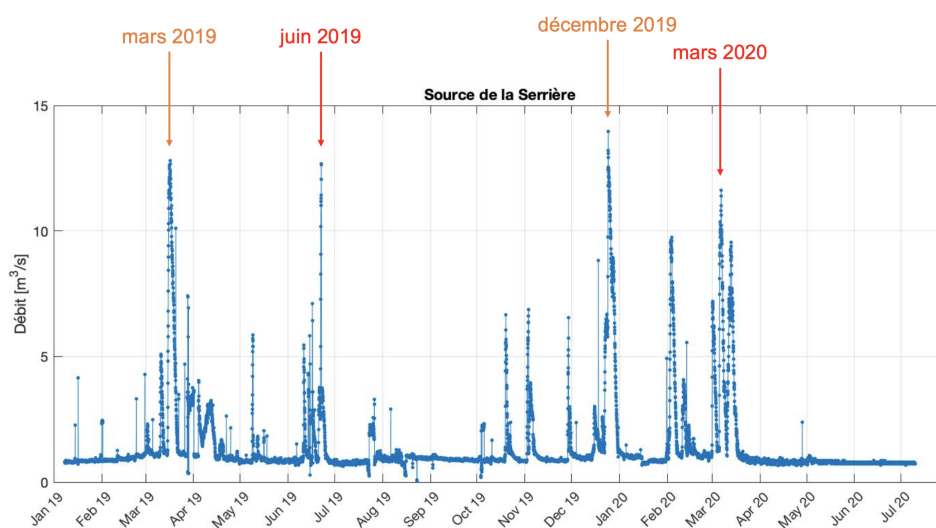


FIGURE 38 – Débits de la source de la Serrière entre janvier 2019 et juillet 2020
(Les hauteurs d'eau mesurées ont été converties par Léa Perrochet (CHYN) en débits, en utilisant la courbe de tarage établie sur la base de plusieurs mesures manuelles au moulinet)

12. Information issue de l'entretien du 28.10.20 avec Monsieur Bernard Mathey

4.2.2 Géologie et hydrogéologie

Jaugeages au sel

Les débits obtenus lors des deux jaugeages figurent en Table 20. Ces données ne peuvent pas être exploitées avant que d'autres mesures de débits, dont certaines en hautes eaux, ne soient réalisées. Une courbe de tarage, qui exprime le débit en fonction de la hauteur d'eau, pourra alors être établie.

Date	Hauteur d'eau mesurée manuellement [<i>cm</i>]	Débit [<i>l/s</i>]
18.11.20	9	7.15 ± 0.71
10.12.20	11.5	13.72 ± 1.37

TABLE 20 – Débits du Seyon obtenus à partir des jaugeages au sel

Essais d'infiltration et de pompage

Les essais de pompage et d'infiltration ont tout d'abord permis de vérifier que les piézomètres sont bien liés à la nappe. En effet, ceux-ci se sont stabilisés rapidement après l'ajout ou le retrait d'eau dans le tube piézométrique. La réponse rapide d'infiltration montre que la conductivité hydraulique de l'aquifère superficiel contenant la nappe phréatique est bonne. À titre d'exemple, la descente enregistrée dans le piézomètre PD1 peut être consultée en annexe 4.

Ces essais ont aussi été conduits dans le but d'obtenir une approximation de la conductivité hydraulique de l'aquifère. Malheureusement, les essais n'ont pas donné de résultats concluants. La formule de Dupuit à régime constant produit des conductivités hydrauliques bien trop faibles (de l'ordre de 10^{-7} m/s). Pour rappel, Mathey avait donné la fourchette $5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ [24] et des essais de pompages conduits aux Prés Royer avaient menés à $3 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ comme valeur moyenne [50]. On explique que les essais n'ont pas bien fonctionné par le débit extrêmement faible prélevé ou injecté. Le diamètre des tubes piézométriques (1 pouce) ne se prête pas bien à ce type d'essais.

Niveaux piézométriques, température et conductivité électrique

Les surfaces piézométriques interpolées à partir des mesures manuelles des 18.11.20 et 10.12.20 sont affichées en Figure 44.

La Figure 39 est composée de cinq graphes. Les quatre premiers indiquent les niveaux d'eau absolus calculés et les températures mesurées dans chaque piézomètre (PD1, PD2, PD3) ainsi que dans le tube installé dans le Seyon (Piézo Seyon). Les niveaux mesurés manuellement au début et à la fin de la période d'observation ont été ajoutés. La valeur attachée au deuxième point correspond à la différence entre la valeur calculée à partir des données de la sonde, et la valeur mesurée manuellement. Cette différence varie entre 0 et 1,5 *cm* pour PD1, PD2 et Piézo Seyon ; elle est de 5 *cm* pour PD3, mais un doute réside sur la mesure manuelle finale effectuée dans ce piézomètre. Étant donné que l'erreur sur la mesure manuelle est d'environ 1 *cm*, nous n'avons pas procédé à un ajustement de la série temporelle afin de supprimer cette "dérive". Sur le dernier graphe, sont affichés les précipitations journalières enregistrées à la station météorologique DOM et les températures. Les mesures de température proviennent de la sonde installée à proximité de Piézo Seyon.

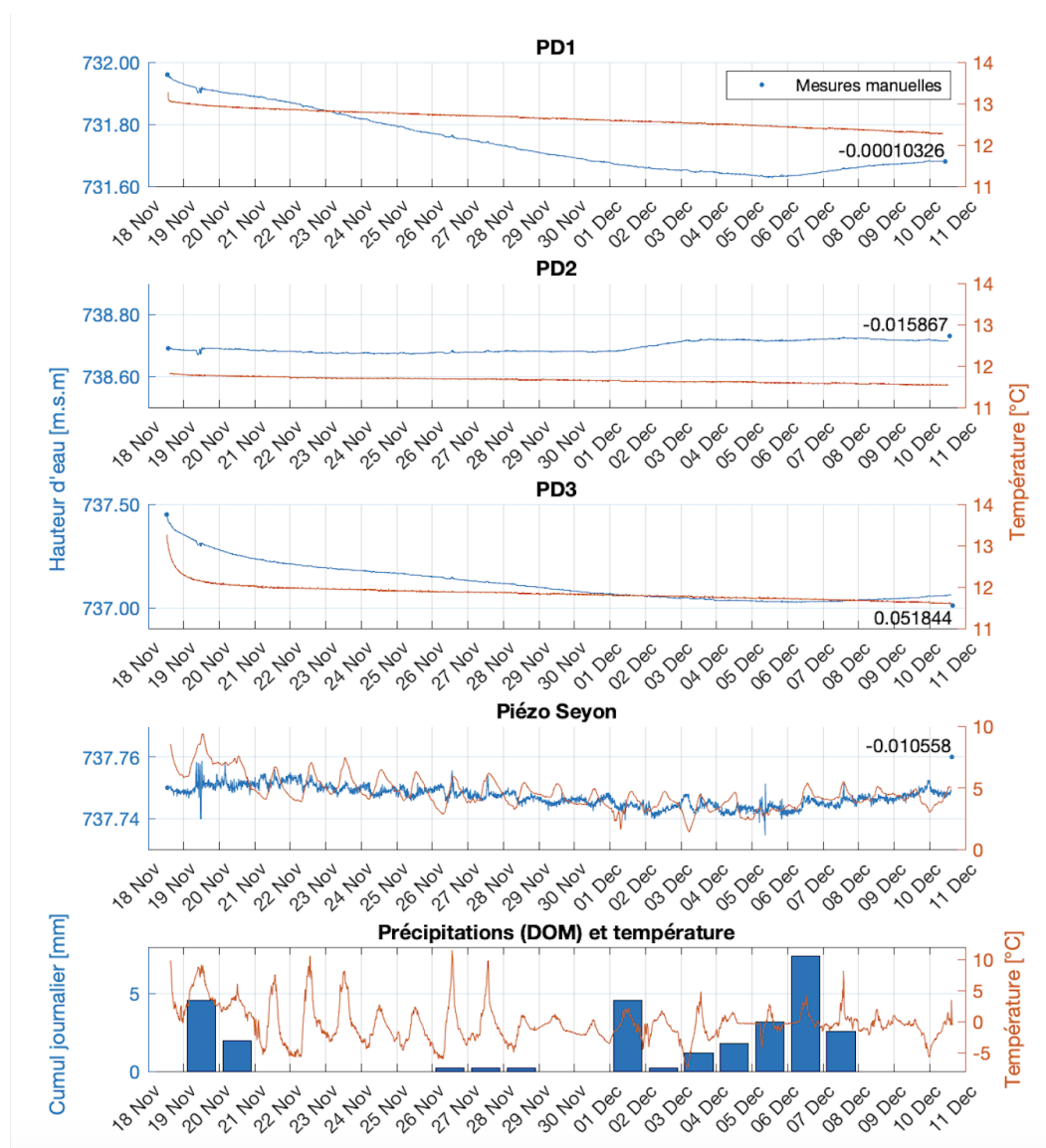


FIGURE 39 – Niveaux piézométriques, température et précipitations à Dombresson (lame d'eau)
NB : les précipitations de décembre sont tombées sous forme neigeuse

On observe un abaissement du niveau de la nappe dans les piézomètres PD1 et PD3 alors que le niveau dans le piézomètre PD2 est resté relativement stable. La recharge de la nappe par les précipitations n'est pas très marquée car celles-ci sont tombées en partie sous forme de neige, comme en attestent les températures qui avoisinent 0°C .

La Figure 40 montre les paramètres enregistrés par les sondes PD3 et Piézo Seyon dans le but d'examiner les éventuels échanges entre la nappe et le cours d'eau. La Figure est composée de deux graphes. Le premier montre la conductivité électrique et la température alors que le second indique les niveaux piézométriques.

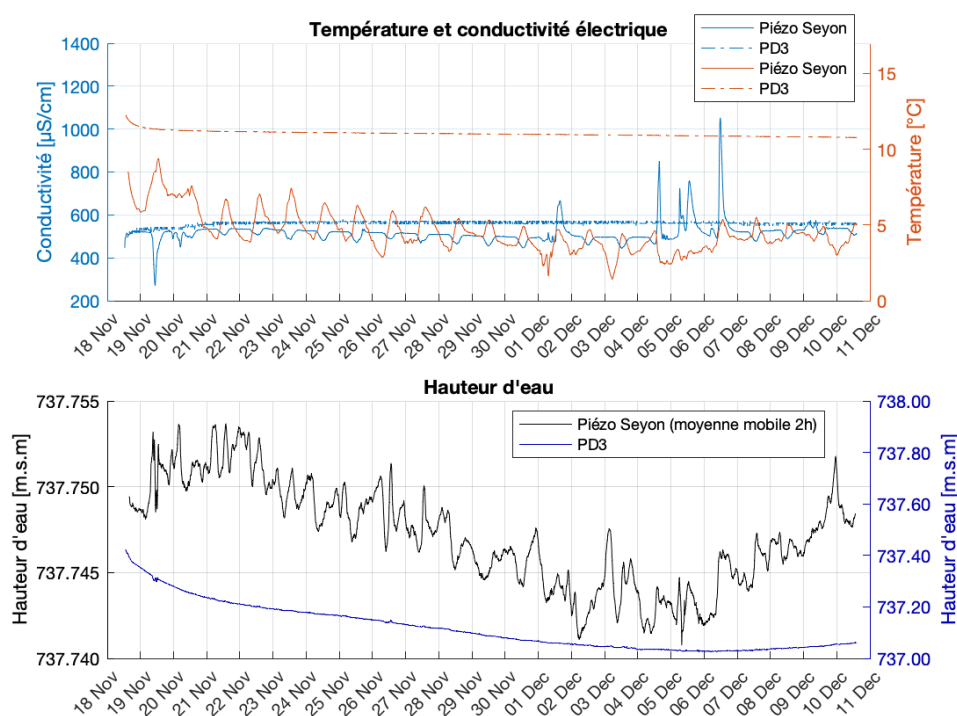


FIGURE 40 – Niveaux piézométriques et paramètres physico-chimiques de PD3 et Piézo Seyon

Remarques préalables :

- la conductivité électrique enregistrée dans le piézomètre PD3 ne doit pas être observée comme une valeur absolue car il se peut que l'eau du piézomètre soit influencée par les matériaux utilisés pour combler l'espace entre le tube piézométrique et le trou de forage (bentonite).
- une moyenne mobile de 2 heures a été réalisée sur les hauteurs mesurées dans le Seyon afin d'atténuer le bruit causé pas la turbulence dans le tube.

On constate que le niveau de la nappe a été inférieur, pendant toute la durée des observations, à celui du cours d'eau. Dans cette configuration, on pourrait s'attendre à ce que le cours d'eau alimente la nappe. Pourtant, les paramètres physico-chimiques mesurés n'attestent pas de cette connexion. Dans le Seyon, on observe, sans surprise, une oscillation journalière de la température. On constate également des variations de la conductivité électrique, probablement causées par une activité anthropique. Cette variabilité n'apparaît pas dans le piézomètre PD3, qui possède des paramètres très constants. On en déduit que l'eau de la rivière ne s'est pas écoulee dans la nappe durant la période d'observation, qui correspond à une période de basses eaux.

Géophysique (tomographie de résistivité électrique)

Les données collectées étaient préalablement très propres ; le premier profil n'a occasionné le retrait d'aucune donnée alors que seuls 2 ou 3 outliers ont été retirés du jeu de données du profil 2. La pseudosection des résistivités apparentes mesurées, celle des résistivités apparentes calculées et le résultat de l'inversion (pseudosection de la résistivité des matériaux du sous-sol) peuvent être consultés dans les annexes.

Sur les Figures 41 et 42 est dessinée l'interprétation géologique des deux tomographies 2D réalisées. Les

deux tomographies montrent très distinctement la couche de graviers sableux, puis, à partir de 6 à 8 m de profondeur, la couche d'argiles/limons sous jacente. Sur la tomographie 1, on distingue une troisième couche au delà de la profondeur d'investigation, caractérisée par des résistivités à nouveau plus importantes. Sur la tomographie 2, cette couche se révèle être la moraine de fond (plongeant depuis le versant SSE en direction du NNO) et une unité géologique caractérisée par une résistivité importante (>100 Ohm.m), que l'on interprète comme "fluvio-glaciaire ou moraine graveleuse".

L'origine géologique de la couche d'argiles/limons est interprétée comme glacio-lacustre, non pas comme une moraine argileuse [24], en raison de la gamme de résistivité très basse qui la caractérise.

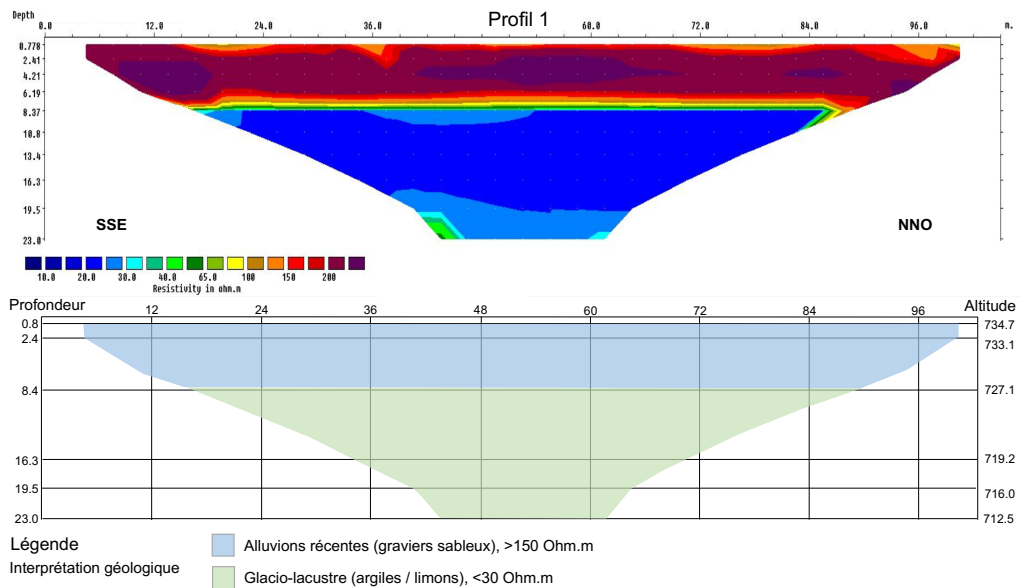


FIGURE 41 – Interprétation géologique de la tomographie de résistivité électrique du profil 1

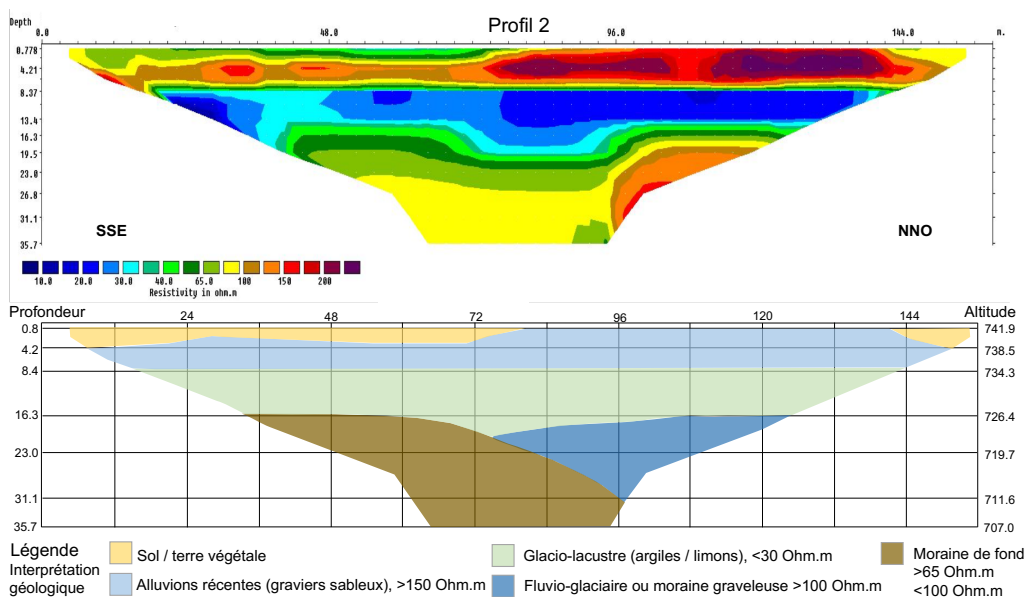


FIGURE 42 – Interprétation géologique de la tomographie de résistivité électrique du profil 2

4.2.3 Reconstitution de l'évènement du 21 juin 2019

Niveaux atteints par la nappe

La Figure 43 recense les informations connues dans la zone de l' Allée des Peuplier/Passage des Condémines (appelée ci-après "zone du verger"). Les éléments représentés sont :

- la composition du sous-sol : cette information est issue d'un recoupement entre le profil géoélectrique réalisé et l'interprétation du sous-sol lors de la mise en place du piézomètre ;
- le niveau de la nappe entre novembre et décembre 2020 : cette donnée provient de la sonde de pression installée dans le piézomètre PD1 (verger entre l'Allée des Peupliers et le Passage des Condémines ;
- les hauteurs d'eau dans les sous-sols après le 21 juin 2019 ;
- le niveau altimétrique des sous-sols.

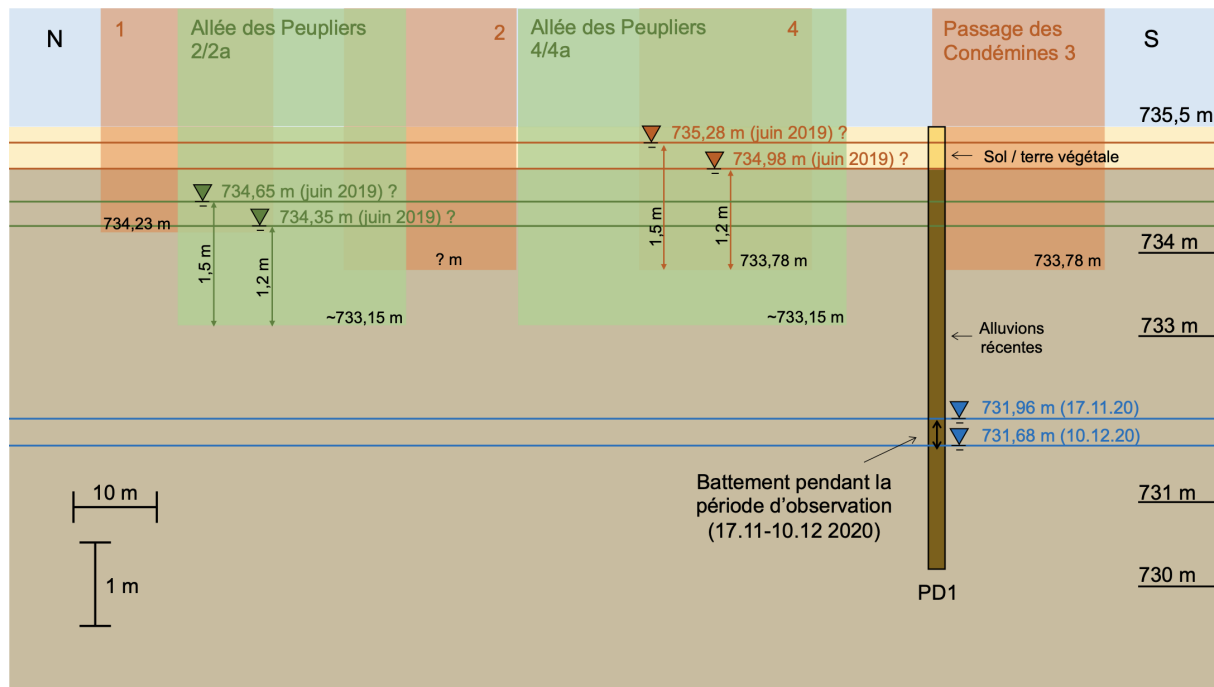


FIGURE 43 – Coupe transversale NS au lieu dit "verger", montrant l'Allée des Peupliers, qui le borde à l'est et le Passage des Condémines, qui le borde à l'ouest

Tous ces éléments donnent une représentation assez complète de la situation dans cette zone. La combinaison des hauteurs d'eau dans les sous-sols et du niveau altimétrique de ces derniers permet de reconstituer approximativement le niveau altimétrique atteint par la nappe libre le 21 juin 2019 et les jours suivants. On obtient la fourchette 734.35 - 734.65 *m.s.m* à l'Allée des Peupliers et la fourchette 734.98 - 735.28 *m.s.m* au Passage des Condémines. Le piézomètre PD1 se trouvant approximativement à mi-chemin, on peut imaginer que le niveau de la nappe y avoisinait les 734.8 *m.s.m*. Dans le piézomètre PD1, la différence entre le niveau supposé de la nappe le 21.06.19 et son niveau le 10.12.20 vaut 3.1 *m*.

Sur la Figure 44 est affiché le niveau piézométrique supposé de la nappe le 21 juin 2019 et/ou les jours suivants. Ce profil est une simple interpolation linéaire entre le niveau présumé de la nappe au centre

du verger (environ 734.8 m.s.m) et le niveau présumé dans le regard entre Grand'Rue 33 et 35 (environ 742.3 m.s.m). Les obstacles souterrains tels que les fondations des bâtiments peuvent bien évidemment créer des variations locales par effet barrage. Cette interpolation correspond à un gradient hydraulique de 1.35 cm/m d'amont en aval en suivant le tracé rouge. On ignore s'il s'agit de la direction de plus grande pente, étant donné l'absence d'informations sur le niveau de la nappe latéralement. En basses eaux, le gradient maximum (perpendiculaire aux lignes de niveau), calculé à partir des niveaux piézométriques mesurés manuellement au début et à la fin de la période d'observation, vaut $\approx 1.81 \text{ cm/m}$ d'est en ouest.

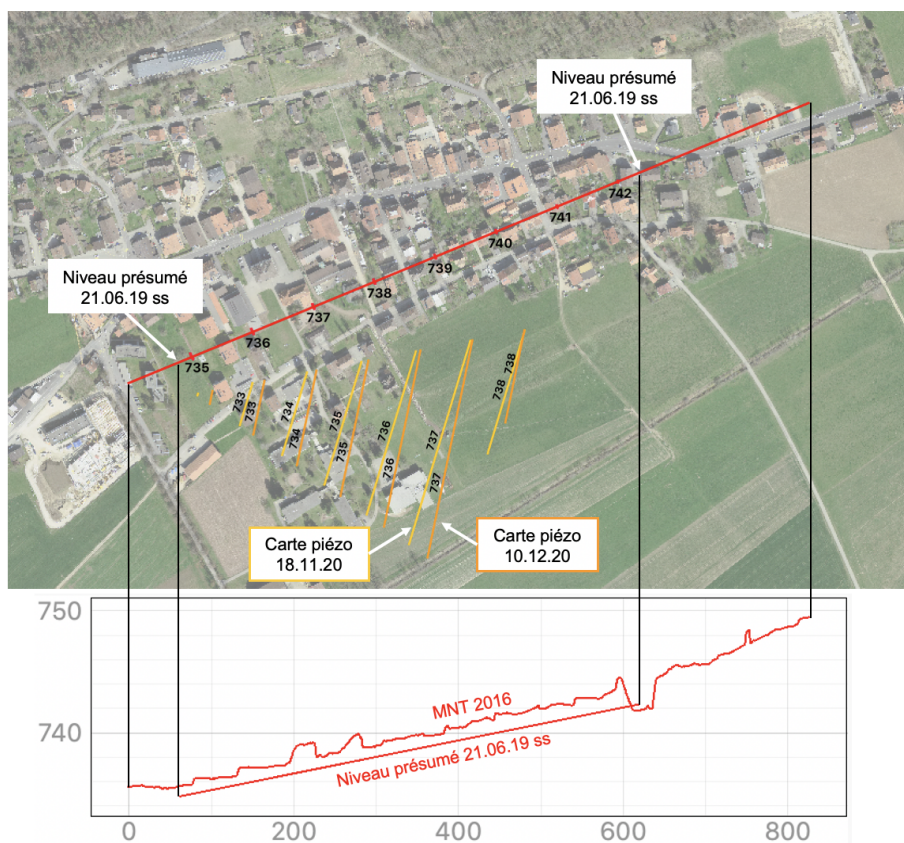


FIGURE 44 – Niveau présumé de la nappe lors de l'évènement du 21 juin 2019 et/ou jours suivants.
Fond de plan : Swissimage2017 © Swisstopo

Contribution des précipitations locales dans l'exhaussement de la nappe

Sur la Figure 45, sont représentés la géométrie de la portion de nappe libre qui nous intéresse (formations alluviales et fluvioglaciales [24]), sa zone alimentaire (formations alluviales, fluvioglaciales et formations morainiques peu perméables qui les bordent [24]) et ses bassins versants contigus. Les bassins versants sont ceux définis dans la partie consacrée au ruissellement (section 3.4.1). Les bassins "Villiers amont" et "Clémesin amont" ont été exclus car les eaux précipitées sur ces versants ont rejoint Villiers sous forme de crue. Le bassin "Dombresson Nord (Torrent)" a également été retiré.

Le calcul a été réalisé sur la base du modèle conceptuel de Mathey [24] selon lequel la zone alimentaire du bassin du Seyon comprend les formations alluviales, fluvioglaciales et formations morainiques peu perméables qui les bordent. Pour le calcul, on a considéré que toutes les précipitations tombées sur cette zone ont rejoint la nappe. Au delà de cette limite, les surfaces font partie du bassin versant topographique du Seyon et du bassin versant hydrologique de la Serrière. On a considéré ici que seules les eaux de ruissellement ont rejoint le fond du vallon. On a estimé que le coefficient d'emménagement de la nappe libre correspond à la porosité efficace d'un sable grossier : 0.15 [55].

En appliquant l'équation 7, on obtient que l'infiltration de la totalité des précipitations du 21 juin 2019 sur la zone d'alimentation dans la nappe aurait induit un exhaussement de :

$$\Delta h = \frac{V}{SA} = \frac{124363}{0.15 * 467'330} \approx 1.8[m]$$

En ajoutant le volume d'eau ruissellée sur les versants (selon les calculs effectués dans la partie consacrée au ruissellement avec la méthode SCS-CN), on trouve :

$$\Delta h = \frac{V}{SA} = \frac{124'363 + 70'799}{0.15 * 467'363} \approx 2.8[m]$$

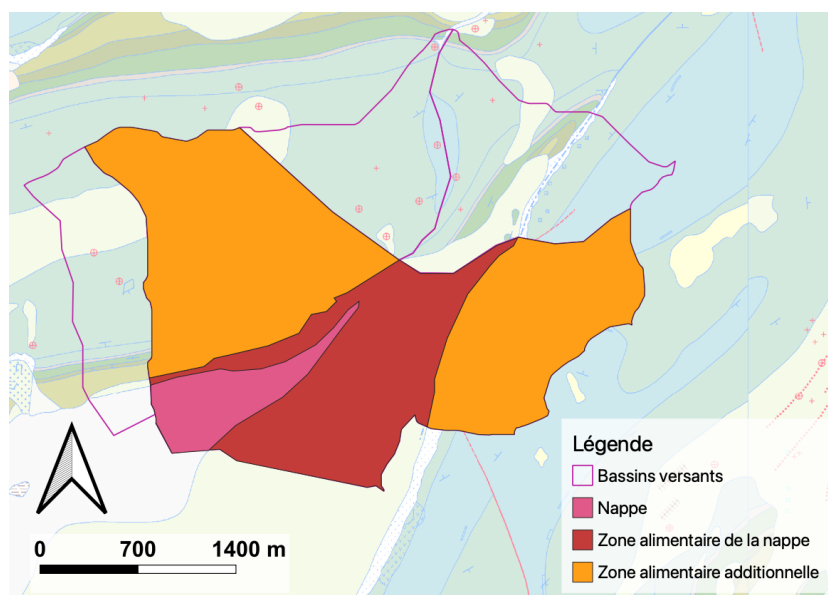


FIGURE 45 – Surfaces de calcul

5 Discussion

5.1 Ruissellement

5.1.1 Évènement du 21 juin 2019

Les volumes d'eau ruissellée le 21 juin 2019 ont été donnés par l'application de la méthode SCS-CN. Aucun moyen ne permet d'évaluer la validité des résultats obtenus en terme de valeurs absolues mais la tendance selon laquelle le phénomène croît d'aval en amont, constatée à travers l'enquête de terrain (section 4.1.2) et la répartition spatiale des sinistres ruissellement (section 3.3), apparaît à nouveau.

Dans la forêt de Cheneau, là où passent le Ruz Chasseran et la route cantonale, les sols sont particulièrement perméables. Ceci se traduit par une infiltration complète des précipitations. On s'interroge sur le réalisme de ce résultat, sachant que l'aquifère du Malm-Valanginien était saturé.

Ci-après, figure un bref aperçu des limites et sources d'erreurs potentielles de la méthode d'estimation SCS-CN :

- l'expression du temps n'apparaît pas dans la méthode. Celle-ci n'inclut donc pas les effets de l'intensité des précipitations et de sa distribution temporelle [38] ;
- la prise en considération des conditions d'humidité antérieures se limite aux précipitations des cinq jours précédents ;
- l'abstraction initiale, qui représente les pertes à court terme, (interception, stockage en surface, infiltration) est souvent considérée comme un paramètre régional dépendant de facteurs géologiques et climatiques. La méthode SCS-CN suppose que le facteur qui relie S et I_a est égal à 0,2 pour les applications pratiques. De nombreuses études ont pourtant rapporté que ce facteur peut varier entre 0 et 0.3 [38] ;
- le relief des bassins versants n'est pas considéré. Les parties avales reçoivent les eaux ruissellées en provenance de l'amont. Celles-ci pourraient avoir une influence sur la saturation du sol.

S'ajoutent à cela, tous les choix réalisés pour appliquer la méthode au cas d'étude (ex : les correspondances effectuées entre les couvertures du sol de la zone d'étude et les tables américaines, idem pour les groupes hydrologiques de sols).

Contribution des apports latéraux dans le débordement du Ruz Chasseran

La méthode de quantification choisie (SCS-CN) ne permet pas d'évaluer la contribution des apports latéraux car celle-ci ne donne aucune indication sur le déroulement temporel des écoulements de surface sur les versants. Effectivement, l'ampleur du débordement dépend principalement des débits maximums atteints dans le thalweg et ceux-ci dépendent du déroulement de l'évènement pluvieux sur l'ensemble du bassin versant et des temps de propagation des écoulements jusqu'au lit du cours d'eau. L'estimation des débits de pointe, effectuée par le bureau Scherrer [27] est la source de données qui permettra de réaliser la meilleure évaluation.

Comme spécifié dans la section 3.3.1, la zone étudiée recoupe partiellement le périmètre d'étude du bureau Scherrer (Clêmesin amont et Villiers amont). En terme de surface, nos périmètres d'étude réduit ou complet représentent respectivement 21% ou 29% de la surface couverte par les deux études (Table

21). On pourrait s'attendre à une contribution de cet ordre de grandeur et pourtant les débits de pointe estimés par le bureau Scherrer, en rouge sur la Figure 46, indiquent un doublement, voire un triplement du débit entre l'entrée et l'exutoire de la zone.

Cette constatation met en évidence l'importance de la distribution spatiale et temporelle de l'évènement pluvieux et des paramètres physiographiques des bassins versants. Ces derniers n'ont pas été comparés. Quant aux précipitations, elles ont commencé plus tard dans cette partie du bassin versant (périmètre d'étude de ce travail). Si on considère les temps de propagation, l'eau ruissellée sur les versants a rejoint le cours d'eau au moment où celui-ci était probablement déjà au plus fort de son débit.

Étude	Surface [km^2]
Scherrer	25.1
Présente réduite (sans Clémesin amont et Villiers amont)	6.7
Présente complète	9.3

TABLE 21 – Surfaces couvertes par l'étude Scherrer et l'étude ci-présente

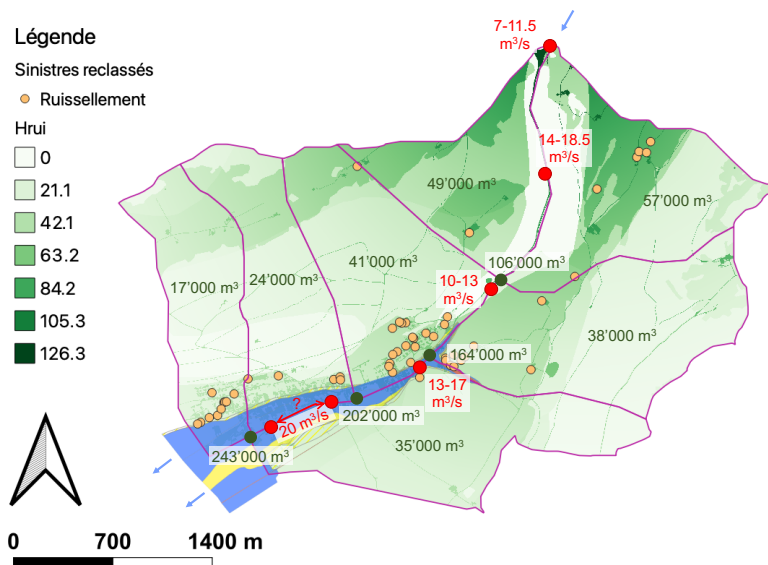


FIGURE 46 – Débits de pointe (points rouges) estimés par Scherrer dans le périmètre d'étude [27]

5.1.2 Validité de la carte de l'aléa ruissellement

Enquête de terrain

Les éléments récoltés (photos, témoignages) ne permettent pas de juger de la qualité des informations affichées sur la carte d'aléa du ruissellement. Il semble que deux routes (Les Crêts et Route de Clémesin) ont servi de chenaux d'écoulement mais ceci ne figure pas, ou seulement en rose clair, sur la carte d'aléa. La veine d'écoulement très marquée à Villiers n'a pas été mentionnée par les témoins (cela ne signifie pas qu'elle n'a pas existé).

Évaluation quantitative basée sur l'utilisation de données "proxy" (sinistres ECAP)

On interprète et explique les résultats ainsi :

- les divergences qui existent entre les résultats de l'évaluation visuelle et ceux de l'application de la méthode d'évaluation quantitative peuvent être expliquées par la reconstitution de la donnée d'aléa qui possède une résolution de 1 mètre (alors que la carte d'aléa est produite au 1 :12'500). Le calage par géoréférencement de cette donnée sur la donnée originale ajoute aussi une source d'erreur ;
- les taux de fausses alarmes très élevés s'expliquent simplement par la non prise en considération des informations sur la vulnérabilité et les mesures de mitigation qui sont indispensables pour faire diminuer ce ratio [45] ;
- la POD, légèrement inférieure quand l'historique complet est considéré, peut éventuellement provenir du MNT utilisé pour la cartographie de l'aléa ruissellement qui reflète l'état du terrain en 2010 ;
- les critères d'évaluations (POD et FAR) très similaires avec les deux tailles de zones tampons utilisées montrent que la résolution de la donnée de la carte d'aléa nous autorise certainement à encore réduire cette taille.
- aucun test du χ^2 ne permet de rejeter l'hypothèse que les sinistres et les aléas sont indépendants avec un degré de confiance de plus de 97.5%. Ce résultat est mauvais à considérer les résultats obtenus par la SNCF et l'INRAE [45]. Ceux-ci obtiennent un $\chi^2 = 7$, même sans prendre en compte la vulnérabilité et les mesures de mitigation.

En plus de ne pas avoir considéré la vulnérabilité ni les mesures d'atténuation et d'avoir reconstitué la carte d'aléa avec les moyens à disposition, on peut citer les points suivants, qui mènent probablement à un amoindrissement de qualité des résultats :

- les bâtiments conservés pour l'analyse sont ceux de la couche "bâtiments" SITN de plus de 12 m^2 . Cette valeur de 12 m^2 a été choisie arbitrairement pour exclure les installations non couvertes par l'ECAP¹³. Il aurait été plus judicieux de récupérer la donnée des bâtiments assurés directement auprès de l'ECAP ;
- la définition d'une zone tampon est indispensable puisque les écoulements modélisés par la carte d'aléa contournent les obstacles. Le choix des tailles de tampons de 3 et 6 mètres est expérimentale. Il a permis de tenir compte des éventuelles imprécisions de la carte d'aléa directement et de la reconstitution qui en a été faite ;
- un seul pixel à risque dans la zone d'évaluation suffit à faire passer la zone entière en "zone à risque". On pourrait définir un critère, tel qu'une part minimale sujette à un danger, pour faire passer la zone entière en zone à risque. C'est ce qui a été fait par la SNCF et l'INRAE [45] ;
- enfin, l'enquête de terrain a révélé que certains sinistres du 21 juin 2019 n'étaient vraisemblablement pas causés par le ruissellement de surface mais par la sous-capacité du système d'évacuation des eaux météoriques. Tous les sinistres reclassés ont été conservés malgré cette constatation.

On peut retirer de cette évaluation que la consultation des zones cartographiées en violet ($h > 0.25 m$) seules ne suffit pas. Effectivement, un peu moins de la moitié des sinistres recensés ont du violet dans leurs alentours. Les surfaces en rose foncé ($h > 0.10 m$) doivent aussi être considérées comme susceptibles

13. Rappel : l'ECAP n'assure pas les bâtiments dont la valeur d'assurance est inférieure à 5'000 francs et qui ne peuvent pas être assurés avec le bâtiment principal, les bâtiments construits pour un usage temporaire, des constructions mobiles ou posées sur le sol sans fondement [37].

d'engendrer des dommages aux infrastructures, au même titre que les surfaces en rose clair. C'est ce dernier point qui pose problème quand on sait qu'une très grande majorité de bâtiments sont touchés par une surface rose clair. Dans ce cas, le pouvoir prédictif de la carte est quasiment nul.

On peut expliquer les résultats, assez mauvais dans l'ensemble, soit par la manière dont la méthode a été appliquée (hypothèses et simplifications trop extrêmes), soit par une mauvaise représentation du danger par la carte d'aléa. En effet, la carte ne représente que les hauteurs d'eau atteintes mais ne donne aucune information sur la dynamique des écoulements, qui joue possiblement un rôle sur la survenance des impacts.

5.1.3 Proposition de mesures

L'historique des sinistres causés par le ruissellement a montré qu'on peut imputer près de deux tiers des sinistres recensés entre 1988 et 2020 aux précipitations du 21 juin 2019, en dehors de la zone de débordement du cours d'eau. Le ruissellement ne semble donc pas poser de problèmes récurrents dans le périmètre d'étude et on ne peut pas s'étonner que des événements avec de tels temps de retour (entre 30 et 300 ans selon le lieu) génèrent des dommages aux infrastructures. Si les propriétaires souhaitent se prémunir de telles inondations, les mesures de lutte qui suivent sont suggérées sur la base des informations connues.

En rive droite du Ruz Chasseran / Seyon, les bassins versants sont caractérisés par des surfaces vertes dans la partie amont et des surfaces boisées dans la partie aval. La forêt qui borde Dombresson et Villiers du côté nord représente la meilleure couverture de sol pour l'interception des pluies et leur infiltration. Les propriétés indemnisées par l'ECAP sont réparties assez homogènement dans l'espace ; on n'observe pas de concentration de sinistres, par exemple, le long d'une veine de ruissellement concentré. Dans cette zone (bassins versants de Dombresson nord (Torrent), Dombresson nord, Villiers Nord), les mesures objets sont donc à privilégier. Celles-ci doivent être définies au cas par cas.

Sur l'autre versant, en rive gauche, l'occupation du sol est différente. La forêt couvre les parties amont des bassins versants et plus en aval se trouvent des surfaces de pré / champs. On ignore si les exploitants des parcelles agricoles ont subi des pertes et leur ampleur. Cette information pourrait modifier les recommandations qui suivent. Des mesures agronomiques et d'hydraulique douce permettant de modifier la trajectoire des écoulements ou de réduire la vitesse des écoulements pourraient alors être ajoutées aux propositions. Ce genre de mesures est aussi souhaitable si les parcelles sont concernées par des problèmes d'érosion.

- le bassin de Dombresson sud n'est pas urbanisé et on dénombre très peu de bâtiments à protéger. Aucune mesure globale n'est donc recommandée ici ;
- le bassin de Clémesin aval inclut deux lotissements et une série de maisons bordant la route de Clémesin. Il serait souhaitable de s'assurer que les écoulements sont déviés en direction du Ruz Chasseran sans emprunter la route de Clémesin en amont des habitations. Les deux lotissements pourraient être protégés au moyen de mesures objets et/ou par dérivation de l'écoulement superficiel par modification sensible de la topographie ;
- sur les bassins de Clémesin amont et de Villiers amont, le même genre de mesures est suggéré.

5.2 Remontée de nappe

5.2.1 Phénomène de remontée de nappe à Dombresson

L'analyse de fluctuations de nappe aux Prés Royer a montré que :

- l'historique des interventions liées aux remontées de nappe à Dombresson (juin 2019 et mars 2020), coïncide avec des niveaux élevés de la nappe aux Prés Royer. On peut supposer que les pompiers ont du intervenir, en lien avec une remontée de nappe, en décembre 2018, mars 2019 ou décembre 2019 en plus des deux interventions établies de juin 2019 et mars 2020 ;
- les trois forts exhaussements (début décembre 2018, juin 2019 et mi-octobre 2019) de la nappe libre aux Prés Royer correspondent à des précipitations journalières élevées à Chaumont ;
- les niveaux élevés de la nappe libre aux Prés Royer correspondent toujours à des débits très élevés de la source de la Serrière, c'est à dire à un état de saturation de l'aquifère de la Serrière.

Le niveau relatif de la nappe, fourni par les valeurs mesurées aux Prés Royer, semble donner une indication du niveau de la nappe à Dombresson. Le niveau relatif de la nappe aux Prés Royer, combiné aux prévisions météorologiques des pluies, pourrait éventuellement être utilisé pour la conception d'un outil de prédiction des remontées de nappe à Dombresson.

Les résultats du travail de terrain autorisent à penser que la recharge de la nappe libre à Dombresson par le Seyon est inexistante, en tout cas en basses eaux.

Dans la zone du verger (Figure 43), où l'on possède une vue d'ensemble, on remarque que le niveau des sous-sols à l'Allée des Peupliers est inférieur à celui des sous-sols au Passage des Condémines ($\approx 0.6 m$). Ceci peut, de prime abord, paraître contre-intuitif au regard de l'historique des interventions des sapeurs pompiers. Cependant, le gradient calculé indique que la distance qui sépare les deux groupes de bâtiments suffit à créer une différence de l'ordre d'un mètre. Dans cette configuration, la nappe atteint d'abord les sous-sols du Passage des Condémines puis ceux de l'Allée des Peupliers.

Les données collectées appellent à la constatation que la marge entre le toit de la nappe et les sous-sols des bâtiments autour du verger est très faible. On ignore le niveau préalable au verger mais on peut supposer que la nappe était basse, comme aux Prés Royer, avant l'évènement du 21 juin 2019. On peut alors imaginer que le niveau était proche des niveaux relevés entre novembre et décembre 2020 par le piézomètre PD1. Ces hypothèses laissent penser que la nappe libre connaît un battement plus important à Dombresson qu'aux Prés Royer, où le battement des deux dernières années est d'environ $1.75m$. Ceci n'est pas surprenant puisque l'aquifère aux Prés Royer est plus étendu.

Finalement, les exhaussements calculés indiquent que les précipitations du 21 juin 2019, sur les versants seulement, sans apports par la crue du Ruz Chasseran, auraient suffi à créer une remontée de nappe de l'ordre de $3 m$. Le calcul a été effectué en considérant une infiltration complète vers la nappe ainsi qu'aucune perte vers l'aval (à la limite formée par la nappe et le périmètre de calcul), ni sous forme d'écoulements de surface, là où les surfaces sont saturées ou que leur capacité d'infiltration est dépassée, ni sous forme d'écoulements souterrains. Il constitue donc une surestimation qu'il est difficile de quantifier. Ce calcul, qui est une simplification à l'extrême, permet de donner un ordre de grandeur à la remontée

de nappe qui aurait pu se produire en absence de crue. Il ne représente en aucun cas la réalité du 21 juin 2019.

5.2.2 Causes de la remontée de nappe du 21 juin 2019

Les informations récoltées ne permettent pas de déterminer les causes de la remontée de nappe du 21 juin. Cependant, on peut apporter des pistes de réponses aux hypothèses formulées précédemment (section 3.4.3).

Les tomographies 2D réalisées ont révélé la présence d'une couche susceptible de contenir une nappe captive à une profondeur d'environ 20 m, comme aux Prés Royer. L'épaisseur de l'imperméable qui sépare cette couche des alluvions récentes est toutefois importante (8 à 12 mètres) (Figures 41 et 42). Il semble donc peu probable que la drainance à travers cette couche puisse être significative.

L'infiltration des précipitations tombées sur la zone alimentaire de l'aquifère (formations alluviales et fluvioglaciaires et formations morainiques peu perméables qui les bordent) a sans aucun doute contribué à l'exhaussement de la nappe libre. Celle-ci s'est révélée être proche de la surface, même en basses eaux et possède probablement des propriétés similaires à la formation équivalente de la zone des Prés Royer.

Aucun indice ne fait penser que des apports souterrains via une nappe captive sous-jacente ont eu lieu mais ceci ne suffit pas à exclure définitivement cette possibilité. La géométrie latérale de la nappe libre n'est pas connue précisément, ni même les éventuels contacts avec l'aquifère de l'Hauterivien. Aucun des éléments récoltés ne permet de statuer sur l'état de saturation de cet aquifère lors de l'évènement du 21 juin 2019. Pour cette raison, on ne peut pas qualifier ou quantifier les contributions souterraines ou superficielles fournies par cette formation. Les mesures de débit de la Serrière et l'activation de la source du Torrent attestent, quant à elles, de la saturation de l'aquifère du Malm-Valanginien (Figure 38). L'infiltration des apports causés par le ruissellement d'un trop-plein de cet aquifère a pu se produire le 21 juin 2019.

L'infiltration des eaux de la crue via le lit du Seyon semble être assez peu importante au regard des résultats, donnés par les sondes PD3 et Piézo Seyon, qui ne montrent aucune connexion entre la nappe et le Seyon, du moins en basses eaux. Il est néanmoins connu que les échanges nappe-rivière sont plus prononcés en hautes eaux grâce à l'augmentation de la surface de contact de l'eau et du lit du cours d'eau et à l'augmentation de la perméabilité du fond du lit dû aux vitesses élevées d'écoulement.

L'infiltration en surface des eaux débordées du Ruz Chasseran a probablement grandement favorisé la recharge rapide de la nappe libre par l'augmentation de la surface de contact et par la mise en charge exceptionnelle provoquée par les hauteurs d'eaux atteintes durant la crue.

Il n'est pas possible, à ce stade, d'affirmer quel/s processus a/ont contribué majoritairement à la remontée de la nappe libre. Cependant, on peut supposer que la combinaison de l'inondation de grande ampleur causée par le débordement du cours d'eau, des apports d'eaux ruissellées depuis les versants causés par l'état général de saturation des sols, de la saturation supposée de l'aquifère de l'Hauterivien et de la saturation du Malm-Valanginien ait mené à une recharge extraordinaire de l'aquifère et ainsi au fort exhaussement de la nappe. On peut supposer que la recharge de l'aquifère a eu lieu exclusivement par l'infiltration en surface, sans contribution souterraine. La simulation de l'évènement du 21 juin 2019 grâce

à un modèle d'écoulements souterrains permettrait de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse.

5.2.3 Validité de la carte de danger "remontée de nappe"

On conçoit que la cartographie de ce phénomène, sans série temporelle des niveaux piézométriques, n'est pas facile. On ignore aussi les moyens mis à disposition du bureau d'ingénieur. On regrette que la méthodologie innovante utilisée n'ait pas été documentée plus en détails. Plusieurs points suscitent des incompréhensions :

- le niveau du Seyon a servi à définir l'intensité. Le rapport ne précise pas s'il est question du Seyon actuel (canalisé) ou du Seyon historique qui s'écoulait dans le thalweg et quelle est la base de données utilisée. Le débit du Seyon n'est pas monitoré à Dombresson à notre connaissance ;
- l'historique de l'ECAP a été utilisé pour déterminer la probabilité d'occurrence, mais cet établissement n'indemnise pourtant pas les dégâts causés par les nappes ;
- le gradient hydraulique considéré n'est pas mentionné.

La méthodologie décrite n'inclut pas la géométrie de la nappe, ses propriétés physiques ni les processus qui contribuent à sa recharge et sa décharge (ex : échanges avec d'autres formations géologiques, zones d'infiltration préférentielles des précipitations). Tous ces aspects peuvent influencer le niveau de la nappe localement et/ou globalement.

La méthodologie peut être jugée de simpliste au regard de la complexité de la zone d'étude et des inconnues qui subsistent sur les processus de recharges et décharge. De plus, la carte de danger représente un phénomène qui ne s'est, à notre connaissance, jamais produit en l'absence de débordement du Ruz Chasseran / Seyon : celui d'une remontée au dessus de la surface topographique. Toutefois, les sinistres apparus le 21 juin 2019 sont presque tous inclus dans la zone de danger moyen (degré le plus fort représenté sur la carte) ou proches de la limite de cette zone. Les zones cartographiées suivent bien les anciens tracés du Ruz Chasseran et du Seyon.

5.2.4 Proposition de mesures

On suppose que le débordement du Ruz Chasseran est majoritairement responsable de la remontée exceptionnelle de la nappe du 21 juin 2019 à Dombresson. Le concept de protection à l'étude devrait permettre de faire transiter les crues du Ruz Chasseran de manière contrôlée dans les villages de Villiers et Dombresson, et ainsi de lutter, par la même occasion, contre les remontées de nappe. Cependant, le phénomène de remontée de nappe peut aussi se produire en l'absence de débordement, comme en atteste l'historique d'intervention mentionné par le commandant du SDI-VdR. Les aménagements de protection contre les crues constituent donc une réponse partielle à la problématique de remontée de nappe, qui doit être complétée par d'autres mesures. Le choix des mesures les plus efficaces doit reposer sur une analyse coûts-bénéfices. Ce type d'analyse n'a pas été menée dans le cadre du projet ci-présent. On se limite ici à suggérer les mesures qui semblent les plus adaptées à la zone d'étude sans considérer leurs coûts.

Tout d'abord, on suggère de porter une attention toute particulière au réaménagement du Seyon projeté dans le concept de protection contre les crues. Le Seyon, tel qu'il est actuellement, se trouve à un niveau altimétrique plus élevé que la nappe. Le cours d'eau ne participe vraisemblablement pas à la recharge de la nappe en raison du pavage et certainement du colmatage de son lit canalisé. Un réaménagement

du Seyon, impliquant l'augmentation du gabarit et une revitalisation (tout à fait souhaitable d'un point de vue environnemental) pourrait rétablir une connexion nappe-rivière qui se trouverait être majoritairement une décharge de la rivière dans la nappe, pour la simple raison que le cours d'eau se trouve à un niveau altimétrique plus élevé que la nappe (le tracé du cours d'eau ne correspond plus au thalweg). Les effets d'une telle recharge méritent d'être analysés plus en détail.

Ensuite, la carte d'aléa du ruissellement indique de nombreuses zones d'accumulation étendues dans le village de Dombresson. Ceci n'est pas surprenant puisque celui-ci est situé dans le thalweg du vallon du Val-de-Ruz. La concentration des eaux météoriques, en cas de précipitations importantes ou intenses sur les bassins versants contigus, mènent probablement à des infiltrations ponctuelles qui peuvent grandement participer à la recharge de la nappe. Une réflexion quant à une optimisation du système d'évacuation des eaux pluviales, consistant à diriger les eaux de ruissellement en aval de Dombresson et éventuellement à augmenter progressivement le dimensionnement standard (temps de retour des pluies de 5 à 10 ans) lors du remplacement des conduites, peut faire sens dans ce contexte particulier.

Dans la catégorie des mesures préventives, on suggère aussi fortement une poursuite de l'étude des fluctuations de la nappe libre à Dombresson. Maintenant que des piézomètres ont été installés, un monitoring des niveaux sur quelques années et leur analyse est souhaitable. Une meilleure connaissance des processus de recharge et de décharge et la prévision du phénomène bénéficierait au ciblage des mesures les plus adaptées. Un outil de prédiction "early warning" pourrait également être conçu par réalisation de piézomètres équipés de sondes avec transmission des données de hauteurs d'eau par 3G/4G.

En ce qui concerne les futures constructions dans les villages de Villiers et Dombresson, on recommande vivement la réglementation de leur conception (dans les zones sujettes aux remontées seulement). La protection par mesures passives des bâtiments existants, qui ont subi des désordres dans le passé, par reprise en sous-oeuvre est envisageable. Cette catégorie de mesures semble être onéreuse mais on ne peut pas exclure sa rentabilité en l'absence d'analyse coûts-bénéfices.

Il n'est pas possible, dans le cadre de ce travail, de se prononcer sur la faisabilité et la souhaitabilité de la mise en place de mesures actives (abaissement du niveau de la nappe au moyen de drains et galeries ou au moyen de puits et forages).

Pour finir, on ignore où l'eau pompée par les pompiers dans les sous-sols inondés a été évacuée les jours qui ont suivi la remontée de nappe du 21 juin 2019. Si elle a été déversée dans les champs avoisinants, cela aura créé un effet de boucle. L'eau extraite des sous-sols des bâtiments se sera infiltrée à nouveau dans la nappe, puisque celle-ci est libre, sub-affleurante et qu'elle ne possède pas de couche protectrice, puis dans les sous-sols. À l'avenir, on suggère vivement de veiller à évacuer les eaux pompées via le réseau d'évacuation des eaux. Ceci met en évidence la nécessité pour les pompiers d'avoir quelques notions d'hydrogéologie (nouvelle formation courte ?) ou l'intérêt d'une collaboration avec un hydrogéologue.

6 Conclusion

6.1 Synthèse

La reclassification des causes des sinistres de l'ECAP du 21 juin 2019 a été effectuée sur la base des bâtiments touchés par une inondation à long terme (indice d'une remontée de nappe) et de l'étendue maximale de la zone de débordement de cours d'eau (représentée par le danger résiduel sur la carte de danger d'inondation). Ce choix se justifie par la topographie en vallon du Val-de-Ruz, qui induit une faible variation des surfaces inondées, et sur l'observation que les sinistres sont très concentrés dans la zone inondée par le cours d'eau. La classification a montré que, sur 12.7 millions de CHF de dommages, environ 6% sont imputables au ruissellement seul, et 16% à la remontée de nappe (combiné à la crue puisque les sinistres sont situés dans la zone inondée par le cours d'eau) malgré que les sinistres de cette catégorie de causes soient très peu nombreux. Les 78% restant sont attribués au débordement du cours d'eau seul. Les sinistres les plus coûteux sont concentrés dans le thalweg, où s'écoulaient historiquement le Seyon et le Ruz Chasseran.

La contribution du phénomène de ruissellement aux abords de Villiers et Dombresson dans le débordement du cours d'eau du 21 juin 2019 a été effectuée sur la base de l'étude Scherrer [27]. Elle montre que les eaux ruisselées, sur les bassins versants du périmètre d'étude, se monte à 50%, voire 66% des débits de pointes, malgré la superficie limitée (environ 30%) de ce périmètre au regard du bassin versant complet du Ruz Chasseran.

La méthode d'évaluation quantitative de la carte de l'aléa ruissellement, réalisée avec les sinistres de l'ECAP comme données "proxy" a dévoilé que le pouvoir prédictif de la carte est insatisfaisant. En considérant l'aléa $h > 0.25$ m seul, la probabilité de détection des sinistres est de 45% seulement. En considérant l'aléa $h > 0.10$ m, la probabilité de détection atteint environ 75%. La troisième catégorie d'aléa a été exclue de l'étude en raison de sa grande étendue (si l'aléa touche 9 bâtiments sur 10, le pouvoir prédictif de la carte est nul). Dans tous les cas, les taux de fausses alarmes obtenus sont particulièrement hauts. Ce point peut être expliqué par la simplification de la méthode réalisée (pas de prise en compte de la vulnérabilité et des mesures d'atténuation). Finalement, les tests du χ^2 ne permettent pas de rejeter avec plus de 75% à 95% de certitude l'indépendance de l'aléa et des sinistres. On suppose que ce mauvais score est causé par les simplifications et les hypothèses réalisées pour l'application de la méthode mais il peut aussi être le fruit d'une mauvaise représentation des veines d'écoulement diffuses et concentrées par la carte ou une représentation inadéquate du danger par les hauteurs d'eau seules. Effectivement, la carte ne donne aucune information sur la dynamique des écoulements. Il est nécessaire d'étudier davantage cette carte d'aléa afin d'établir sa fiabilité et de fournir des clés de lecture supplémentaires. Par exemple, lors de la consultation de la carte d'aléa, il est important de garder à l'esprit que les indications affichées doivent être combinées, au cas par cas, avec certains paramètres qui traduisent la vulnérabilité des infrastructures (ex : la configuration des bâtiments).

L'étude de la nappe, par le biais de la littérature, des données collectées et analysées ou du travail de terrain, a révélé la présence d'une nappe libre, sans couche protectrice, dont le toit est très proche des sous-sols des bâtiments de Dombresson, même en basses eaux. La configuration géologique et hydrogéologique permet d'imaginer l'existence de plusieurs processus de recharge de cet aquifère. La drainance via la nappe captive inférieure a pu être écartée grâce à la campagne de prospection géophysique réalisée. Un lien entre les niveaux hauts de la nappe libre aux Prés Royer (même formation géologique qu'à

Dombresson) a été établi avec la saturation de l'aquifère du Malm-Valanginien. La recharge via le lit du Seyon est inexistante, en tout cas en basses eaux.

La carte de dangers liés aux remontées de nappe a été difficile à évaluer en raison de la documentation non exhaustive de sa conception. On constate simplement l'apparition des sinistres dans la zone cartographiée avec le danger le plus fort (danger moyen) ou proche de sa limite.

On suppose que la crue du Ruz Chasseran du 21 juin 2019 est majoritairement responsable de la recharge extraordinaire de la nappe mais il existe toutefois un historique d'intervention pour des problèmes de remontées de nappe en absence de crue. Le concept de protection contre les crues est donc une réponse partielle à la problématique de remontée de nappe. Une attention particulière doit être portée au réaménagement du Seyon qui pourrait rétablir une recharge de la nappe par le cours d'eau. La poursuite de l'étude de la nappe est recommandée, tout comme la réglementation des futures constructions et l'analyse coûts-bénéfices des mesures de reprise en sous-oeuvre des bâtiments touchés par les remontées de nappe.

Finalement, l'historique des sinistres causés par le ruissellement hors de la zone inondable (selon la carte de danger INO) a mis en évidence le caractère exceptionnel de l'évènement du 21 juin 2019. Cependant, l'analyse effectuée de la problématique de ruissellement repose uniquement sur l'étude des dégâts aux bâtiments et donc les mesures qui sont proposées sont axées sur la protection du bâti. On ignore si les agriculteurs ont subi des pertes. Des mesures objets sont majoritairement recommandées.

6.2 Gestion intégrée des risques en Suisse

Ruissellement

La carte de l'aléa ruissellement est un outil destiné aux propriétaires. Les communes peuvent d'ores et déjà tenir compte de la carte aléa ruissellement dans leur aménagement du territoire en émettant des prescriptions ou en mettant en place des mesures pour atténuer le phénomène ou pour protéger les objets là où cela semble nécessaire. Il est nécessaire de s'interroger sur la plus-value d'une gestion intégrée des risques, passant par une cartographie de danger, à ce phénomène. La carte existante peut se révéler être un outil adapté à la problématique du ruissellement. La validité de cette carte reste toutefois à prouver, tout comme la pertinence de ne représenter que les hauteurs d'eau comme indicateur du danger.

Il serait intéressant, dans le but d'évaluer la fidélité de la carte d'aléa au phénomène de ruissellement de façon complète, d'appliquer la méthodologie employée ci-avant en constituant une base de données au plus proche de l'exhaustivité en termes de proxy (sinistres des établissements cantonaux d'assurances, témoignages, laisses, vols de drone, ...), de mesures d'atténuation mises en place et de vulnérabilité des infrastructures. La quantification réalisée dans cette étude a montré que la prise en considération des hauteurs d'eau de plus de 25 cm (code couleur violet) seules ne donne pas des résultats satisfaisants. La probabilité de détection augmente largement quand les hauteurs d'eau supérieures à 10 cm (rose foncé) sont incluses dans l'analyse. En considérant le degré le plus faible (rose clair) sur les bâtiments les plus vulnérables, le taux de détection pourrait encore augmenter. On devrait alors établir une méthode de caractérisation de la vulnérabilité des infrastructures. Il serait ensuite nécessaire de déterminer quels degrés de danger génèrent un risque pour quels degrés de vulnérabilité et d'analyser s'il est ainsi possible d'améliorer la probabilité de détection du modèle.

Une évaluation complète, débouchant sur les résultats non significatifs, permettrait d'établir que les divergences entre les impacts causés par le ruissellement et la carte d'aléa sont issues d'une mauvaise représentation du phénomène par la carte (la cartographie des hauteurs d'eau n'est pas correcte) ou d'autres facteurs (la considération des hauteurs d'eau seules, sans vitesses d'écoulement, ne permet pas de prédire un danger). Une évaluation de ce type fournirait aussi des clés de lecture supplémentaires (Comment dois-je lire et interpréter la carte en tant que propriétaire non aguerri?).

Remontée de nappe

Les cartes de danger sont des outils d'aménagement du territoire et il est tout à fait désirable de considérer les dangers induits par les remontées de nappe dans cet aménagement. Selon nous, la représentation des inondations en dessus de la surface topographique seulement n'a pas de sens puisque les remontées causent déjà des dégâts aux infrastructures avant d'atteindre la surface. Au lieu d'utiliser les mêmes classes de degrés de danger que pour le danger d'inondation par les crues, on suggère de définir des classes propres aux remontées de nappe, en incluant les hauteurs d'eau en dessous de la surface topographique, tout ceci en respectant le code couleur des cartes de danger, sa signification et son implication pour l'aménagement du territoire (voir annexe 1).

On pense aussi que l'hydrodynamique souterraine devrait être incluse lors de l'élaboration de la carte de danger pour aboutir à une représentation fidèle du danger.

Finalement, si l'exercice de cartographie du phénomène de remontée de nappe est abordé, on recommande vivement de documenter en détails la méthodologie suivie, afin d'aider au travail d'élaboration d'une méthodologie officielle si elle est entreprise. L'évaluation de la carte de dangers liés aux remontées de nappe s'est avérée difficile en raison d'une documentation non exhaustive de sa conception.

Références

- [1] Rolf LÜTHI. *Cadre juridique des cartes de dangers*. Mai 2004.
- [2] OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT, DES FORÊTS ET DU PAYSAGE, OFFICE FÉDÉRAL DES EAUX ET DE LA GÉOLOGIE et OFFICE FÉDÉRAL DU DÉVELOPPEMENT TERRITORIAL. *Recommandation - Aménagement du territoire et dangers naturels*. 2005.
- [3] OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉCONOMIE DES EAUX (OFEE), OFFICE FÉDÉRAL DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE (OFAT) et OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT, DES FORÊTS ET DU PAYSAGE (OFEFP). *Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire - Recommandations*. 1997.
- [4] UNITÉ DES DANGERS NATURELS, DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ENVIRONNEMENT, CANTON DE VAUD. *Cartographie des dangers naturels - Vade-mecum*. Mai 2014.
- [5] OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT OFEV. *Carte de l'aléa ruissellement*. fr. URL : <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themen/thema-naturgefahren/naturgefahren--fachinformationen/naturgefahrensituation-und-raumnutzung/gefahrengrundlagen/gefaehrdungskarte-oberflaechenabfluss.html> (visité le 05/10/2020).
- [6] LE CONSEIL FÉDÉRAL, OFEV. *Gestion des dangers naturels en Suisse - Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 12.4271 déposé par Christophe Darbellay le 14.12.2012*. Rapp. tech. 2016.
- [7] OFFICE FÉDÉRAL DES EAUX ET DE LA GÉOLOGIE OFEG. *Évaluation des crues dans les bassins versants de Suisse - Guide pratique*. Rapp. tech. 4. 2003.
- [8] Abrar YOUSUF et Manmohanjit SINGH. *Watershed Hydrology, Management and Modeling*. en. CRC Press, oct. 2019. ISBN : 978-0-429-43063-3. DOI : 10.1201/9780429430633.
- [9] André MUSY. *Cours Hydrologie générale - prof. André Musy*. 2005. URL : <https://echo2.epfl.ch/e-drologie/> (visité le 04/01/2021).
- [10] CELLULE GISER, CONVENTION POUR LA GESTION INTÉGRÉE SOL EROSION RUISSELLEMENT. *Bonnes pratiques pour la gestion du risque de ruissellement en zone rurale*.
- [11] ÉTABLISSEMENTS CANTONAUX D'ASSURANCE VKF/AEAI. *Recommandations - Protection des objets contre les dangers naturels météorologiques (Chapitre 4 : Pluie)*. 2007.
- [12] CEPRI, CENTRE EUROPÉEN DE PRÉVENTION DU RISQUE D'INONDATION. *Gérer les inondations par ruissellement pluvial - Guide de sensibilisation*. Oct. 2014.
- [13] Topps Prowadis (Train Operators to PROMOTE PRACTICES AND SUSTAINABILITY). *Best Management Practices to mitigate risk of runoff - a quick start*.
- [14] Sébastien GASSMANN. *Cahier de fiches techniques : Érosion - réduire les risques*. Oct. 2016.
- [15] C. W. FETTER. *Applied Hydrogeology : Fourth Edition*. en. Google-Books-ID : BYZXDwAAQBAJ. Waveland Press, 2018. ISBN : 978-1-4786-3744-8.
- [16] Charles J TAYLOR et William M ALLEY. *Ground-water-level monitoring and the importance of long-term water-level data*. Rapp. tech. 2330-5703. 2001.
- [17] Frédéric PARAN et al. « Caractérisation des échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire—Guide méthodologique. » In : (2015).

- [18] BRGM SERVICES SOL ET SOUS-SOL DIRECTION INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE et SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL. *La remontée des nappes d'eau souterraine en site urbain - Aspects techniques, socio-économiques, réglementaires et juridiques*. Rapp. tech. R 30 288 4S/GEG-93. Ministère de l'industrie - Ministère de l'équipement - Secrétariat permanent du plan urbain, déc. 1993.
- [19] A C KING et al. « Identifying flood recharge and inter-aquifer connectivity using multiple isotopes in subtropical Australia ». en. In : *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19 (2015), p. 2315-2335.
- [20] CANTON DU VALAIS. *Etude du comportement de la nappe phréatique à Viège*. URL : <https://www.vs.ch/web/sen/etude-du-comportement-de-la-nappe-phreatique-a-viege> (visité le 13/01/2021).
- [21] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE et BRGM , SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL. *Les inondations par remontée de nappe | Géorisques*. URL : <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/les-inondations-par-remontee-de-nappe> (visité le 18/12/2020).
- [22] Gilles BERGERON, Hubert DEHAYS et Thierry POINTET. *Remontées des nappes d'eau souterraine : causes et effets*. 83 SGN 353 EAU. Orléans Cedex : Editions du Bureau de recherches géologiques et minières, Service Géologique National, juin 1983.
- [23] ECOGESTION SÀRL et CERA INGÉNIERIE. *Étude des dangers naturels liés à l'eau Secteur « Val de Ruz » et « entre deux lacs » - Phase II - Cartes des dangers d'inondation par les crues des cours d'eau et les remontées des plans d'eau*. technique Dossier N° 1444. Juil. 2009.
- [24] Bernard MATHEY. « Hydrogéologie des bassins de la Serrière et du Seyon ». Thèse de doct. Neuchâtel - Suisse : Université de Neuchâtel - Institut de géologie - Centre d'hydrogéologie, 1976.
- [25] BG INGÉNIEURS CONSEILS SA. *Concept succinct de protection contre les crues du Ruz Chasseran ; RC1003 - Inondations Val-de-Ruz*. Rapp. tech. 100008.14-RN15/Alda/Esd. Sept. 2019.
- [26] POLICE NEUCHÂTELOISE. « Spécial inondations - L'évènement - Témoignages - Le jour d'après ». In : Hors série (juil. 2019).
- [27] SCHERRER AG. *Evaluation de la crue du 21 juin 2019 dans le bassin versant du Ruz Chasseran à Villiers (Val de Ruz) et mise à jour des données hydrologiques*. Rapp. tech. 19/261. Reinach, nov. 2019.
- [28] Le NOUVELLISTE. *Neuchâtel : quatre blessés dont un grave dans les violents orages qui ont touché le Val-de-Ruz*. fr. Juin 2019. URL : <https://www.lenouvelliste.ch/articles/suisse/neuchatel-quatre-blesses-dont-un-grave-dans-les-violents-orages-qui-ont-touche-le-val-de-ruz-849212> (visité le 25/09/2020).
- [29] ARCINFO. *Intempéries au Val-de-Ruz : la personne grièvement blessée est décédée*. fr. Juin 2019. URL : <https://www.arcinfo.ch/articles/regions/val-de-ruz/intemperies-au-val-de-ruz-la-personne-grievement-blessee-est-decedee-849467> (visité le 25/09/2020).
- [30] OFFICE FÉDÉRAL DE L'AGRICULTURE OFAG. *Download géodonnées*. fr. URL : <https://www.blw.admin.ch/blw/fr/home/politik/datenmanagement/geografisches-informationssystem-gis/download-geodaten.html> (visité le 09/11/2020).
- [31] METEO DOMBRESSON. *La météo du Val-de-Ruz*. URL : <http://www.meteo-dombresson.ch/> (visité le 09/11/2020).
- [32] OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT OFEV. *Requête de données NABEL*. fr. URL : <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themen/thema-luft/luft--daten--indikatoren-und-karten/luftbelastung--daten/datenabfrage-nabel.html> (visité le 03/12/2020).

- [33] OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT (OFEV), ASSOCIATION SUISSE D'ASSURANCES (SIA) et ASSOCIATION CANTONALE D'ASSURANCES IMMOBILIÈRES (VKG). *Gefährdungskarte Oberflächenafluss Schweiz*. allemand. Rapport technique. Juin 2018.
- [34] BUREAU TECHNIQUE NORBERT GÉOLOGUES CONSEIL SA. *Étude des dangers naturels liés à l'eau Secteur « Val de Ruz » et « entre deux lacs » - Rapport phase I - Problématique : laves torrentielles, glissement/érosion de berges et inondation par remontée des eaux souterraines*. technique 1003-R1001. Déc. 2009.
- [35] BUREAU TECHNIQUE NORBERT GÉOLOGUES-CONSEIL SA. *Étude des dangers naturels liés à l'eau Secteur « Val de Ruz » et « entre deux lacs » - Rapport final phase II - Carte de dangers d'inondation par remontée des eaux souterraines et danger de glissement de berges*. technique 1003-R1002. Sept. 2009.
- [36] ETABLISSEMENT CANTONAL D'ASSURANCE ET DE PRÉVENTION - NEUCHÂTEL. *Trois missions essentielles au service du patrimoine bâti*. URL : <http://www.ecap-ne.ch/fr/Portrait/Missions.html> (visité le 20/10/2020).
- [37] ECAP (NEUCHÂTEL, ÉTABLISSEMENT CANTONAL D'ASSURANCE ET DE PRÉVENTION). *Conditions générales - Edition 2018*. 2018.
- [38] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. « Chapitre 10 - Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall ». In : *Part 630 Hydrology National Engineering Handbook*. Juil. 2004.
- [39] Surendra Kumar MISHRA et Vijay P SINGH. *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology*. T. 42. Springer Science & Business Media, 2013. ISBN : 94-017-0147-4.
- [40] Roger CRONSHEY. *Urban hydrology for small watersheds*. Rapp. tech. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, 1986.
- [41] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. « Chapitre 7 - Hydrologic Soil Groups ». In : *Part 630 Hydrology National Engineering Handbook*. Mai 2007.
- [42] Hafzullah AKSOY et al. « Hydrological and hydraulic models for determination of flood-prone and flood inundation areas ». en. In : *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 373 (mai 2016), p. 137-141. ISSN : 2199-899X. DOI : 10.5194/piahs-373-137-2016. URL : <https://piahs.copernicus.org/articles/373/137/2016/> (visité le 30/09/2020).
- [43] OFFICE FÉDÉRAL DE L'AGRICULTURE OFAG. *Modèle de géodonnées minimal 77.2 - Carte des aptitudes des sols de la Suisse*. Rapp. tech. Jan. 2012.
- [44] DÉPARTEMENT FÉDÉRAL DE JUSTICE ET POLICE - OFFICE FÉDÉRAL DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, DÉPARTEMENT FÉDÉRAL DE L'ÉCONOMIE PUBLIQUE - OFFICE FÉDÉRAL DE L'AGRICULTURE et DÉPARTEMENT FÉDÉRAL DE L'INTÉRIEUR - OFFICE FÉDÉRAL DES FORÊTS. *Carte des aptitudes des sols de la Suisse - Bases pour l'aménagement du territoire*. Rapp. tech. Berne, mar. 1980.
- [45] Isabelle BRAUD et al. « A method to use proxy data of runoff-related impacts for the evaluation of a model mapping intense storm runoff hazard : application to the railway context ». In : *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20 (avr. 2020), p. 947-966. DOI : 10.5194/nhess-20-947-2020.
- [46] GROUPEMENT STUCKY - MAGES. *PREE Val de Ruz - Module hydrogéologie*. Rapp. tech. 234-VAL-RUZ-PREE/JFM/IT. La Neuveville, mai 2007.

- [47] H. SUTER et E. LÜTHI. *Erläuterungen - Blatt 1144 Val de Ruz - Topographie : Landeskarte der Schweiz 1 :25'000*. allemand. 1969.
- [48] GROUPEMENT STUCKY - MAGES. *PREE Val de Ruz - Module hydrologie*. Rapp. tech. 4699/4001b. Renens, mai 2007.
- [49] ECOGESTION SÀRL et CERA INGÉNIERIE. *Étude des dangers naturels liés à l'eau Secteur « Val de Ruz » et « entre deux lacs » - Rapport phase I - Crues des cours d'eau et remontées des plans d'eau*. technique Dossier N° 1444. Déc. 2008.
- [50] HYDRAP (J. BERTRAND). *Puits de la nappe libre des Prés-Royer s.st. (puits Cernier, Swissboring, Chézard-St-Martin 1 et 2, Dombresson) - Délimitation des zones de protection. Plan et règlement des zones. Avec 9 Annexes*. Rapp. tech. Broc : Syndicat intercommunal des Prés-Royer élargis (SIPRE), mai 1991.
- [51] HYDRAP (J. BERTRAND). *Puits de Savagnier - Délimitation des zones de protection. Plan et règlement des zones. Avec 8 Annexes*. Rapp. tech. Broc : Syndicat intercommunal des Prés-Royer élargis (SIPRE), mai 1991.
- [52] RWB HYDRAP SÀRL et Y. LAVANCHY. *Etude hydrogéologique en vue de la délimitation des zones de protection des puits Mornod et Bertrand (nappe captive des Prés Royer)*. technique. SEVRE Syndicat intercommunal des eaux du Val-de-Ruz Est, juil. 2004.
- [53] Bernward HÖLTING et Wilhelm G COLDEWEY. *Hydrogeology*. Springer, 2019. ISBN : 3-662-56373-8.
- [54] Marescot LAURENT. « IMAGERIE ELECTRIQUE POUR GEOLOGUES acquisition, traitement, interprétation ». en. In : (2008).
- [55] BRGM. *Formulaire d'Hydrogéologie - Définitions, équations de base et grandeurs usuelles*. URL : http://sigesmpy.brgm.fr/IMG/pdf/formulaire_hydrogeologie.pdf (visité le 10/01/2021).
- [56] OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT (OFEV). *Qu'indiquent les cartes de dangers ?* Mai 2015.

Annexes

Annexe 1 : Signification des zones de danger et implications pour l'aménagement du territoire

Rouge: danger élevé

- Les personnes sont en danger à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.
- Il faut s'attendre à des destructions soudaines de bâtiments.
- **Zone d'interdiction:** aucune définition de nouvelles zones à bâtir; déclassement ou modification des zones à bâtir non construites; aucune construction ni extension de bâtiments ni d'installations; établissement des restrictions d'affectation nécessaires pour les bâtiments existants; reconstruction de bâtiments détruits uniquement dans des cas exceptionnels, assortie de conditions; transformations et changements d'affectation uniquement sous des conditions visant à diminuer les risques

Bleu: danger moyen

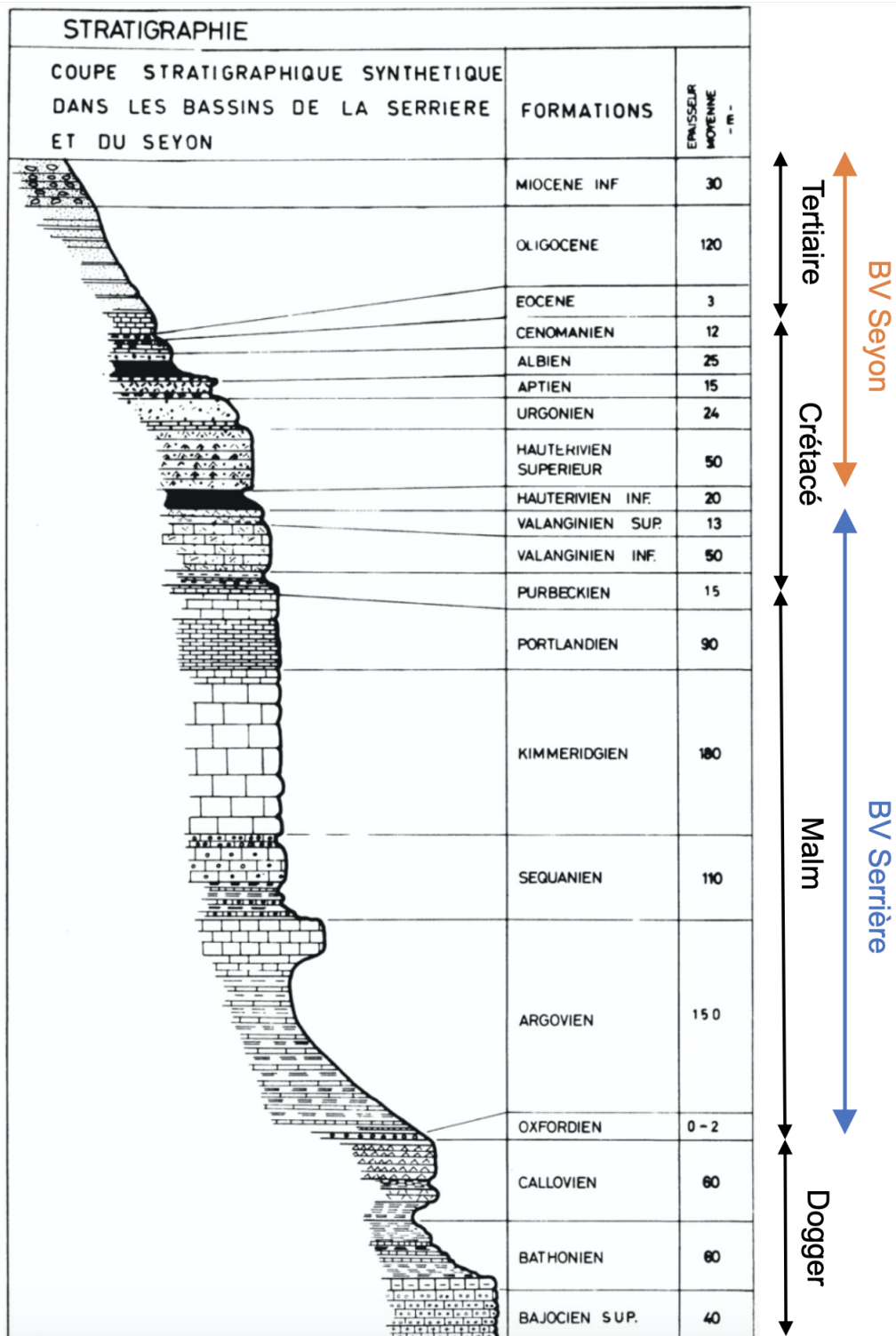
- Les personnes ne sont guère en danger à l'intérieur des bâtiments, mais elles le sont à l'extérieur.
- Il faut s'attendre à des dommages aux bâtiments, mais des destructions soudaines sont improbables si certaines conditions ont été respectées lors de leur construction.
- **Zone de réglementation:** définition de nouvelles zones à bâtir uniquement après avoir étudié les autres possibilités et procédé à une pesée d'intérêt; octroi de permis de construire assorti de conditions; aucune construction d'objets sensibles; établissement des restrictions d'affectation nécessaires pour les bâtiments existants

Jaune: danger faible; hachuré jaune et blanc: danger résiduel

- Le danger pour les personnes est presque inexistant.
- Il faut s'attendre à de faibles dommages aux bâtiments ou à quelques désagréments. Des dommages matériels importants peuvent en outre survenir à l'intérieur des bâtiments.
- **Zone de sensibilisation:** indication de la situation de danger; recommandations pour les bâtiments existants; envisager des conditions pour les nouvelles constructions (p. ex. renforcer les murs en amont contre le poids des avalanches), les utilisations sensibles ou les plus grandes constructions / en présence d'un potentiel de dommage élevé

Signification des zones de danger et implications pour l'aménagement du territoire [56]

Annexe 2 : Coupe stratigraphique

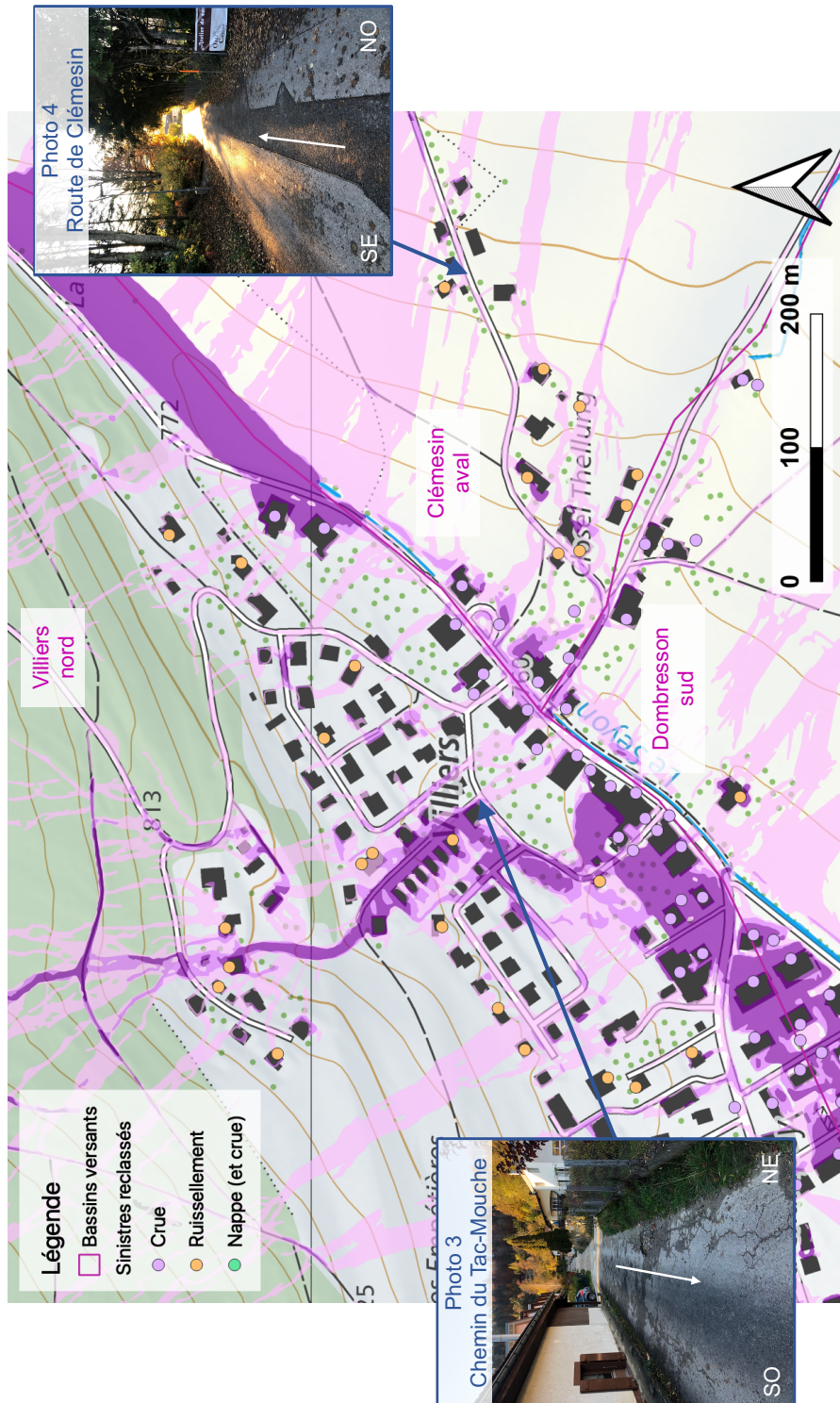


Coupe stratigraphique des bassins de la Serrière et du Seyon (tirée de la thèse de Bernard Mathey [24] et complétée)

Annexe 3 : Ruissellement - sortie de terrain du 30 octobre 2020



Zones Dombresson nord et Dombresson nord (Torrent)



Zones Villiers nord et Clémesin aval



Zone Clémesin amont

Annexe 4 : Remontée de nappe - travaux de terrain des 17, 18 novembre et 10 décembre 2020

Coordonnées des profils géophysiques réalisés

Nom	Électrode	Coordonnées	
Profil 1	E1	$x=2'563'327$	$y=1'213'281$
	E18	$x=2'563'303$	$y=1'213'327$
	E36	$x=2'563'288$	$y=1'213'367$
Profil 2	E1	$x=2'563'817$	$y=1'213'275$
	E18	$x=2'563'785$	$y=1'213'321$
	E36	$x=2'563'750$	$y=1'213'357$
	E54	$x=2'563'722$	$y=1'213'403$

Coordonnées (smartphone) des tomographies 2D réalisées

Photos du travail de terrain (17,18 novembre et 10 décembre 2020)







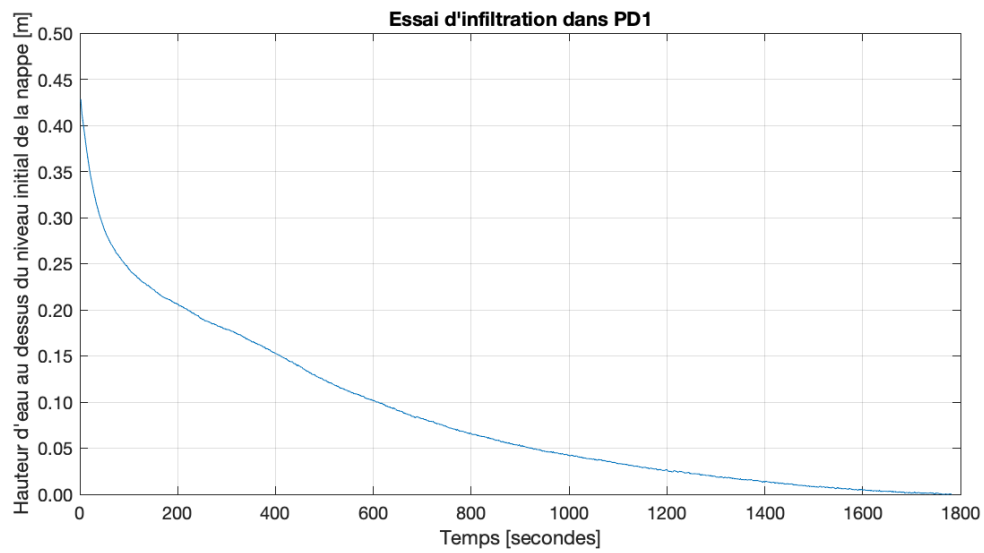


GPS différentiel



Géophysique (profil 2)

Essai d'infiltration dans PD1



Logs de forage des piézomètres

Projet	Fanny Gretillat / JuraHydroSlide		
Date des travaux	17.11.20		
Institution	Unine, CHYN	Profondeur	5.30 m
Forage	PD1 (Piézo Dombresson 1)	Altitude tête tube	735.45 m
Coordonnées (DGPS)	2'563'308.03	Altitude terrain	~735.50 m
	1'213'303.49	Tube hors sol	~-0.05 m

Ø et méthode forage	Profondeur [m]	Altitude [m.s.m]	Niveau d'eau	Equipement Hydrologie	Difficulté à percer	Interprétation géologique	Essais/tests
Battage à la tarière mécanique, Ø=2" (4.98 cm)	~-0.5	735.45				Sol / terre végétale	Essai d'infiltration (17.11.20) : non concluant Essai de pompage (10.12.20) : non concluant
	1			1.25m tube plein		Graviers sableux : alluvions récentes (Seyon, Ruz Chasseran)	
	2			3m tube crépiné			
	3						
	4	731.96 731.68		17.11.20 10.12.20			
	~4.6				1m tube plein	Argiles, limons : glacio-lacustre	
~5.3							
6				Ø=1" (2.54 cm)			

Légende

- facile
- moyen
- difficile

Projet	Fanny Gretillat / JuraHydroSlide		
Date des travaux	17.11.20		
Institution	Unine, CHYN	Profondeur	6.30 m
Forage	PD2 (Piézo Dombresson 2)	Altitude tête tube	742.65 m
Coordonnées (DGPS)	2'563'719.99	Altitude terrain	~742.70 m
	1'213'383.61	Tube hors sol	~-0.05 m

Ø et méthode forage	Profondeur [m]	Altitude [m.s.m]	Niveau d'eau	Equipement Hydrologie	Difficulté à percer	Interprétation géologique	Essais/tests
Battage à la tarière mécanique, Ø=2" (4.98 cm)		742.65					
	1			1.25m tube plein	facile	Sol / terre végétale	Essai d'infiltration (17.11.20) : non concluant Essai de pompage (11.12.20) : non concluant
	2				facile		
	3				facile		
	~3.5			4m tube crépiné	difficile	Graviers sableux : alluvions récentes (Seyon, Ruz Chasseran)	
	4	738.71 738.69	17.11.20 10.12.20		difficile		
	~4.7			1m tube plein	moyen	Argiles, limons : glacio-lacustre	
5				moyen			
~6.3							
7				Ø=1" (2.54 cm)			

Légende

- facile
- moyen
- difficile

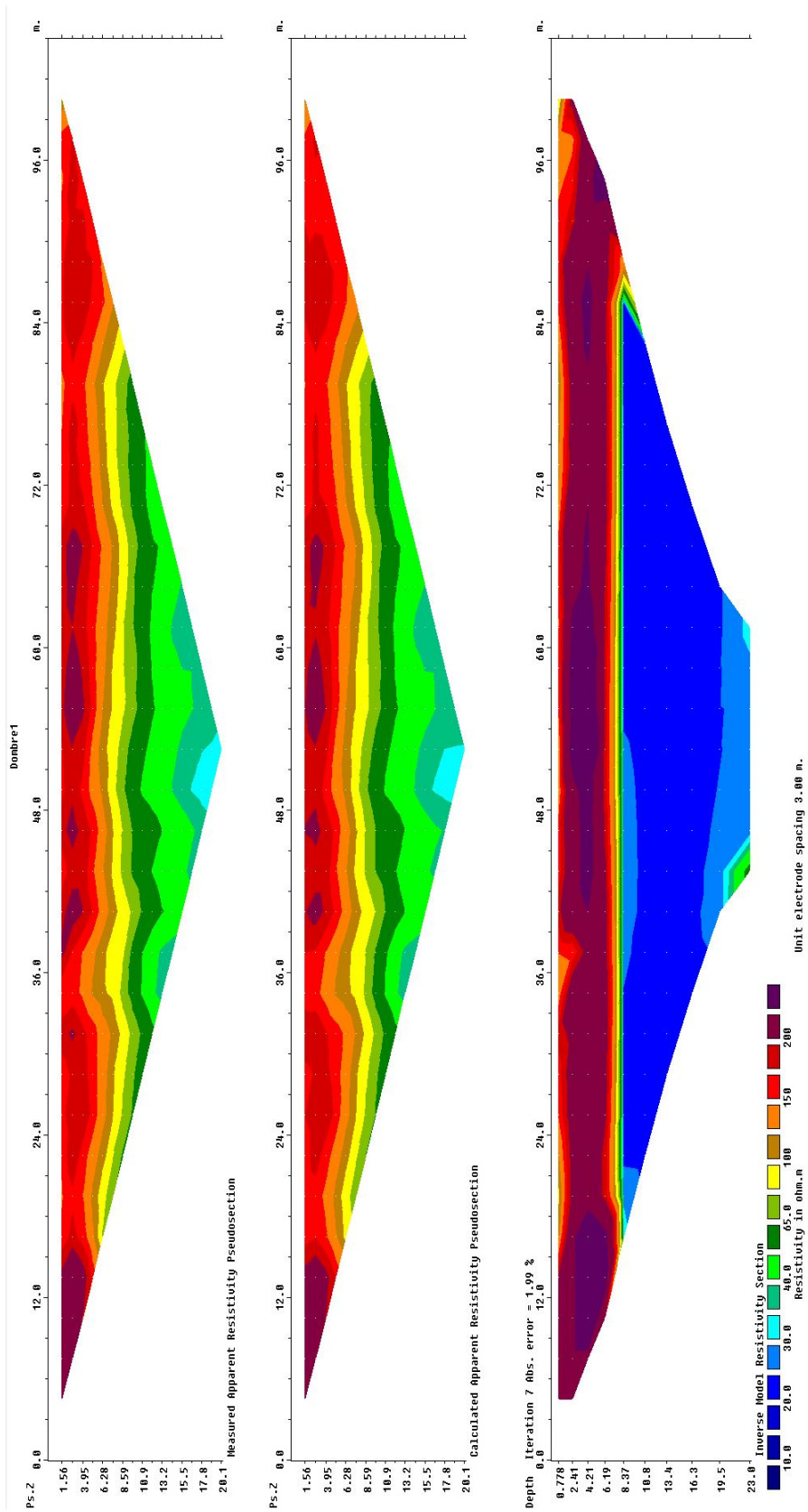
Projet	Fanny Gretillat / JuraHydroSlide		
Date des travaux	18.11.20		
Institution	Unine, CHYN	Profondeur	5.30 m
Forage	PD3 (Piézo Dombresson 3)	Altitude tube	738.76 m
Coordonnées (DGPS)	2'563'569.00	Altitude terrain	~738.86 m
	1'213'119.70	Tube hors sol	~-0.1 m

Ø et méthode forage	Profondeur [m]	Altitude [m.s.m]	Niveau d'eau	Equipement Hydrologie	Difficulté à percer	Interprétation géologique	Essais/tests
Battage à la tarière mécanique, Ø=2" (4.98 cm)	1	738.76	18.11.20	1.2m tube plein	facile	Sol / terre végétale	Essai d'infiltration (18.11.20): non concluant Essai de pompage (10.12.20): non concluant
	2	737.45	10.12.20		3m tube crépiné		
	3	737.01			très difficile	???	
	4			1m tube plein		Moraine de fond	
	5	~5.3					
	6				Ø=1" (2.54 cm)		

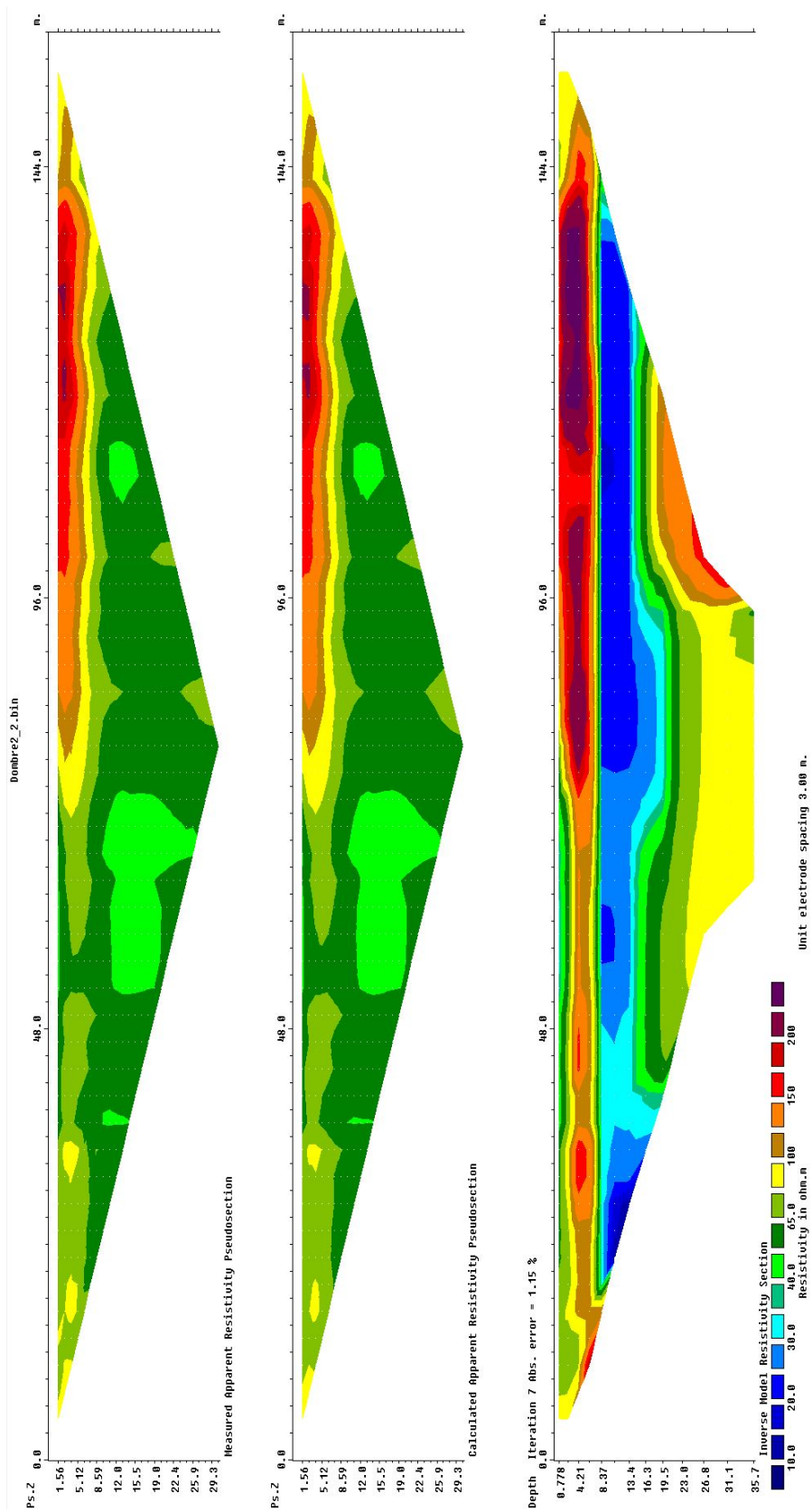
Légende

- facile
- difficile
- très difficile

Résultats des profils géoélectriques



Tomographie 2D du profil 1



Tomographie 2D du profil 2