

Master of Science in Geography

Juin 2021

Sécheresse sur le massif jurassien : quels impacts sur la gestion des ressources en eau ?

# Alexis Cuenot

Sous la direction du Prof. Emmanuel Reynard et du MER Jean-Michel Fallot



Le lac des Brenets, lors de la sécheresse de 2018 (Cuenot A. 2018)

« Ce travail n'a pas été rédigé en vue d'une publication, d'une édition ou diffusion. Son format et tout ou partie de son contenu répondent donc à cet état de fait. Les contenus n'engagent pas l'Université de Lausanne. Ce travail n'en est pas moins soumis aux règles sur le droit d'auteur. À ce titre, les citations tirées du présent mémoire ne sont autorisées que dans la mesure où la source et le nom de l'auteur·e sont clairement cités. La loi fédérale sur le droit d'auteur est en outre applicable. »

## REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire de master n'aurait pas été possible sans le soutien et l'aide d'un grand nombre de personnes. J'aimerais leur adresser mes plus grands remerciements.

Je remercie tout d'abord mes directeurs de mémoire, le Professeur Emmanuel Reynard et le MER. Jean-Michel Fallot pour leurs conseils, leurs critiques et leur disponibilité. Merci de m'avoir guidé tout au long de mon travail.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont permis de me guider durant mes recherches.

Je remercie les collaborateurs des services des eaux du Grand Pontarlier et de ValRégiEaux qui n'ont cessé de répondre à mes nombreux mails depuis le début de ce travail.

Je souhaite particulièrement remercier ma grande sœur Elodie pour son aide précieuse à la longue relecture et à la correction de mon mémoire. MERCI !

Finalement, un grand merci à ma famille qui m'a toujours encouragé durant mes études et qui a su m'apporter soutien et motivation en toutes circonstances.

## ABSTRACT - RÉSUMÉ

Climate of the Jura is considered to be humid. However droughts have become increasingly frequent since the beginning of the 21st century.

We carried out a hydro-climatic analysis in order to explain the cause of this change, taking into account parameters such as temperatures, rainfalls and snowfalls since the beginning of the 20th century for several locations in the Jura. Our results show that average temperatures are increasing and that the seasonality of the rain is disrupted.

Droughts have serious consequences on the aquatic environment and on water supply. We analyzed the impact of the droughts that happened in Pontarlier and Le Chenit in 2003 and 2018. For this, we conducted interviews and documentary research and highlighted how local water resource management methods adapt to these climatic changes. We also show that prevention of droughts requires more integrated water management and environmental protection to maintain a virtuous water cycle.

#### key words:

heat, drought, climate change, precipitation, temperatures, water, water supply, adaptation, shortage, Jura Mountains.

Malgré le climat humide du Jura, les sécheresses sont de plus en plus fréquentes depuis le début du 21<sup>e</sup> siècle. Pour tenter d'en expliquer la cause, nous avons étudié le climat jurassien depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle en réalisant une analyse hydroclimatique pour plusieurs stations du Jura. En prenant en compte des paramètres tels que les températures, les précipitations et l'enneigement, nos résultats révèlent que les températures moyennes augmentent et que la saisonnalité des précipitations est perturbée.

Les sécheresses ont de lourdes conséquences sur les milieux aquatiques ainsi que sur l'approvisionnement en eau des populations. Pour nous en rendre compte, nous avons analysé les impacts des sécheresses de 2003 et 2018 sur deux communes jurassiennes, Pontarlier et Le Chenit. A travers des entretiens et une recherche documentaire, nous avons mis en évidence comment les modes de gestion locale de la ressource en eau s'adaptent à ces changements climatiques. En outre, nous savons désormais qu'une meilleure prévention des sécheresses passe par une gestion de l'eau plus intégrée ainsi que par la protection de l'environnement pour maintenir un cycle hydrique vertueux.

#### Mots clés

chaleur, sécheresse, changements climatiques, précipitations, températures, eau, approvisionnement en eau, adaptation, pénurie, massif jurassien.

## Table des matières

Remerciements	2 -
Abstract - Résumé	3 -
Chapitre I - Introduction	10 -
1.1. Des changements climatiques globaux aux impacts locaux	10 -
1.2. Le Jura et ses caractéristiques de moyenne montagne	15 -
1.3. L'eau potable : de la demande aux usages	22 -
1.4. Problématique & Objectifs de ce travail	33 -
1.5. Méthodologie : analyse binationale d'une région frontalière	34 -
Chapitre II - Les terrains d'étude	42 -
2.1 Le Chenit et la vallée de Joux	42 -
2.2 Pontarlier et la communauté de communes du grand Pontarlier	54 -
Chapitre III – Le massif jurassien et son climat : des changements en cours ?	62 -
3.1 Températures : les tendances observées	62 -
3.2 Modification des précipitations : une question de saisonnalité	67 -
3.3 Augmentation des sécheresses météorologiques	74 -
Chapitre IV - Impact des sécheresses sur la gestion de l'eau	91 -
4.1 La législation qui encadre les sécheresses	91 -
4.2 Impact des dernières sécheresses	94 -
4.3 Que retenir des sécheresses de 2003 et 2018 ?	101 -
Chapitre V – Synthèse générale	105 -
5.1 Analyse hydroclimatique	105 -
5.2 Analyse de la gestion de l'eau lors des sécheresses de 2003 et 2018	105 -
Chapitre VI – Discussion	107 -
Conclusion	111 -
Bibliographie	113 -
Références	113 -
Sources de données	123 -
Documents juridiques	123 -
Annexes	- 125 -

# Liste des annexes :

Annexe 1 - Les zones de protection de chaque pays selon le projet ALPEAU	125 -
Annexe 2 – Questions envoyées par mail.	127 -
Annexe 3 - Questionnaire type utilisé lors des entretiens	129 -
Annexe 4 - Organisation des communes de la vallée de Joux	130 -
Annexe 5 – Schéma synoptique du réseau d'eau de la vallée de Joux.	131 -
Annexe 6 – Vulnérabilité des aquifères de la vallée de Joux	132 -
Annexe 7 – Communes du Grand Pontarlier	132 -
Annexe 8 – Localisation de Pontarlier lors de la dernière période glaciaire	133 -
Annexe 9 – Sources karstiques majeures présentes sur le massif jurassien français	135 -
Annexe 10 – Délimitation des zones homogènes pour la gestion de l'eau dans le Doubs	136 -
Annexe 11 – Schéma synoptique du réseau d'eau de Pontarlier	137 -
Annexe 12 – Protection des captages de Pontarlier	137 -
Annexe 14 — Évolution des précipitations par saison depuis 1901:	140 -
Annexe 15 - Évolution des indices SPI depuis 1901	146 -
Annexe 16 - Résumé des bulletins météorologiques du Doubs de l'année 2003	149 -
Annexe 17 - Résumé des bulletins météorologiques du Doubs de l'année 2018	151 -
Annexe 18 – Communiqué de presse du canton de Vaud lors de la sécheresse de 2003	152 -
Annexe 19 – Stratégie actuelle et future de l'alimentation en eau de Pontarlier	153 -

## LISTE DES FIGURES:

Figure 1 : Zonage climatique du Jura selon MétéoSuisse	12 -
Figure 2 : Contexte géologique du massif jurassien	16 -
Figure 3 : Climatogramme de Besançon (245m) (Ouest du Jura), Pontarlier (837 m) (centre du Jura) et Neuc (485 m) (Est du Jura)	
Figure 4 : Localisation des lacs du Massif jurassien	18 -
Figure 5 : Les différents types d'aquifères	19 -
Figure 6 : Aquifère karstique selon Bakalowics modifié	20 -
Figure 7 : Démographie du massif jurassien	21 -
Figure 8 : Les étapes de la distribution de l'eau	23 -
Figure 9 : Schéma des réseaux ramifiés et maillés	24 -
Figure 10 : Répartition des empreintes hydriques d'un pays	30 -
Figure 11 : Les principaux usages de l'eau modifié	30 -
Figure 12 : Localisation des différentes stations sur le massif	36 -
Figure 13 : Localisation du Chenit	42 -
Figure 14 : Évolution de la population dans la vallée de Joux	43 -
Figure 15 : Part des frontaliers dans l'emploi des communes de l'Arc jurassien Suisse en 2020	44 -
Figure 16 : Localisation des chalets d'alpages dans la vallée de Joux	45 -
Figure 17 : Reliefs de la Vallée de Joux	46 -
Figure 18 : Carte hydrogéologique de La vallée de Joux : Localisation des sources d'eau	47 -
Figure 19 : Organigramme de la gestion de l'eau potable en Suisse	47 -
Figure 20 : Réseau de distribution de la vallée de Joux avant et après 2018	49 -
Figure 21 : Captage de la source du Brassus	50 -
Figure 22 : Les étapes de potabilisation des eaux de la source du Brassus	52 -
Figure 23 : Protection des points de captage de la vallée de Joux	53 -
Figure 24 : Localisation de la Ville de Pontarlier	54 -
Figure 25 : Évolution de la population de Pontarlier	55 -
Figure 26 : Les reliefs de Pontarlier	56 -
Figure 27 : Localisation des aquifères de l'Arlier par rapport à l'ancienne langue glaciaire datant de la derni période glaciaire (GK500-LGM) à Pontarlier	
Figure 28 : Organigramme de la gestion de l'eau potable en France	58 -
Figure 29 : Gestion de l'eau à Pontarlier	58 -
Figure 30: Réseau d'approvisionnement en eau de la ville de Pontarlier selon le service des eaux de la ville d Pontarlier, 2016)	
Figure 31 : Évolution de la moyenne annuelle des températures sur le massif jurassien depuis 1901	63 -
Figure 32 : Ecart des températures moyennes annuelles par rapport à la période 1981- 2020, depuis 1901 à Neuchâtel (485m) et La Chaux-de-Fonds (1017m)	
Figure 33 : Tendances des températures annuelles dans le Jura (°C/décennie) depuis 1901	65 -
Figure 34 · Tendances des températures saisonnières en Suisse denuis 1901 (°C/décennie)	- 66 -

Figure 35 : Évolution du nombre de jours de gel (jour dont la température minimale est inférieure à 0°C) pour stations de Neuchâtel (485 m), La Chaux-de-Fonds (1017 m) et Chaumont (1136 m) depuis 1901	
Figure 36 : Sommes annuelles des précipitations des différentes stations relevées depuis 1901	- 68 -
Figure 37 : Écarts des précipitations par rapport à la moyenne de 1901 à 2000 au Sentier — Les Bioux (1025 m aux Brenets (908 m)	
Figure 38 : Écarts des précipitations annuelles par rapport à la moyenne de 1981 à 2010 à Longirod (900 m), Couvet (728 m) et La Chaux-de-Fonds (1017 m)	
Figure 39 : Somme des précipitations en hiver (DJF) et en été (JJA) à Couvet (728 m), Longirod (900 m) et La Chaux-de-Fonds (1017 m) depuis 1901	- 71 -
Figure 40 : Tendances des précipitations annuelles et saisonnières Jurassiennes (%/décennie) de 1901 à 2020 -	- 72
Figure 41 : Tendances des précipitations saisonnières Jurassiennes (%/décennie) de 1990 à 2020	- 73 -
Figure 42 : Évolution de la part des mois en fonction de leur indice SPI depuis 1901	- 79 -
Figure 43 : Altitude du lac des Brenets lors des sécheresses de 1976 et 2003	- 81 -
Figure 44 : Altitude du lac de Joux lors des sécheresses de 1976 et 2003	- 82 -
Figure 45 : Évolution du niveau de la nappe de l'Arlier en 2003	- 83 -
Figure 46 : Températures moyennes estivales pour les stations de La Chaux-de-Fonds (1017 m), Chaumont (1 m) (ordonnée gauche) et Bâle(316 m), Neuchâtel (485 m), Genève-Cointrin (411 m) (ordonnée droit) depuis 2	2000.
Figure 47 : Niveau du lac des Brenets en 1976, 2003 et 2018	
Figure 48 : Évolution du niveau du lac des Brenets depuis 1975	- 86 -
Figure 49 : Niveau du lac de Joux en 1976, 2003 et 2018	- 86 -
Figure 50 : Évolution du lac de Joux depuis 1975	- 87 -
Figure 51 : Niveau de l'Orbe en 2003 et 2018	- 88 -
Figure 52 : Niveau de la nappe de l'Arlier en 2003 et 2018	- 88 -
Figure 53 : Évolutions des moyennes annuelles des chutes de neige depuis 1964	
Figure 54 : Évolution de l'écart des chutes de neige chaque hiver par rapport à la moyenne des hivers de 198	1 à
Figure 55 : Prise de mesures exceptionnelles en période de crise en Suisse	- 91 -
Figure 56 : Évolution du niveau d'alerte de juillet à octobre 2018 sur le département du Doubs	- 93 -
Figure 57 : Origines de l'approvisionnement en eau potable de Pontarlier en 2003	- 95 -
Figure 58 : Ravitaillement en eau d'un chalet d'alpage vaudois	- 96 -
Figure 59 : Tronçon du Doubs à sec en octobre 2018	- 97 -
Figure 60 : Origines de l'approvisionnement en eau potable de Pontarlier en 2018	- 98 -
Figure 61 : Niveau du lac Saint-Point à Oye-et-Pallet, en 2018	- 99 -
Figure 62 : Conduite d'eau devant raccorder deux alpages au réseau d'eau du Chenit	102 -
*sources disponibles sous chaque figure.	

<sup>- 7 -</sup>

## LISTE DES TABLEAUX ET EQUATIONS :

Tableau 1 : Table de la réglementation française au niveau des composants chimiques de l'eau distribuée au robinet	
Tableau 2 : Propriétés des stations retenues	37 -
Tableau 3 : Propriétés des données climatiques	38 -
Tableau 4 : Les données hydrométriques étudiées	39 -
Tableau 5 : Compétences de la gestion de l'eau au Chenit avant et depuis janvier 2021	48 -
Tableau 6 : Ressource en eau présents sur la commune du Chenit	51 -
Tableau 7 : Réservoirs d'eau présents au Chenit	51 -
Tableau 8 : Gestion de l'eau à Pontarlier	59 -
Tableau 9 : Valeur de l'indice SPI	75 -
Tableau 10 : SPI de Longirod (900m) depuis 1901	76 -
Tableau 11 : SPI de La Chaux de Fonds (1017m) et Couvet (900m) depuis 1901	77 -
Tableau 12 : SPI du Sentier – Les Bioux (1024m) et des Brenets (908m) depuis 1901	78 -
Tableau 13 : Indice SPI à la station des Brenets (908 m) entre 2000 et 2005	80 -
Tableau 14 : Indice SPI à la station du Sentier — Les Bioux (1025 m) entre 2000 et 2005	80 -
Tableau 15 : Indice SPI à la station des Brenets (908 m) entre 2015 et 2020	84 -
Tableau 16 : Indice SPI à la station du Sentier — Les Bioux (1025 m) entre 2015 et 2020	84 -
Tableau 17 : Mesures prises en période de sécheresse en fonction de l'intensité de l'alerte	93 -
Équation 1 : Calcul du SPI	74 -



Le Doubs, août 2020 (Cuenot A.)

## CHAPITRE I - INTRODUCTION

Phénomènes extrêmes aux conséquences importantes, les sécheresses semblent se multiplier ces dernières années sur le massif jurassien. Ressource essentielle, vitale mais fragile, l'eau est un bien directement touché lorsque le manque de précipitations apparaît. De l'assèchement des cours d'eau jusqu'à l'instauration de restrictions au niveau de la consommation, les récentes sécheresses dont celles de 2003 et 2018 ont impacté toute la gestion hydrique locale, obligeant les agents de l'eau à s'adapter. Le présent mémoire a pour objectif de construire une analyse autour de deux thèmes principaux : l'évolution hydroclimatique jurassienne et la gestion de l'eau potable en période de sécheresse. Le second objectif se concentre principalement sur deux communes dont Le Chenit, village du Jura suisse, et Pontarlier, petite ville du Jura français. Dans un premier temps, une introduction présente le contexte global des changements climatiques en cours, les caractéristiques du massif jurassien, les différentes particularités de la ressource en eau, ainsi que les questions de recherche, les objectifs et les méthodes de travail. Dans un second temps, les communes du Chenit et de Pontarlier, sont exposées à travers leurs caractéristiques physiques et humaines. Ensuite, une analyse hydroclimatique du massif jurassien est établie. Puis, une analyse des mesures mises en place au Chenit et à Pontarlier lors des sécheresses de 2003 et 2018 est réalisée. Les principaux résultats sont présentés dans un cinquième chapitre puis analysés dans la discussion. Finalement, la conclusion de ce travail propose des recommandations et perspectives pour d'éventuelles futures études.

#### 1.1. DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES GLOBAUX AUX IMPACTS LOCAUX

#### 1.1.1 DES TEMPERATURES QUI AUGMENTENT

Depuis quelques décennies, il a pu être observé des changements notables au niveau de la moyenne des températures partout dans le monde. Selon un rapport du GIEC¹ publié en 2015, la température moyenne globale a augmenté en moyenne de 0.85°C entre 1880 et 2012 (GIEC, 2015). Entre 1864 et 2017, cette hausse des températures moyennes s'élève à 2.0 °C pour la Suisse (CH2018, 2018).

La Terre a toujours connu des fluctuations au niveau de son climat, passant de périodes glaciaires froide, à des périodes plus chaudes. Contrairement à ces ères passées, les changements observés depuis ces dernières années sont plus **rapides** (Perroud & Bader, 2013). La fonte des glaces ou des calottes glaciaires illustre cela. Cette accélération est liée aux **émissions anthropiques²** mondiales qui ont considérablement augmenté depuis le milieu du 20<sup>e</sup> siècle (GIEC, 2015; Perroud & Bader, 2013). C'est le cas du CO<sub>2</sub>, un des gaz à effet de serre rejeté par les activités humaines et qui contribue à l'augmentation des températures (GIEC, 2018). Grâce à l'analyse de carottes glaciaires prélevées en Antarctique, le GIEC a mis en évidence en 2007 que la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère n'avait jamais été aussi importante depuis plus de 650 000 ans (MétéoSuisse, 2014).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Émissions d'origine humaine. On parle généralement des gaz à effet de serre provenant de l'activité humaine mais peut également désigner des rejets d'origine industrielle, ou urbains plus ou moins pollués.

Qu'il s'agisse du climat, des océans ou encore de la biodiversité, la modification des températures affecte toutes les différentes composantes de notre planète (Poitou et al., 2014). De plus, au regard des dernières canicules estivales ou des vagues de froid historiques, les phénomènes extrêmes liés aux températures semblent également se multiplier chaque année, provoquant toujours plus de dégâts et de victimes (De Bono et al., 2003). Les canicules de 2003, 2015 et 2018 sur le massif jurassien en sont des exemples. Le GIEC prévoit une augmentation des températures moyennes de 1.5°C partout dans le monde d'ici 2040 (GIEC, 2018), tandis que l'une de leurs modélisations<sup>3</sup> prévoit une élévation moyenne des températures en Suisse de 7.2°C en été et 5.4°C en hiver selon la localité (CH2018, 2018; Hydro-CH2018, 2021).

Les changements de température ne sont pas sans effet sur le reste du système naturel mondial : tous les phénomènes naturels en relation avec les températures sont également perturbés. Les océans se réchauffent et engendrent une modification des courants océaniques et atmosphériques. Cela se traduit par le changement de **régime des précipitations**, qui s'accentuent ou s'amenuisent, là encore en fonction des régions (MétéoSuisse, 2014).

#### 1.1.2 Un BOULEVERSEMENT DU CYCLE HYDROLOGIQUE CERTAIN

L'eau constitue une grande partie de notre Terre. Qu'elle soit gelée, sous forme de gaz ou liquide, la quantité d'eau est limitée. Ses différentes formes interagissent, évoluent et se transforment au cours des saisons, des années dans un **cycle hydrologique** fermé (Musy et al., 2014).

L'eau disponible en surface dans les lacs, les rivières, les fleuves, ne représente qu'une partie infime de la quantité totale d'eau présente sur Terre. En effet, seul 0.4% de l'eau douce disponible se trouve à **la surface de la Terre** dans les lacs et rivières (Blanchon, 2013). Une partie de cette eau douce est également disponible dans les glaciers et les sols gelés (69.5%) ou encore dans les réserves souterraines (30,1%) très présentes dans le massif jurassien.

Le cycle hydrologique terrestre est étroitement lié aux températures. La hausse des températures atmosphériques, liée aux émissions anthropiques, accentue l'évaporation au niveau des océans et rend l'atmosphère plus humide. En outre, un air chaud peut emmagasiner plus de vapeur d'eau qu'un air froid et occasionner ainsi des précipitations plus intenses (Planton et al., 2005). Cependant, ces changements ne sont pas homogènes sur la planète. « Si le changement est global, les impacts sont bien souvent locaux » (Boé, 2007). En se basant sur l'évolution des précipitations depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle, le rapport du GIEC (GIEC, 2013) met en évidence différentes tendances. Par exemple, les précipitations ont tendance à augmenter dans les régions de moyennes et hautes latitudes comme l'Asie du Nord et centrale, l'Amérique du Nord et du Sud ainsi qu'en Australie (GIEC, 2013). En revanche, les précipitations semblent faiblement diminuer et de manière non significative pour certaines régions tropicales et subtropicales comme le bassin méditerranéen, le Sahel ou encore l'Asie du sud-est et l'Afrique australe (Fallot, 2018a). Pour la France, le cumul annuel des précipitations semble augmenter pour la partie nord, mais diminuer dans le sud (Ouzeau et al., 2014). En Suisse, les précipitations annuelles ont légèrement augmenté au cours du siècle dernier, en particulier dans un

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Le scénario RCP8. 5. Il s'agit du plus pessimiste.

quart nord-est et en hiver (Fallot, 2018a; Hydro-CH2018, 2021). Cependant, il est difficile de constater une tendance significative dans l'évolution des précipitations à une échelle plus locale. Celles-ci dépendent de nombreux paramètres en plus de la température, comme la proximité à un océan ou l'altitude, facteurs extrêmement variables localement (Rathgeber, 2002).

Qu'elles apparaissent sous forme de pluie ou de neige, les précipitations constituent une part importante du cycle hydrologique. Elles **alimentent** les glaciers, puis les cours d'eau, les lacs, les nappes souterraines. Le réchauffement global bouleverse la totalité du cycle hydrologique.

Les modèles climatiques présagent une **augmentation des précipitations** au cours du 21<sup>e</sup> siècle dans les hautes latitudes, surtout en hiver. A contrario, elles devraient diminuer dans plusieurs régions des zones subtropicales, principalement l'été. En Europe, le Nord devrait donc devenir plus humide, tandis que les régions plus au sud devraient devenir plus sèches (GIEC, 2015; Fallot, 2018a). Étant située au centre du continent, la Suisse pourrait être confrontée à ces deux phénomènes. Les différents scénarios des futurs climats suisses mettent en évidence que d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle, le cumul des précipitations pour la saison hivernale pourrait augmenter de 10% d'ici 2050, tandis que le cumul des précipitations en été pourrait diminuer de 25% dans le pire des cas (CH2018, 2018).

Des différences pourraient également apparaître selon les régions de Suisse. Dans le rapport du National Centre for Climate Services (NCCS)(CH2018, 2018), 5 régions sont représentées : CHNE pour le Nord-Est de la Suisse, CHW pour sa partie Ouest, CHS pour le Sud des Alpes, ainsi que CHAE et CHAW pour les parties Est et Ouest respectives de la région alpine. Dans ce travail, il sera question du massif du Jura et donc de la partie Ouest de la Suisse, soit la région CHW (figure 1).

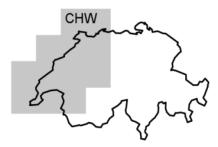


Figure 1 : Zonage climatique du Jura selon MétéoSuisse (CH2018, 2018).

Dans le Jura, le cumul des précipitations semble similaire aux relevés du rapport du National Centre for Climate Services (NCCS) (CH2018, 2018). Pour la période hivernale, plus particulièrement sur les mois de décembre et janvier, les scénarios prédisent d'ici 2060, une hausse des précipitations de 5% à 28% (CH2018, 2018). La diminution des précipitations estivales est quant à elle comprise entre 0% et -28% (CH2018, 2018).

Une évolution des précipitations pourrait également avoir un impact sur l'enneigement local. Comme le Jura est un massif montagneux, l'enneigement fait partie intégrante de son système hydrologique. Les cours d'eau jurassiens les plus élevés ont par conséquent un régime nivo-pluvial et sont influencés par les quantités de neige chaque année (Milano et al., 2015). Selon Serquet & Rebetez (Serquet & Rebetez, 2013), les changements climatiques en cours ont pour effet de diminuer l'enneigement dans le Jura vaudois. Entre 1979 et 2008, la diminution des précipitations neigeuses hivernales a baissé de 6% à 13% par décennie aux altitudes situées entre 800 m et 1100 m et de 4% à 10% par décennie entre 1100 m et 1400 m. La diminution de l'enneigement peut avoir un impact sur

l'écoulement des rivières. Notamment lorsque le pic d'écoulement provoqué par la fonte des neiges est précoce, il augmente la période de basses eaux (Milano et al., 2015).

#### 1.1.3 DES CONSÉQUENCES LOCALES MARQUÉES

Afin d'illustrer les conséquences locales des changements climatiques globaux, les bouleversements survenus ces dernières années sur le massif jurassien sont décrits dans cette partie, avec notamment la récurrence de phénomènes extrêmes.

Pour mettre en évidence un changement de précipitations pour une région donnée, les quantités totales de pluie tombées sont étudiées ainsi que l'échelle temporelle sur laquelle elles se déroulent. Les modèles climatiques montrent que les épisodes de **fortes précipitations** seront de plus en plus intenses et fréquents, sous forme d'orages notamment (SCNAT, 2016). Ainsi, de grandes quantités d'eau pourront tomber sur une échelle temporelle plus réduite. Ceci pouvant conduire à des situations catastrophiques, particulièrement au niveau de l'écoulement.

De gros **orages** sont par exemple survenus sur la région de Lausanne au début de l'été 2018, le 18 juin. Après une journée très chaude, de grosses cellules orageuses se sont créées et, en seulement 10 minutes, près de 41 mm d'eau sont tombés. Cela représente entre 37% et 75% de la quantité moyenne de pluie pour un mois de juin dans cette région (Fallot, 2018b). L'année suivante, de gros orages ont touché le Val de Ruz (NE) dans la nuit du 21 au 22 juin 2019. Lors de ces épisodes, l'équivalent de 3 mois de pluie pour cette localité sont tombés en 3 heures, provoquant de lourds dégâts (Guillaume, 2019).

La modification des précipitations sur le massif jurassien se traduit également par d'autres phénomènes extrêmes et tout aussi dramatiques, les épisodes de sécheresse. Là encore, 2018 peut être citée à titre d'exemple. Cette année-là, après un début d'année plutôt humide, l'été est sec et le manque d'eau est à déplorer. Les conséquences à la fin de l'été sont visuelles : le Doubs est **asséché** sur certains de ses tronçons, les lacs de la région ont perdu plusieurs mètres d'eau (figure page de garde) et certaines sources ne coulent plus. De plus, le niveau des nappes phréatiques a atteint un niveau critique en quelques semaines (OFEV et al., 2019). Depuis le début des mesures météorologiques, des sécheresses ont toujours été observées en Suisse comme en France. Au siècle dernier, elles ont fait d'importants dégâts en 1921, 1949 et 1976 (Perroud & Bader, 2013). Selon le GIEC (GIEC, 2013), aucune augmentation statistiquement significative du nombre de sécheresses n'est survenue lors du 20° siècle. En revanche, les récentes sécheresses, dont celles de 2003, 2006, 2011, 2015, 2018 ou encore 2019 et 2020, sont une esquisse alarmante pour la suite du 21° siècle. Selon les prévisions, les sécheresses devraient concerner davantage de régions dans le monde durant le futur. En Suisse, les épisodes de temps sec et de sécheresses pourraient aussi augmenter, notamment en été où les précipitations devraient diminuer (GIEC, 2015; Fallot, 2018a)

En résumé, les changements climatiques globaux en cours sur Terre ont également des répercussions à l'échelle locale. En Suisse, ils ont pour conséquence d'augmenter les précipitations en hiver, tout en diminuant les quantités de neige chaque année (Milano et al., 2015; Serquet & Rebetez, 2013). Ils engendrent également une diminution des précipitations en été, tout en favorisant l'apparition de violents orages (CH2018, 2018; Perroud & Bader, 2013). En outre, en fonction de leur apparition et de leur intensité, ces phénomènes modifient les quantités d'eau accessibles sur le territoire et ce, tout au long de l'année.

#### 1.1.4 Secheresse et definitions

Il est nécessaire de préciser les différents termes utilisés par les politiques, les scientifiques ou encore les médias lorsque l'on parle de sécheresse, afin de ne pas faire de confusions. La sécheresse est souvent confondue avec l'aridité, et ce car les sécheresses ont très souvent lieu dans des régions arides ou semi-arides (Chonchol, 1989). Or, ces termes ne signifient pas la même chose. L'aridité renvoie à un milieu possédant un climat très sec avec des précipitations annuelles inférieures à 200 mm (Chonchol, 1989). L'aridité est un terme utilisé pour qualifier un état constant et non épisodique comme les sécheresses (MétéoSuisse, 2019). Le terme canicule peut également être confondu avec la sécheresse. Néanmoins, une canicule est définie par « une vague de chaleur (étouffante) qui s'étend sur plusieurs jours consécutifs durant lesquels un seuil est dépassé » (MétéoSuisse, 2019). La canicule ne prend pas en compte l'eau dans sa définition. En Suisse, une canicule est mesurée à partir d'un indice appelé « Heat Index » (HI) qui prend en considération la température et le taux d'humidité de l'air. L'indice le plus élevé en Suisse est 4, le niveau 5 n'étant jamais atteint dans des régions comme l'Europe occidentale (MétéoSuisse, 2019). Plus généralement, en Europe occidentale, une canicule correspond à une température nocturne supérieure à 18-20 °C et une température journalière supérieure à 30-35 °C sur plusieurs jours (Sahabi-Abed & Kerrouche, 2018). Une canicule peut s'apparenter à un pic de chaleur, lorsque celle-ci dure moins de 48h, ou à une vague de chaleur lorsqu'elle dure plusieurs jours. Les canicules sont également de plus en plus fréquentes depuis ces dernières années sur toute l'Europe, notamment en été (Sahabi-Abed & Kerrouche, 2018).

Le terme sécheresse renvoie d'un point de vue général à un « incident climatique exceptionnel et relatif » (Brochet, 1977) associé à une anomalie du bilan hydrique. Par conséquent, une sécheresse renvoie à une période où une insuffisance voire une absence de précipitations se fait ressentir en se répercutant sur la disponibilité de l'eau dans le sol (OFEV et al., 2019). Cette période doit être assez importante pour que les écosystèmes terrestres soient affectés.

Il existe trois types de sécheresses (Soubeyroux et al., 2012). La sécheresse météorologique est caractérisée par un déficit prolongé des précipitations. C'est principalement celle-ci que nous retrouvons sur le massif jurassien après plusieurs semaines sans pluie. Il existe également la sécheresse agricole, qui correspond à un déficit d'eau dans les premières couches du sol (pouvant aller jusqu'à 2 mètres de profondeur). C'est la sécheresse du sol, qui a un effet sur la production agricole. Elle dépend des précipitations mais également de l'évapotranspiration des plantes, de la température, du vent, de la lithologie et de la faune locale. Enfin, la sécheresse hydrologique se définit par un niveau anormalement bas des lacs, cours d'eau et nappes souterraines. Cette sécheresse dépend également des précipitations et de la nature du sol (Soubeyroux et al., 2012). C'est une sécheresse hydrologique qui a été très visible en 2018 dans le Jura, lorsque les lacs ont vu leur niveau baisser et que certaines rivières se sont asséchées (Doubs). Une sécheresse est donc un phénomène complexe qui prend en compte de multiples paramètres tels que la recharge des réserves naturelles par les pluies, le ruissellement superficiel, la percolation vers les systèmes aquifères, l'évapotranspiration ou encore le débit des cours d'eau (Brochet, 1977; OFEV et al., 2019).

La temporalité est un paramètre à ne pas négliger lors de l'analyse de sécheresses. En effet, les causes de ces phénomènes peuvent être différentes selon la période à laquelle ils ont lieu. Par exemple, une sécheresse hydrologique qui apparaît en début de printemps peut être la conséquence d'un manque d'approvisionnement des réserves naturelles en automne ou en hiver (périodes propices à la recharge des nappes aquifères). A contrario, une sécheresse de début d'été sera probablement due à une augmentation des températures et/ou du rayonnement solaire, combinée à la croissance des

végétaux qui puisent considérablement dans les réserves (Brochet, 1977). Dans la majorité des cas, les sécheresses sont le résultat d'une combinaison de plusieurs facteurs. Il est possible de quantifier l'ampleur des sécheresses météorologiques avec l'Indice Normalisé de Précipitations (INP) développé par l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Celui-ci tient en compte cette question de temporalité car il est calculé à partir des précipitations de différents mois. Il permet de mettre en évidence à partir de quel moment une sécheresse a commencé à se constituer. Plus de précisions seront apportées dans le chapitre III.

#### 1.2. LE JURA ET SES CARACTERISTIQUES DE MOYENNE MONTAGNE

## 1.2.1 LA GEOGRAPHIE PHYSIQUE DU MASSIF

Le relief jurassien est constitué d'un ensemble géomorphologique caractérisé par des dépôts sédimentaires marins constitués de calcaire et de marne, qui se sont formés entre le Trias et le Crétacé (de -250 à -100 millions d'années) (Bichet & Campy, 2008). A cette période, la région était caractérisée par une géographie côtière marine de faible profondeur. C'est à la fin de l'ère tertiaire que le massif est apparu. La pression croissante des Alpes naissantes a engendré le plissement des séries sédimentaires. Le relief en forme de « croissant » qui en résulte constitue le Jura et contourne aujourd'hui le Nord-Ouest des montagnes alpines et du bassin molassique (Sommaruga, 2000). Le Jura comprend 4 zones bien distinctes. Il y a tout d'abord, la partie interne, le plissé interne ou encore la « Haute chaîne » de par ses altitudes plus élevées. Cette zone est composée par les plis, les chevauchements ou encore les décrochements. Plus bas en altitude, le « Jura externe » caractérisé par des plateaux est une région plutôt horizontale. Ces plateaux sont séparés par des faisceaux sous forme de décrochements. En marge de ces trois zones (Jura plissé, Jura externe, plateaux), les « Avants-monts » peuvent également être cités (figure 2) (Bichet & Campy, 2008). Il s'agit structures faillées de taille inférieure qui séparent le Jura et le fossé du Rhin au Nord (Bichet & Campy, 2008; Sommaruga, 2000). Ainsi, le Jura possède des sommets pouvant atteindre 1720<sup>4</sup> m, mais aussi des sites de plus basse altitude tels que les villes de Neuchâtel ou encore Besançon. Ces disparités géographiques se reflètent également sur le climat local.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Avec ses 1 720 mètres, Le crêt de la Neige est le plus haut sommet du massif du Jura (Ain, France).

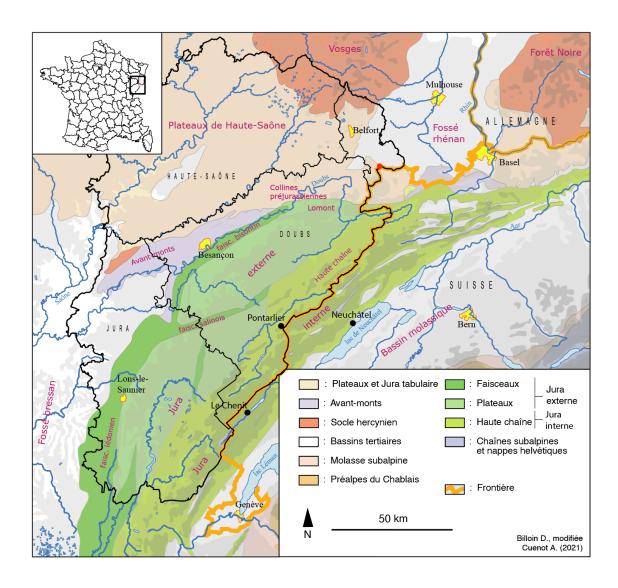


Figure 2 : Contexte géologique du massif jurassien d'après D. Billoin, image modifiée (Cuenot A. 2021)

#### 1.2.2 UN CLIMAT DE MOYENNE MONTAGNE

Du point de vue climatique, le Jura constitue une réelle **barrière naturelle**, en protégeant sa partie Est d'une partie de l'influence zonale océanique (Fallot, 2019). En outre, avec son éloignement des côtes océaniques et méditerranéennes, **l'influence continentale**<sup>5</sup> est relativement perceptible sur le massif jurassien. Ceci se traduit par des hivers froids et des étés chauds (Fallot, 2019; MétéoSuisse, 2018; Quantin, 1958). Les températures négatives peuvent atteindre **-40°C** en hiver dans certaines vallées où les conditions topographiques engendrent une accumulation d'air froid. C'est notamment le cas pour la vallée de la Brévine (NE) et la vallée de Mouthe (France) où il a pu être mesuré des records de température de -42.5°C et -36.7°C respectivement (Fallot, 2019; Joly & Gillet, 2017). A contrario, des températures supérieures à 30° ont été relevées en saison estivale à des altitudes avoisinant les 1000 m (MétéoSuisse, 2018; Fallot, 2019).

<sup>5</sup> Avec notamment la présence d'anticyclones en hiver et en été.

Tout comme pour les flux thermiques, le massif jurassien représente une barrière naturelle pour les flux de précipitations provenant de l'océan Atlantique. Cette particularité fait du Jura une région très humide. Les précipitations moyennes annuelles peuvent varier de 1200 à 2200 mm (Fallot, 2019). Ces moyennes varient également selon les altitudes. En effet, la moyenne des précipitations augmente en moyenne de 74 mm pour 100 m (Fallot, 2019). Ainsi, le haut massif sera plus arrosé que les localités situées en plaine (figure 3). Les moyennes pluviométriques suivantes illustrent ces propos : sur la période 1981-2010, les précipitations moyennes ont été de 1273 mm à la Brévine (NE) (1043 m), 1888 mm à la Dôle (VD) (1677 m) ou encore 1693 mm aux Charbonnières (VD) (1135 m). En revanche, elles ont été de 977 mm à Neuchâtel (485 m) et de 1005 mm à Genève Cointrin (GE) (411 m) (MétéoSuisse, 2020b). De plus, l'influence des flux océaniques rend le maximum pluviométrique plus important en hiver qu'en été sur la partie occidentale du massif. Sur le flanc Est, un phénomène de **foehn<sup>6</sup>** influence également la pluviométrie localement. Mais c'est l'influence continentale qui rend le maximum pluviométrique plus important en été (figure 3) (Fallot, 2019). Ainsi, avec des précipitations moyennes annuelles se situant entre 1 100 mm et 1 200 mm, le Jura est un milieu de moyenne montagne pouvant s'apparenter à un milieu humide (Berger & Chaussard, 1959). Son climat se définit par des étés doux, des hivers froids et des précipitations constantes toute l'année caractéristiques d'un climat semicontinental à influence montagnarde.

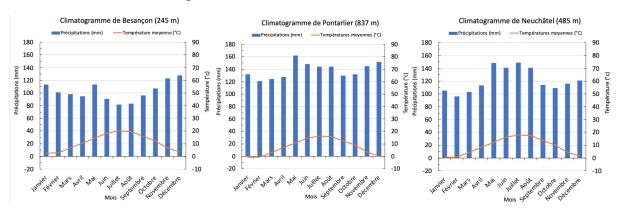


Figure 3 : Climatogramme de Besançon (245m) (Ouest du Jura), Pontarlier (837 m) (centre du Jura) et Neuchâtel (485 m) (Est du Jura) (climate-data.org, 2021).

## 1.2.3 L'HYDROLOGIE JURASSIENNE

L'hydrologie jurassienne est caractérisée par différentes formes de réserves d'eau. Les **réserves** d'eau en surface constituent un premier type de stockage. Il s'agit de toutes les formes d'eau accumulées en surface telle que l'eau de pluie interceptée par les végétaux et l'eau de stockage qui peut être présente dans les dépressions (Bakalowicz, 2000). Le Jura possède de nombreux lacs<sup>7</sup> qui stockent une certaine quantité d'eau tout au long de l'année. Le lac des Taillères (NE), le lac de Joux (VD) ou encore le lac Saint-Point (Doubs) constituent de véritables **réservoirs naturels** pour les populations environnantes. Des **réservoirs artificiels** formés par les retenues d'eau des barrages sont

\_

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Le fœhn est un vent local soufflant lorsqu'un fort courant franchit une chaîne de montagnes. Il se manifeste habituellement sous la forme d'un vent chaud et surtout sec qui descend le long du versant à l'abri du vent, alors que le versant exposé au vent peut subir des précipitations de barrage (Fallot, 2015).

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> 264 lacs dans la partie suisse de l'Arc jurassien (selon Hmamda et al., 2020).

également présents. Par exemple, les lacs de retenue formés par les barrages de Vouglans en France ou du Châtelot à la frontière franco-suisse constituent des réservoirs d'eau considérables (figure 4). Le massif jurassien possède également des bassins versants spécifiques appelés **bassins fermés**. Ces bassins sont caractérisés par l'absence d'exutoire. L'eau ne peut pas s'en écouler classiquement par une rivière. L'eau ne s'en échappe qu'à travers des systèmes d'infiltrations souterraines. On peut retrouver ce type de système au niveau du lac de Joux (VD) (Bosset, 1961; ISSKA, 2012).

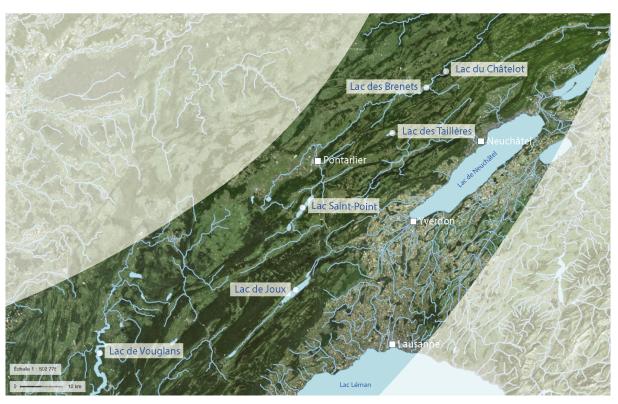


Figure 4: Localisation des lacs du Massif jurassien (Cuenot A, 2021).

D'importantes **réserves d'eaux souterraines** sont également présentes dans le Jura (Mangin, 1975). Dans sa thèse réalisée en 1975, Mangin écrit que « lors de précipitations, les eaux disparaissent très rapidement en profondeur ne laissant en général aucune réserve en surface » (Mangin, 1975). En effet, dans le Jura, entre 50% et 75% des précipitations **s'infiltrent** directement dans le sol (Luetscher & Perrin, 2005). Comment ce phénomène s'explique-t-il? Les roches jurassiennes sont en partie constituées de dépôts sédimentaires de marnes et de calcaires. La marne est très faiblement perméable; a contrario, le calcaire jurassien est une roche dure qui se fissure et se fracture très facilement, laissant s'infiltrer l'eau présente en surface. Cette fragmentation couplée à l'infiltration de l'eau engendre une érosion par dissolution spécifique appelée **« karstification »** (Derruau, 2010).

Le drainage, les sous-écoulements ou encore la percolation constituent les processus majeurs de cette infiltration. Les réserves souterraines sont caractérisées par des pores, des failles ou des fissures de volumes très variables présents dans les roches. Ils peuvent passer d'une taille très réduite à des volumes pouvant dépasser les 10 m³. Lorsqu'ils sont remplis d'eau, ces vides constituent les nappes. Les nappes libres sont les premières à être accessibles depuis la surface ; elles sont notamment constituées des nappes phréatiques d'où l'eau potable est majoritairement puisée. Il existe d'autres types de nappes dont les nappes captives, les nappes perchées ou encore les nappes alluviales (Fouché, 2016).

L'infiltration de l'eau en surface jusqu'aux nappes s'effectue à travers différentes couches plus ou moins perméables. Cet ensemble de couches est appelé aquifère. Il existe trois types d'aquifères, définis en fonction de leur **porosité** (présence de pores) et de leur **perméabilité** (capacité à laisser circuler l'eau) (figure 5) (Jacob & Boyer, 2009).

L'aquifère poreux est caractérisé par des roches sédimentaires meubles (sables, graviers) ou dures (grès, craie). Il est présent dans les bassins sédimentaires et les vallées des rivières. Lorsqu'il est placé sur une couche imperméable (ex. marne), l'aquifère poreux peut stocker d'importantes quantités d'eau (Sivelle, 2020). L'aquifère fissuré est composé de roches très peu poreuses et imperméables (ex. schistes). L'eau s'infiltre par les fissures et les failles qui le fracturent. Le volume d'eau stocké varie en fonction de la taille de ces failles (Fouché, 2016). Enfin, l'aquifère karstique est défini par un réseau hydrologique souterrain complexe constitué de cavités, de gouffres, de galeries et de rivières souterraines. Cet aquifère est majoritairement présent sur le massif jurassien (Bakalowicz, 2000; Sivelle, 2020).

D'un point de vue général, les zones aquifères constituent des réservoirs naturels d'eau capables de réguler les flux lors de périodes de sécheresse. Ils jouent un rôle de tampon. Cependant, la nature karstique des aquifères jurassiens rend leurs écoulements souterrains très variables d'une période à une autre, atténuant ainsi leur rôle de régulateur (Margat, 1989).

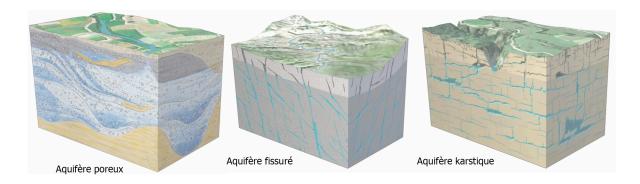


Figure 5 : Les différents types d'aquifères (OFEFP, 2003)

L'hydrogéologie d'un aquifère karstique s'organise de façon verticale. Au cours de son infiltration, l'eau rencontre 4 parties distinctes (figure 6). Premièrement **l'épikarst** est l'espace d'échange entre l'atmosphère et le système karstique. Cette couche peut avoir une épaisseur variable<sup>8</sup>, elle est la partie superficielle du karst. L'eau s'y infiltre et y est stockée temporairement avant d'être drainée en profondeur dans la zone d'infiltration (figure 6) (Bakalowicz, 2000). En profondeur, l'eau arrive dans la zone **épinoyée**, définie comme la partie de l'aquifère qui se situe entre les différentes **surfaces piézométriques**<sup>9</sup> (Gretillat, 1998; OFEFP, 2003). Enfin, la zone **noyée** correspond à la zone

-

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> De quelques mètres à quelques dizaines de mètres.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> La surface piézométrique est défini comme la limite supérieure de la zone saturée d'eau de l'aquifère. Elle évolue verticalement en fonction des basses eaux (étiage) et des hautes eaux (crues).

saturée d'eau en permanence. Le toit de la zone noyée est en connexion directe avec une source ou le niveau de base d'une rivière (Musy & Higy, 2004; Wanko, 2016).

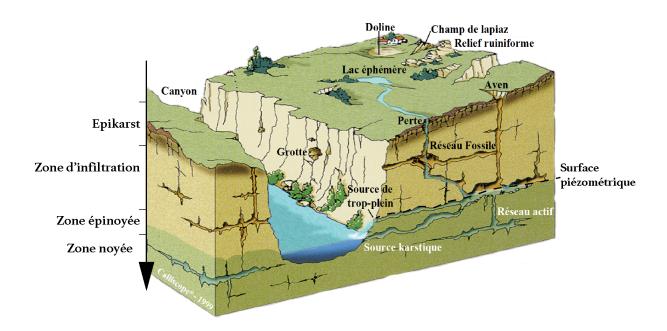


Figure 6 : Aquifère karstique selon Bakalowics modifié (Cuenot A., 2021)

Le massif possède également des **zones humides** et **marécageuses** d'une importance écologique non négligeable. Ainsi, près de 361 **tourbières** sont recensées, uniquement en Franche-Comté (Moncorgé & Gisbert, 2016). Ces zones imperméables constituent un réel système hydrologique indépendant qui régule les débits d'étiages l'été ou le rechargement des nappes phréatiques. De plus, ces milieux servent d'habitat pour de nombreuses espèces. Ces biotopes se développent à travers des conditions spécifiques<sup>10</sup>, ce qui les rend fragiles (Matthey, 1971).

Grâce à ses caractéristiques géologiques karstiques, le Jura possède de nombreuses cavités souterraines. On en compte près de 729 dans le département du Jura (Odent & Masson, 2003) et 1200 dans le Jura vaudois (Audétat et al., 2002). Celles-ci jouent un rôle très important puisqu'elles stockent les eaux de pluie, puis les restituent ensuite aux différents milieux. Elles permettent également de maintenir de l'eau dans les rivières lors de périodes de sécheresse. Une part importante de ces stockages d'eau est également utilisée pour la consommation humaine.

Comprendre le milieu karstique jurassien représente un travail complexe mais néanmoins nécessaire pour les gestionnaires de l'eau. En effet, il est indispensable de connaître à la fois le système

-

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> L'apparition et le maintien des tourbières dépendent de la topographie du milieu, de la température, de l'humidité et de l'acidité du sol. La végétation est également un facteur important.

en surface et dans sa partie souterraine pour réussir à modéliser les dynamiques de l'eau et ainsi pouvoir réguler sa distribution sur le massif du Jura (Bakalowicz, 2000).

#### 1.2.4 LE CONTEXTE HUMAIN DU JURA

Le Jura est un massif montagneux **transfrontalier**. De Genève à Bâle, il sépare des départements français tels que l'Ain, le Jura ou le Doubs de cantons suisses comme Genève, Vaud, Neuchâtel ou Jura (Bandelier, 2019). On y retrouve des agglomérations de plus de 20 000 habitants comme La Chaux-de-Fonds, Le Locle (NE), ou encore Pontarlier (Doubs) (figure 7). Ces territoires géographiquement proches évoluent conjointement de part et d'autre de la frontière. Dans certaines localisations, des coopérations transfrontalières ont été établies afin de connaître un meilleur développement territorial. C'est notamment le cas entre les communes de Morteau (France), Le Locle et La Chaux-de-Fonds (Suisse), qui se sont réunies au sein de l'agglomération urbaine du Doubs dès 2006 pour développer ensemble des projets transfrontaliers (OSTAJ, 2016).

Avec une population proche de 780 000 habitants (456 320 en France, 318 700 en Suisse) (Charton & Hmamda, 2018), le Jura connaît ces dernières années une croissance démographique. En cinq ans, la population sur la totalité du massif a augmenté de près de 8.3% (64 700 habitants), principalement autour des lacs pour la partie suisse et proche de la frontière côté français. Ce constat s'explique en grande partie par la localisation des bassins d'emplois et des 32 000 frontaliers français qui traversent quotidiennement la frontière pour travailler en Suisse (Hmamda et al., 2020). En effet, de nombreuses industries s'y sont développées au cours de ces dernières décennies, comme par exemple l'industrie horlogère ou la lunetterie qui sont sources de centaines d'emplois. Néanmoins, le Jura reste un espace où la ruralité est omniprésente. Des activités autres qu'industrielles s'y sont également développées : l'agriculture, avec l'importance de l'élevage et des filières fromagères, ainsi que le tourisme participent à la croissance économique de cette région (EPTB Saône & Doubs, 2011).

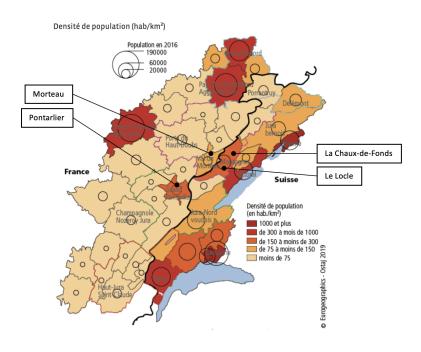


Figure 7 : Démographie du massif jurassien (OSTAJ 2019).

Le massif jurassien est un territoire contrasté entre **ruralité** et **urbanité**. Son agriculture, son industrie, mais aussi son tourisme le rendent dynamique et participent à sa croissance démographique. Toutefois, ces facteurs ont un impact notable sur la ressource en eau du massif. En effet, ils exercent quotidiennement une pression sur la demande en eau qu'il est indispensable de définir.

#### 1.3. L'EAU POTABLE : DE LA DEMANDE AUX USAGES

#### 1.3.1 DU MILIEU NATUREL AU ROBINET

En Suisse, près de 84% de l'eau consommée provient des **réserves souterraines**, dont 15% provient de **réserves karstiques** (Canton de Vaud, 2020). Dans le canton de Vaud, c'est près de 70% de l'eau potable consommée dans les communes qui provient de nappes souterraines (Canton de Vaud, 2020). En France, près des deux tiers des prélèvements d'eau pour la **consommation domestique** (66%) sont des eaux souterraines. En Franche-Comté, la part des prélèvements d'eau souterraine pour l'alimentation atteint près de 90% (Chataigner & Michon, 2017). L'eau stockée dans ces réserves souterraines est principalement prélevée par l'intermédiaire de **sources captées** ou de **puits de captation** (Canton de Vaud, 2020)

L'approvisionnement d'une population en eau potable nécessite plusieurs étapes. Dans un premier temps, la ressource doit être **prélevée** dans son milieu naturel. Puis, celle-ci est acheminée vers les différents lieux de **stockage** par l'intermédiaire du **réseau d'adduction**. Enfin, elle est envoyée dans le réseau de distribution jusqu'aux **consommateurs**. Cette distribution doit respecter les **normes** de **qualité**, de **quantité** et de **permanence** établies dans chaque pays (Eaufrance, 2018). Toutes ces étapes formes le **système d'AEP**<sup>11</sup> (Bochatay, 2004).

L'eau peut être prélevée depuis des **aquifères**, des sources, des lacs ou des **rivières**. Tout d'abord, le captage de l'eau à partir d'une source naturelle s'effectue au niveau des **résurgences**. A cet endroit, l'eau ressort à la surface car elle ne peut plus s'infiltrer ou a atteint son niveau maximal de stockage. Celle-ci est ensuite canalisée, pompée puis transportée jusqu'au bassin de décantation qui permet le dépôt du sable potentiellement présent dans l'eau. L'eau atteint ensuite le réservoir où elle est traitée, stockée et envoyée dans le réseau de distribution.

L'eau située dans des aquifères est captée grâce à un **puits**. Chaque puits est constitué d'un conduit plongé en profondeur pour atteindre l'aquifère. Au niveau de cette zone, une pompe achemine l'eau qui s'est introduite dans le conduit jusqu'en surface. Arrivée en surface, l'eau est traitée et stockée dans des réservoirs à travers le réseau d'adduction, puis envoyée dans le réseau de distribution (Bochatay, 2004).

Finalement, le **captage en surface** d'eau sous-lacustre ou provenant de rivières permet de pomper l'eau directement dans le milieu et de l'acheminer dans un réservoir ou elle sera traitée et stockée.

**L'adduction** est la partie du réseau qui transporte l'eau depuis son point de prélèvement jusqu'au lieu de stockage (figure 8). Deux types d'adductions existent : l'adduction gravitaire utilise un

\_

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> AEP: Alimentation en Eau Potable

écoulement naturel obtenu par simple effet de gravitation tandis que l'adduction par refoulement nécessite une source externe comme une pompe pour engendrer l'écoulement (Yonaba, 2015). L'adduction gravitaire est souvent favorisée puisqu'elle ne nécessite pas de pompe électrique, et donc pas de frais annuels. Néanmoins, dans certaines situations, les caractéristiques du milieu nécessitent d'employer l'adduction par refoulement (Cotting P., communication personnelle, le 14 janvier 2021).

Après avoir été traitée, l'eau est donc acheminée dans un **réservoir** de taille variable par le réseau d'adduction (figure 8). Son volume peut varier d'une dizaine à plusieurs milliers de mètres cubes. Ce réservoir garantit une quantité d'eau suffisamment importante pour les consommateurs tout au long de la journée, et particulièrement lors des périodes de forte demande. Les réservoirs d'eau ont également une partie de leur volume réservée à la lutte contre les incendies. Situés en hauteur par rapport au reste du réseau, les réservoirs permettent de mettre l'eau sous pression pour que l'écoulement se fasse de façon gravitaire.

Dans certains cas, le développement urbain, l'ancienneté des réservoirs ou tout simplement la topographie ne permettent pas de procéder à un écoulement gravitaire. Dans ce cas, des surpresseurs sont ajoutés au réseau pour que la pression soit suffisante et puisse être distribuée sur tout le réseau.

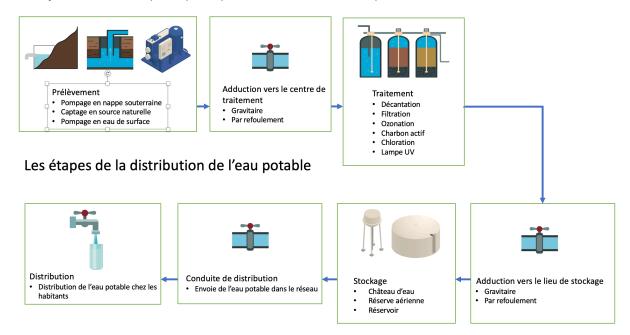


Figure 8 : Les étapes de la distribution de l'eau (Cuenot A. 2021)

Enfin, la distribution de l'eau depuis le lieu de stockage jusqu'aux consommateurs est établie à travers des **réseaux de canalisations** (figure 9). Ces derniers peuvent prendre la forme de réseaux **ramifiés<sup>12</sup>**, les plus souvent utilisés en zone rurale, ou la forme de réseaux **maillés<sup>13</sup>**, les plus courants en milieu urbain.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Réseau simple où l'eau est acheminée à travers un seul chemin.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Réseau plus complexe, où l'eau peut prendre différents chemins pour arriver à un point donné.

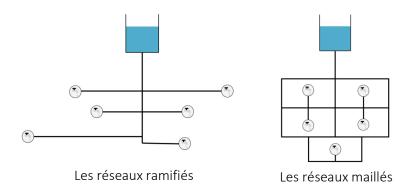


Figure 9 : Schéma des réseaux ramifiés et maillés (Cuenot A. 2020)

#### 1.3.2 LA PROTECTION DES EAUX

Le sol est une **interface filtrante** entre la surface et les réserves souterraines (Sinreich et al., 2005). A travers les différentes couches successives qui constituent le sol, l'eau qui s'infiltre est progressivement filtrée avant d'atteindre les zones de stockage. Selon l'épaisseur et la composition des couches, l'eau est plus ou moins bien filtrée. Les caractéristiques du sol karstique jurassien ne sont pas optimales pour la filtration de l'eau. En effet, en plus de sa composition chimique, le karst présent sur le massif possède différentes formes géomorphologiques typiques de milieux calcaires : les dolines, les gouffres, les lapiaz ou tout simplement les fissures (figure 6). Ces zones ne permettent pas une bonne filtration de l'eau car elle s'y écoule trop rapidement. Les réserves souterraines du massif sont donc très **vulnérables** aux pollutions créées en surface par les activités humaines (ISSKA, 2012). A titre d'exemple, les dolines ont longtemps été comblées par divers matériaux notamment pour aplanir le terrain en surface. Certaines dolines ont même été utilisées comme décharges. Ainsi, l'eau qui s'y infiltrait se retrouvait mélangée aux détritus et s'écoulait polluée dans les réserves souterraines (Muet & Vier, 2011).

**L'urbanisation** est un facteur de pollution important. Elle participe à **l'imperméabilisation** des sols, et rend la filtration naturelle plus difficile. Ce processus engendre également la concentration des polluants (Muet & Vier, 2011).

Tout comme l'urbanisation, **l'agriculture** peut aussi participer à la pollution de la ressource en eau. L'apport trop important d'engrais en surface peut rapidement se retrouver lessivé et transporté dans les cours d'eau ou les réserves souterraines (ISSKA, 2012).

Par conséquent, la **protection** de la ressource en eau est un enjeu sanitaire important. Les lieux de stockage et de prélèvement doivent être protégés au maximum contre d'éventuels polluants pouvant porter atteinte à la qualité de l'eau et la rendre impropre à la consommation.

En Suisse, la **Loi fédérale** sur la protection des eaux du 24 janvier 1991 (LEaux, RS 814.20) donne les consignes générales à suivre pour protéger les eaux souterraines et superficielles contre toutes atteintes nuisibles. Elle permet de protéger les ressources mais également de développer son utilisation de manière durable. **L'Ordonnance sur la protection des eaux** du 28 octobre 1998 (OEaux, RS 814.201) met en place les mesures particulières en fonction des caractéristiques hydrogéologiques locales. Elle

indique notamment les critères qui définissent chaque zone de protection ainsi que les mesures à prendre. Dans le canton de Vaud, cette législation est complétée par la **Loi sur la protection des eaux contre la pollution** du 17 septembre 1974 (LPEP RS 814.31), qui détermine les mesures d'application locales en fonction des vulnérabilités mesurées dans le canton.

En France, c'est la **Directive-cadre sur l'eau** du Parlement européen du 23 octobre 2000 (2000/60/CE, 2000), complétée par la **Loi sur l'eau et les milieux aquatiques** du 30 décembre 2006 (LEMA NOR DEVX0400302L), et des **Lois issues des Grenelles de l'environnement** du 3 août 2019 et du 12 juillet 2010 (NOR DEVX0811607L, ENE NOR: DEVX0822225L), qui encadrent la protection de la ressource en eau en établissant des mesures de protection contre la pollution et la détérioration des milieux. La **Directive du parlement européen relative aux eaux souterraines** du 12 décembre 2006 (2006/118/CE) accentue les mesures de protection pour les ressources souterraines.

En Suisse comme en France, la législation incite chaque commune à protéger ses captages en délimitant des aires et des zones de protection. Une aire de protection d'alimentation du captage (AAC) correspond à la zone où toute goutte d'eau tombée rejoint un jour le captage. Cette aire est définie via des études hydrogéologiques par des professionnels. Dans cette aire de protection, différentes zones de protection (ZP) (annexe 1) sont établies à partir de l'identification des sources potentielles de pollution pouvant nuire à la qualité d'un aquifère ou d'une source. Le zonage de protection autour d'un point de prélèvement est défini à travers des plans généraux développés en fonction de l'importance du risque, et des caractéristiques physiques du milieu comme le substratum rocheux<sup>14</sup>. Une roche fissurée n'a pas la même capacité de protection qu'une roche poreuse (Massenet, 2012). Hors contexte karstique, les zones en amont des points de pompage ou au-dessus des grandes nappes sont particulièrement protégées pour éviter tout risque de contamination pouvant nuire à la distribution d'eau potable aux habitants. Au vu des conditions hydrogéologiques du Jura, ces mesures doivent faire preuve de plus de précisions.

Dans le Jura suisse, cette protection est basée sur la **méthode EPIK** (Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques) (Doerfliger & Zwahlen, 2009) qui permet d'identifier les zones les plus sensibles en fonction de 4 facteurs dont la structure de l'épikarst<sup>15</sup>, la couverture protectrice, les conditions d'infiltration et le développement du réseau karstique. Par exemple, une zone possédant une épaisseur de couverture protectrice supérieure (autres formations non karstiques telles que les argiles, les grès ou les marnes) nécessite moins de protection qu'une zone où le calcaire affleure la surface (Sinreich et al., 2005). Cette méthode se base donc sur les caractéristiques géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques du bassin d'alimentation des captages à protéger. Grâce à ces facteurs, un indice de vulnérabilité est créé ; indice qui sera adapté aux zones de protection (ZP) citées précédemment.

En France, cette protection se base sur la méthodologie européenne appelée « COST 620 » (Sinreich et al., 2005) qui, tout comme la méthode EPIK en Suisse, cartographie les zones vulnérables à

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Roche et autres matières superficielles qui reposent sous la surface du sol.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Surface superficielle du karst, caractérisé par un réseau de fissures et de cavités qui collecte et transporte l'eau de surface en profondeur.

protéger. Dans le Jura, cette délimitation des zones de protection est complétée par la **méthode PaPRIKa**<sup>16</sup> (Dorfliger & Plagnes, 2009) spécifique aux aquifères karstiques.

Dans chaque pays, les mesures de protection sont établies selon un principe de protection équivalent développé à travers différentes zones (annexe 1). Elles délimitent un périmètre précis en fonction des risques de pollution. Les méthodes de protection des aquifères karstiques se veulent plus précises qu'une méthode classique et permettent une meilleure protection des zones les plus vulnérables. Après la consultation d'un hydrogéologue, elles se basent sur différents critères dont la variabilité spatiale des écoulements, la vitesse des écoulements, la localisation des zones d'infiltration ainsi que des niveaux de perméabilité des sols alentours (Bakalowicz, 2000).

#### 1.3.3 RENDRE L'EAU POTABLE

## 1.3.3.1 La règlementation

En Suisse et en France, ce sont les communes qui sont garantes de la sécurité sanitaire des eaux introduites dans le réseau et distribuées au robinet. Les communes peuvent gérer elles-mêmes cette distribution ou la déléguer à des syndicats ou des entreprises spécialisées. L'organisme en charge de la distribution est également responsable de la qualité de l'eau. L'eau doit respecter des normes très précises pour être considérée propre à la consommation.

En France, l'eau est l'aliment le plus contrôlé du pays. Sa qualité est à la fois soumise à des Directives européennes (directives 75/440/CEE, 79/689/CEE, 98 83/CE, 2000/60/CE) et des règlementations nationales (Loi sur l'eau de 1992, Loi relative à l'eau et aux milieux aquatiques (LEMA) de 2006, ou encore le décret 2007-49 relatif à la sécurité sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine du 11 janvier 2007) (ARS, 2014). Les organes responsables de sa qualité sont ceux qui gèrent sa production et sa distribution : les PRPDE<sup>17</sup>. Ils peuvent être des maires, des présidents de syndicat des eaux de communes, de communautés de communes, ou des exploitants privés (articles R1321-23 du Code de la Santé publique) (ARS, 2014). Les articles du code de la santé publique définissent les règles que les producteurs et les distributeurs d'eau doivent respecter. Ces articles font état de la vérification régulière du fonctionnement des installations et des mesures prises en cas de contamination, ainsi que d'un programme de tests et d'analyses de contrôle de la qualité de l'eau à effectuer. Ils recommandent également la tenue d'un fichier sanitaire recueillant l'ensemble des informations collectées. Ces règles doivent être respectées par les PRPDE. C'est l'Agence régionale de santé (ARS) qui est en charge des inspections contrôles.

La réglementation française établit la **potabilité** d'une eau à travers des **normes** définissant des limites à ne pas dépasser. Ces normes limitent la présence dans l'eau de **micro-organismes**, de **parasites** ou encore de **produits chimiques**. Le traitement de l'eau a donc pour objectif de protéger les populations des micro-organismes pathogènes et des impuretés désagréables ou dangereuses pour la santé des consommateurs. L'annexe 1.1 du décret d'application 2001-1220 de la Directive européenne

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Protection des aquifères karstiques basée sur la protection, le réservoir, l'infiltration, et le degré de karstification

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> PRPDE: personnes responsables de la production ou de la distribution de l'eau.

98/83 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, définit les normes de potabilité au niveau européen. Il s'agit de normes strictes, définies par des Directives européennes, suivant elles-mêmes les valeurs guides de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Les exigences de qualité sont séparées en deux niveaux : les références de qualité et les limites de qualité (tableau 1). Les limites de qualité correspondent aux différents éléments dont la présence dans l'eau peut engendrer un risque pour le consommateur. C'est notamment le cas des sulfates qui, à forte dose, peuvent être dangereux pour la santé humaine (Décret n°2001-1220 NOR MESX0100156D, 2001). Les références qualités, quant à elles, correspondent à des éléments qui « peuvent mettre en évidence un dysfonctionnement des installations de traitement ou être à l'origine d'inconfort ou de désagrément pour le consommateur » (tableau 1) (ARS, 2014). C'est le cas du taux NFU, qui illustre la turbidité de l'eau. Ce taux ne doit pas dépasser la valeur de 1.

Tableau 1 : Table de la réglementation française au niveau des composants chimiques de l'eau distribuée au robinet (Agences régionales de santé, 2014)

Paramètres microbiologiques	
Bactéries coliformes	0 / 100 mL
Bactéries sulfito-réductrices y	0 / 100 mL
compris les spores	
Numération de germes aérobies revivifiables à 22°C et à 37°C	Variation dans un rapport de 10 par rapport à la valeur habituelle
Paramètres chimiques	
Aluminium total	200 μg/L
Ammonium	0,1 mg/L
Carbone organique total (COT)	2,0 mg/L et aucun changement anormal
Chlore libre et total	absence d'odeur ou de saveur désagréable et pas de changement anormal
Chlorites	0,20 mg/L; sans compromettre la désinfection, la valeur la plus faible possible doit être visée
Chlorures	250 mg/L
Conductivité	entre 180 et 1 000 μS/cm à 20°C ou entre 200 et 1 100 μS/cm à 25°C les eaux ne doivent pas être corrosives
Couleur	acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal notamment une couleur inférieure ou égale à 15 mg/L de platine
Cuivre	1,0 mg/L
Equilibre calco-carbonique	les eaux doivent être à l'équilibre calco-carbonique ou légèrement incrustantes
Fer total	200 μg/L
Manganèse	50 μg/L
Odeur	acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal notamment pas d'odeur détectée pour un taux de dilution de 3 à 25°C
Oxydabilité au permanganate de potassium	5,0 mg/L O <sub>2</sub> (mesurée après 10 minutes en milieu acide)
pH	compris entre 6,5 et 9 unité pH
'	les eaux ne doivent pas être agressives
Saveur	acceptable pour les consommateurs et aucun changement anormal notamment pas de saveur détectée pour un taux de dilution de 3 à 25°C
Sodium	200 mg/L
Sulfates	250 mg/L
Température	25 °C
Turbidité	0,5 NFU au point de mise en distribution 2 NFU aux robinets normalement utilisés pour la consommation humaine
Paramètres indicateurs de radi	oactivité
Activité alpha globale	En cas de valeur supérieure à 0,10 Bq/L, il est procédé à l'analyse des radionucléides spécifiques
Activité bêta globale résiduelle	En cas de valeur supérieure à 1,0 Bq/L, il est procédé à l'analyse des radionucléides spécifiques
Dose totale indicative (DTI)	0,10 mSv/an
Tritium	100 Bq/L

Paramètres microbiologiques		
Escherichia coli (E. coli)	0	/100 mL
Entérocoques	0	/100 mL
Paramètres chimiques		7100 IIIE
Acrylamide (1)	0,10	μg/L
Antimoine	5.0	μg/L
Arsenic	10	μg/L
Baryum	0.70	mg/L
Benzène	1,0	μg/L
Benzo[a]pyrène	0,010	μg/L
Bore	1.0	mg/L
Bromates (2)	10	μg/L
Cadmium	5.0	μg/L
Chlorure de vinyle	0,50	μg/L
Chrome	50	μg/L
Cuivre	2,0	mg/L
Cyanures totaux	50	µg/L
1,2-dichloroéthane	3.0	μg/L
Epichlorhydrine (1)	0,10	μg/L
Fluorures	1,50	mg/L
Hydrocarbures aromatiques	0,10	μg/L
polycycliques (HAP) (3)	,	1-3-
Mercure	1,0	μg/L
Total Microcystines	1,0	μg/L
Nickel	20	µg/L
Nitrates (4)	50	mg/L
Nitrites (4)	0,50	mg/L
Pesticides (5)	0,10	μg/L
Total pesticides	0,50	μg/L
Plomb (6)	10	μg/L
Sélénium	10	μg/L
Tétrachloroéthylène et	10	μg/L
Trichloroéthylène		
Total trihalométhanes (THM)	100	μg/L
(2) (7)		
Turbidité	1,0	NFU

En Suisse, la qualité de l'eau est régie par l'Ordonnance du département fédéral de l'intérieur (DFI) sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douches accessibles au public datant du 16 décembre 2016 (OPBD RS 817.022.11): chaque canton doit garantir une eau potable à ses habitants. Selon l'art. 26 de la Loi fédérale sur les denrées alimentaires datant du 20 juin 2014 (LDAI RS 817.0), ce sont les distributeurs qui sont chargés de l'autocontrôle de la qualité de l'eau. Chaque canton engage des inspecteurs indépendants pour garantir un niveau de sécurité supplémentaire (Bellanger, 2010). Tout comme en France, la potabilité se traduit par des exigences physico-chimiques et microbiologiques. Les normes physico-chimiques sont inscrites dans l'Ordonnance sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douches accessibles au public du 16 décembre 2016 (OPBD RS 817.022.11). La Confédération y indique les valeurs qu'une eau ne doit pas dépasser après traitement. Ces valeurs sont relativement semblables aux normes françaises.

Plus localement, dans le canton de Vaud, les normes de potabilités fédérales sont complétées par l'article 2 de la Loi sur la distribution de l'eau datant du 30 novembre 1964 (LDE RS 721.31). L'article stipule notamment le fait que chaque distributeur doit procéder à un autocontrôle de la qualité des eaux distribuées localement. Cet autocontrôle est particulièrement encadré par le travail d'échantillonnage du laboratoire cantonal qui tient ses directives de l'Ordonnance sur les denrées alimentaires et les objets usuels du 16 décembre 2016 (ODAIOUS RS 817.02).

## 1.3.3.2 Les différents traitements de l'eau

Les eaux sont traitées de manières différentes selon leur origine. La qualité de l'eau brute détermine le type de traitement à utiliser. Par exemple, une eau de surface est plus fréquemment contaminée (par des substances chimiques telles que le fer, l'arsenic, les nitrates ou les produits phytosanitaires) qu'une eau souterraine qui aura été naturellement filtrée par les couches géologiques successives. Elle devra donc passer par un traitement beaucoup plus poussé et nécessitera une désinfection obligatoire.

Différentes étapes sont nécessaires pour traiter l'eau avant de pouvoir la distribuer aux consommateurs. On distingue tout d'abord les étapes de **prétraitement** dont le dégrillage et le tamisage, qui permettent d'enlever les plus gros déchets. Puis, la **clarification** par le décantage permet aux plus petites matières en suspension d'être évacuées. Elle est indispensable pour les eaux de surface et les eaux souterraines provenant de plateaux calcaires (Bissig, 2004). Cette étape peut nécessiter l'ajout de produits coagulants afin d'agglomérer les plus petits sédiments entre eux. Viens ensuite l'étape de **filtration**. Celle-ci peut être réalisée par l'intermédiaire de différents matériaux comme le sable ou le charbon actif. Une filtration membranaire peut également être utilisée lorsque des micro particules subsistent. Finalement, c'est l'affinage qui permet de désinfecter l'eau. Elle a pour but de neutraliser les virus et bactéries pathogènes. Les désinfections au chlore ou à l'ozone sont les plus répandues. Dans certaines situations, les ultraviolets sont également employés en complément de toutes ces étapes. Des Lampes UV sont notamment utilisées dans les réservoirs pour maintenir le stockage de l'eau potable (Eaufrance, 2018).

La qualité de l'eau est minutieusement contrôlée tout au long de son traitement, et l'eau disponible aujourd'hui aux robinets suisses et français est de bonne qualité (ARS, 2014 ; ArcInfo, 2019). Préserver davantage la ressource permet de diminuer les traitements nécessaires à la rendre potable. Néanmoins, les activités humaines, dont l'agriculture ou l'industrie peuvent encore être des menaces

pour la qualité des eaux. Le contrôle de qualité de cette ressource est donc primordiale car le risque zéro n'existe pas.

## 1.3.4 L'OR BLEU ET LES PREMISSES DE FUTURS CONFLITS D'USAGE

#### 1.3.4.1 Usage et définition

Avant de parler d'usage, il est important de revenir sur l'utilisation de l'eau par les Hommes. Aujourd'hui, l'eau est un bien économique (Erhard-Cassegrain & Margat, 1979). Elle est un bien de consommation, de production, de protection ou encore de support d'activités. Elle est utilisée pour satisfaire les divers besoins humains, en cela c'est un élément indispensable aux activités humaines (Babillot & Le Lourd, 2000). L'utilisation de l'eau est complexe à analyser puisqu'elle découle de termes plutôt théoriques liés aux Hommes (usage, demande) et de termes liés à l'infrastructure technique du cycle d'usage de l'eau (prélèvement, restitution).

Le **prélèvement** est lié à un volume d'eau extrait du milieu naturel, pour un usage spécifique (Calianno et al., 2017). Les volumes prélevés s'effectuent à partir des quantités d'eau que les Hommes ont besoin. Ce besoin se réfère à une quantité théorique qu'un distributeur doit fournir aux usagers quotidiennement (Zoungrana, 2003). En France, cette quantité est représentée par la « consommation annuelle de référence », qui est de l'ordre de 120m³ pour un foyer de 2 adultes et 2 enfants par an (Barbier & Montginoul, 2013). Cette référence est une approximation utilisée pour estimer le besoin quotidien en eau d'une population (ARS, 2014).

La **distribution** est définit par le volume d'eau distribué au consommateur par l'intermédiaire d'un réseau d'eau. Tout au long de sa distribution, l'eau peut être confrontée à diverses fuites dans le réseau. En moyenne, 20% de l'eau prélevée retourne dans la nature par une fuite. Il s'agit de perte. Le volume d'eau prélevé n'est pas la même que le volume consommé. La quantité d'eau qui arrive réellement au consommateur est appelée « apport ». Après avoir été utilisé par le consommateur, l'eau « retourne au milieu naturel ». Elle est alors défini comme étant un rejet (Calianno et al., 2017).

Il faut bien distinguer l'emploi des termes **consommation**, **demande** et **usage**, qui font référence à l'utilisation de l'eau par l'Homme (Calianno et al., 2017). Ces trois termes ne sont pas synonymes et représentent des unités différentes pour la gestion de l'eau.

La consommation renvoie au fait d'extraire l'eau de son milieu naturel pour un usage, sans la remettre directement dans la nature. Aujourd'hui, le volume d'eau prélevé pour la consommation peut également être assimilé à l'empreinte hydrique (EH) (figure 10). C'est un indice qui permet de déterminer combien d'eau douce un pays ou une personne consomme de manière directe (boire, se doucher), ou indirecte par l'intermédiaire des biens et des services qui ont requis de l'eau pour être disponibles. Par conséquent cette EH peut être interne quand l'eau est consommée directement dans le pays, ou externe par le biais de biens et services produits à l'étranger. En Suisse, l'empreinte externe représente 82% de l'empreinte hydrique globale. En France elle est de 47% (Felix Gnehm, 2011; Thouvenot, 2012).

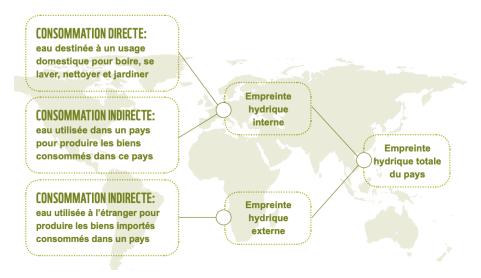


Figure 10 : Répartition des empreintes hydriques d'un pays selon WWF 2012.

La **demande** peut être définie comme la quantité d'eau utilisée par les populations locales pour subvenir à leurs besoins (Calianno et al., 2017). Il s'agit d'une notion théorique qui matérialise les besoins en eau d'une population. Cette notion se traduit alors par un volume appréciable (Lamy & Lassabatere, 2010).

Enfin, les **usages** sont séparés dans des catégories distinctes. En Europe, les usages de l'eau sont comparables entres les pays et regroupent majoritairement l'agriculture, l'industrie, les usages domestiques et les loisirs (figure 13) (Commission européenne, 2012). En Suisse, les principaux usages de l'eau sont destinés à la consommation domestique (25 %), à l'irrigation pour l'agriculture (20 %) et à l'industrie (dont production d'énergie) (55 %) (Felix Gnehm, 2011; Schädler, 2016). En France, l'agriculture représente 48% des usages, suivi de la consommation domestique (24%), de l'énergie (22%) et de l'industrie (6%) (Thouvenot, 2012). Chaque territoire possède des usages différents en fonction de ses activités. Dans le Jura par exemple, la partie suisse plus peuplée et industrialisée a une part beaucoup plus importante consacrée aux usages industriels et domestiques, que la partie française (Hmamda et al., 2020). Ces usages peuvent cohabiter sans poser de problème ou, dans certains cas, aboutir à une concurrence certaine. C'est notamment le cas en Suisse entre l'hydroélectricité et la pêche ou encore entre le tourisme et l'agriculture. Dans ces cas, des conflits d'usage peuvent apparaître (Musy et al., 2014).

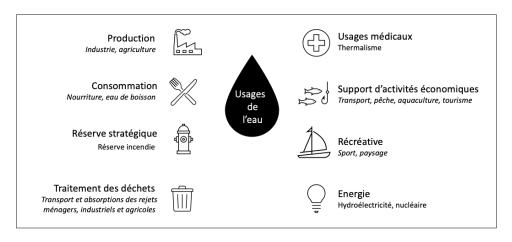


Figure 11: Les principaux usages de l'eau modifié d'après Reynard (2001) et OIEau (2018), 2021.

## 1.3.4.2 Des rivalités pouvant aboutir à des conflits d'usage

Depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle, le développement des activités humaines, la croissance démographique et l'augmentation de la consommation ont eu pour conséquence d'accroître l'utilisation de l'eau en France comme en Suisse (Chazot et al., 2012 ; Schädler, 2016). Cependant, depuis les années 1970, la consommation en eau potable française et suisse a tendance à stagner voir légèrement diminuer. La consommation domestique journalière moyenne actuelle d'un Suisse est de 162 litres, celle d'un Français est de 147 litres (Service de l'observation et des statistiques, 2017; OFEV, 2020). Dans l'Arc jurassien, cette consommation journalière est de l'ordre de 150 à 200 litres d'eau (Hmamda et al., 2020). Les collectivités consomment également une quantité d'eau importante, notamment au niveau des hôpitaux (150 litres par jour pour un lit d'hôpital), des piscines (100 mètres cubes par jour) ou encore des espaces verts, entre 5 et 10 litres par mètre carré) (Schädler, 2016).

Concilier la quantité d'eau disponible avec les besoins de la population est aujourd'hui un enjeu majeur. Lorsque la part des besoins dépasse 40% de la quantité totale de la ressource en eau potable disponible dans une région donnée, un stress hydrique apparait. Lorsque celui-ci devient trop important, il peut conduire à une pénurie d'eau (Roussel, 2017). Il est important de préciser qu'un stress hydrique ne renvoie pas obligatoirement à une période sèche, car il peut aussi être engendré par une surexploitation ou une contamination de la ressource par l'Homme. Un stress hydrique incorpore donc une dimension de quantité mais également de qualité de l'eau, notamment en cas de pollution (Milano et al., 2015). La temporalité est aussi à prendre en compte puisque dans certaines localités, le manque d'eau a lieu lorsque les activités humaines en demandent le plus ; c'est notamment le cas en saison estivale sur le Jura. Sur le massif jurassien, les situations de stress hydrique sont généralement des phénomènes limités dans le temps, observables au niveau local. Cependant, selon l'article de Milano et al., (Milano et al., 2015), les stress hydriques risquent d'augmenter à l'avenir.

Avec la diminution des quantités d'eau disponibles, une véritable concurrence entre les différents usages apparait. L'eau qui est aujourd'hui disponible pour l'agriculture, l'industrie, le tourisme et les usages domestiques, pourrait à l'avenir devenir source de conflits (Barone, 2010). Les rivalités entre ces différents besoins apparaitront l'été, lorsque la quantité d'eau sera la plus faible. Dès lors, les usages essentiels, qui correspondent aux intérêts primordiaux d'une commune ou d'un pays, doivent être déterminés de manière à ce que l'eau leur soit réservée. A titre d'exemple, lors de la sécheresse de 2018, les usages domestiques l'avaient emporté face aux enjeux écologiques avec la diminution de certains lâchers d'eau dans le Doubs, situation développée plus loin (ch.4.2.2.3) (Resch J.N., communication personnelle, 16.03.2021).

La définition générale d'une bonne gestion des ressources en eau prônée par la GIRE<sup>18</sup> (ONU Environnement, 2018) est définie par un modèle conceptuel équilibré entre qualité, quantité et dynamisme. Ce modèle qui prône une meilleure gestion des ressources en eau fut introduit lors du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992 (Milano & Reynard, 2018). Milano & Reynard (2018), discutent de l'importance de la gestion des ressources en eau dans une crise. Cette gestion peut notamment passer par l'augmentation du prix du m³, par la baisse de la pression, ou encore par des restrictions (Hmamda et al., 2020). Il n'existe pas de modèle unique de gestion de crise. Elle doit être adaptée à chaque crise, afin de répondre au maximum aux enjeux territoriaux, sociétaux et écologiques

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Gestion intégrée des ressources en eau.

locaux. Le but d'une bonne gestion intégrée est de réguler la demande avec la disponibilité de la ressource, afin d'obtenir un accès à une eau propre, abordable et en quantité suffisante pour satisfaire les besoins de boisson, de lavage et de subsistance à la population (Cook & Bakker, 2012). Des objectifs qui renvoies directement au concept de sécurité hydrique. Celui-ci place les besoins primordiaux en eau de l'individu au cœur des stratégies de gestion de la ressource. Il intègre notamment une meilleure planification territoriale ainsi qu'un développement plus durable de la distribution des ressources en eau (Cook & Bakker, 2012). Ainsi, la sécurité hydrique et la gestion intégrée de la ressource en eau sont des principes complémentaires qu'il faut traiter conjointement lorsqu'une crise apparait. Ces deux concepts sont indispensables à la gestion et au développement d'une meilleure distribution de l'eau potable (Chahed et al., 2014).

#### 1.4. Problematique & Objectifs de ce travail

Comme nous avons pu le voir dans la première partie de cette introduction, les changements climatiques affectent les températures moyennes et entrainent un bouleversement du cycle hydrique de la planète. Ces changements se ressentent aussi bien à l'échelle globale qu'à l'échelle locale. Si l'on se focalise sur l'Europe, on peut s'apercevoir que les modifications sur le climat divergent selon les localités, en fonction de la latitude, de la distance à l'océan mais également de l'altitude. Dans le Jura, ces changements semblent modifier la répartition des précipitations au cours de l'année, engendrant des périodes plus sèches et d'autres plus humides, tout en augmentant les évènements extrêmes tels que les gros orages ou les sécheresses.

Comme discuté en deuxième partie d'introduction, le massif jurassien se caractérise par la formation karstique de son substratum et par l'importance de son réseau hydrique souterrain. Son climat est défini par des précipitations importantes qui s'infiltrent rapidement dans le sol perméable, limitant ainsi les ressources hydriques en surface. Les récentes sécheresses de 2003 et 2018 ont fortement impacté le Jura. Elles ont notamment conduit au tarissement de certaines réserves en eau potable de la région, obligeant les personnes en charge de la gestion de l'eau à s'adapter et trouver des solutions afin de maintenir l'approvisionnement des usagers.

Finalement, la troisième partie de cette introduction a mis en évidence les composantes d'un système de gestion de l'eau ainsi et des nouveaux enjeux qui apparaissent autour de la ressource en eau dans le contexte des changements climatiques observés sur le massif jurassien.

Les articles scientifiques et rapports officiels publiés montrent que la problématique de l'approvisionnement en eau des populations est aujourd'hui plutôt bien étudiée (Reynard, 2000 ; Zoungrana, 2003; Bissig 2004; Zella & Smadhi, 2010; Calianno et al., 2017; Milano et al., 2018). Les sécheresses et leurs conséquences sur la gestion locale de l'eau semblent relativement bien approfondies. Néanmoins, la plupart de ces recherches ont été faites pour des régions plutôt chaudes telles que la Californie (Rinaudo, 2013), le bassin méditerranéen (Alibou, 2002; Loubier et al., 2008; Milano et al., 2012; Bouaicha & Benabdelfadel, 2019), et São Paulo (Milano et al., 2018), ou bien pour des régions de haute montagne (Ducos, 1992; Reynard, 2000, 2001; Nettier et al., 2010). En revanche, la gestion de l'eau dans une région de moyenne montagne semblable au Jura semble encore modérément étudiée. La plupart des travaux qui étudient les impacts des changements climatiques dans le Jura le font du point de vue de la biodiversité uniquement (Meisser et al., 2013; Buffat, 2016; Arzel et al., 2019;). Cela nous renvoie directement à la problématique de ce travail : « Sécheresse sur le massif Jurassien: Quels impacts sur la gestion des ressources en eau? ». En effet, au regard des récentes sécheresses qui se sont produites dans le Jura et de leurs impacts sur les volumes d'eau potable disponibles, nous pouvons nous demander comment les personnes en charge de la distribution de l'eau se sont adaptées afin de maintenir l'accès à l'eau potable aux populations jurassiennes.

Nous aborderons cette problématique à travers deux objectifs. Dans un premier temps, nous souhaitons réaliser une analyse hydroclimatique du Jura, en examinant les caractéristiques des différentes sécheresses passées et leurs impacts sur les réserves en eau du massif à travers l'étude de 13 stations climatologiques et pluviométriques (ch 1.5.1). A travers cela, nous souhaitons pouvoir répondre aux questions suivantes :

- Comment les températures évoluent-elles depuis le début du 20e siècle ?
- Les précipitations sur le massif jurassien deviennent-elles moins importantes ?

- Comment évolue l'enneigement sur le massif jurassien ?
- Les sécheresses sont-elles de plus en plus récurrentes ?

Le second objectif s'oriente sur la gestion de l'eau. Celui-ci passe notamment par une étude des effets des récentes sécheresses sur la gestion de l'eau de deux communes du massif jurassien, soit Le Chenit dans le canton de Vaud en Suisse, et Pontarlier dans le département du Doubs en France. Ici, nous souhaitons pouvoir répondre aux interrogations suivantes :

- Les ressources en eau potable sont-elles de moins en moins importantes au Chenit et à Pontarlier ?
- Les sécheresses de 2003 et 2018 ont elles eu un impact sur la gestion de l'eau potable du Chenit et de Pontarlier ?
- Quelles mesures ponctuelles mais nécessaires ont été prises lors de ces sécheresses ?
- Quelles stratégies sont adoptées par les communes pour faire face à de futures pénuries d'eau?

Le Chenit et Pontarlier sont deux communes présentes de part et d'autre de la frontière. Elles ont été choisies pour plusieurs raisons. Premièrement, il s'agit de deux communes de gabarit différent : Le Chenit est un village tandis que Pontarlier est une ville. De plus, même si ces communes ne sont éloignées que de quelques kilomètres, elles se situent dans deux pays différents, où la législation est différente. Enfin, ces deux communes possèdent des systèmes d'approvisionnement en eau potable différents. L'analyse de ces deux localités permettra d'obtenir une représentativité des différentes méthodes de gestion de l'eau potable du Jura, massif frontalier à la fois rural et urbain dans certaines localités.

Il aurait été souhaitable d'inclure d'autres communes dans cette étude afin de mieux prendre en compte les spécificités régionales et locales au niveau de la pluviométrie et de la gestion de l'eau dans le Jura. Ces analyses supplémentaires n'ont pu être entreprises pour dans ce travail de Master pour des contraintes de temps. Néanmoins, cela pourrait être envisageable à l'avenir à travers d'autres travaux de recherche.

## 1.5. METHODOLOGIE: ANALYSE BINATIONALE D'UNE REGION FRONTALIERE

Comme il a été évoqué précédemment, le massif jurassien est un territoire partagé entre deux pays frontaliers : la Suisse et la France, qui ne partagent pas toujours les mêmes façons de fonctionner. Pour cette raison, il a été nécessaire d'adapter notre analyse au contexte géographique. Pour les données statistiques ainsi que pour les études de cas, les localités sélectionnées sont présentes en France et en Suisse (tableau 2-4).

Notre analyse hydroclimatique a pour but de donner aperçu des différentes caractéristiques climatiques et hydrologiques du massif jurassien, ainsi que leur évolution. Pour cela, différents paramètres seront présentés :

- L'évolution des moyennes annuelles et saisonnières des précipitations depuis 1901 pour toutes les stations.
- L'évolution des moyennes annuelles et saisonnières des températures depuis 1901 pour les stations climatologiques.

- L'indice normalisé de précipitations depuis 1901, pour comparer les différentes périodes de sécheresses pour les stations de Longirod, Couvet, La Chaux-de-Fonds, Le Sentier les Bioux ainsi que Les Brenets.
  - L'évolution des hauteurs d'eau des lacs de Joux (VD), des Brenets (NE), de Saint-Point (F), de la rivière de l'Orbe (VD) et de la nappe de l'Arlier (F) depuis 1975 à 2020, en accentuant l'analyse pour les sécheresses de 2003 et 2018.

Comme présenté dans la partie 1.4 (Problématique et objectifs de ce travail), cette analyse hydroclimatique est suivie d'une étude des modes de gestion de l'eau sur les communes du Chenit et de Pontarlier.

#### 1.5.1 LE CHOIX DES STATIONS DE DONNEES

Afin d'obtenir une représentation maximale des différents profils climatiques du Jura, 13 stations climatologiques et pluviométriques ont été choisies (figure 12). Parmi ces stations, certaines sont localisées en plaine, d'autres dans des dépressions ou des cols présents sur ce massif de moyenne montagne. Les détails des stations retenues sont listés dans le tableau 2.

L'utilisation de relevés homogénéisés est nécessaire pour réaliser une analyse hydroclimatique précise. Les données homogénéisées sont corrigées pour intégrer les effets induits par les changements qui sont intervenus depuis 1900 jusqu'à aujourd'hui sur les différentes stations. Ces changements qui affectent l'instrumentation, le site ou l'environnement, peuvent fortement influencer les valeurs et les tendances si bien qu'il faut éviter d'utiliser des données non homogénéisées sauf exception

5 stations sont climatologiques. Il s'agit de Genève – Cointrin (411 m), Bâle (316 m), La Chaux-de-Fonds (1017 m), Neuchâtel (485 m), Chaumont (1136 m) (rond bleu-foncé, figure 12). Elles mesurent la température, les précipitations et l'ensoleillement en continue automatiquement depuis 1981. Auparavant, il s'agissait de stations conventionnelles où le relevé de ces paramètres se faisait manuellement 3 fois par jour. Elles ont été choisies car elles disposent toutes de mesures homogénéisées depuis 1901.

5 stations sont des stations pluviométriques automatiques qui mesurent uniquement les précipitations automatiquement depuis quelques années. Il s'agit de Langenbruck (731 m), Wittnau (463 m), Mormont (535 m), Couvet (728 m) et Longirod (900 m) (rond turquoise, figure 12). Avant cela, il s'agissait de stations pluviométriques conventionnelles où le relevé des précipitations se faisait manuellement une fois par jour. Longirod (900 m) et Couvet (728 m) sont les stations les plus proches de nos terrains d'étude (Le Chenit et Pontarlier) avec des valeurs homogénéisées. Ainsi, leurs relevés seront plus précisément analysés.

Afin d'avoir un aperçu plus précis de la pluviométrie aux abords des lacs de Joux et des Brenets, 3 autres stations ont également été retenues. Il s'agit des stations pluviométriques manuelles du Sentier - Les Bioux (1025 m), des Brenets (908 m), et de La Cure (1185 m) (rond bleu-clair, figure 12). Ces 3 stations possèdent des données non-homogénéisées. Les résultats obtenus pour ces stations seront à prendre avec précaution.

Le choix de prendre uniquement des stations suisses est d'ordre technique. En effet, Météo France ne fournit pas la totalité de ses mesures gratuitement comme l'Office fédéral de la météorologie suisse MétéoSuisse. Cependant, comme le climat et la pluviométrie du Jura Français sont plutôt

semblables à ceux du Jura suisse, étudier uniquement des stations suisses est justifiable et n'affecte en aucun cas la qualité de notre analyse.

L'analyse hydrométrique a également été réalisée sur différentes stations du massif. L'accès à des données françaises a été possible. Les stations ont été choisies pour donner un aperçu de l'hydrométrie locale, près de Pontarlier et du Chenit. Ainsi, 5 stations hydrométriques ont été analysées à des périodes différentes selon les disponibilités. La station du lac de Joux au niveau de la commune du Pont (VD), la station du lac des Brenets au niveau de la commune des Brenets (NE), la station de l'Orbe, au Chenit (VD), la station du lac Saint-Point au niveau du barrage de Oye-et-Pallet (Fr.), et la station du Puits de Champagne III, sur la nappe de l'Arlier à Pontarlier (Fr.) (losange vert, figure 12).

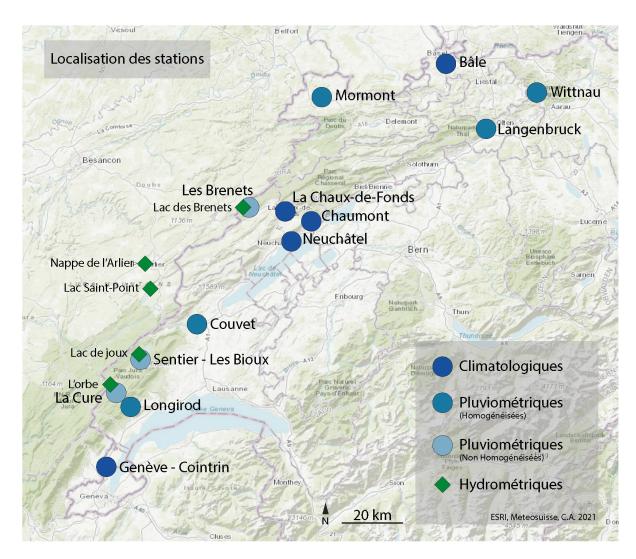


Figure 12 : Localisation des différentes stations sur le massif (Cuenot A., 2021).

Tableau 2 : Propriétés des stations retenues (dataMétéosuisse, 2021a).

Station	Code	Coordonnées CH1902+/LV95	Altitude	Exposition	Type de station
Genève - Cointrin	GVE	498905 / 122632	411	Plaine	Climatologique
Bâle	BAS	610908 / 265611	316	Butte	Climatologique
La-Chaux-de-Fonds	CDF	550919 / 214861	1017	Dépression	Climatologique
Neuchâtel	NEU	563087 / 205560	485	Versant	Climatologique
Chaumont	CHM	565060 / 211006	1136	Sommet	Climatologique
Langenbruck	LAB	624250 / 244720	731	Col	Pluviométrique (automatique)
Wittnau	WIT	639941 / 258983	463	Versant sud- ouest	Pluviométrique (automatique)
Mormont	ММО	569727 / 254223	535	Versant est	Pluviométrique (automatique)
Couvet	COU	540607 / 198345	728	Fond de vallée	Pluviométrique (automatique)
Longirod	LON	509387 / 150106	900	Versant sud	Pluviométrique (automatique)
Le Sentier – Les Bioux	BIO	2509820 / 1163451	1025	Fond de vallée	Pluviométrique (manuelle)
Les Brenets	BNE	2544674 / 1213696	908	Versant ouest	Pluviométrie (manuelle)
La Cure	CUE	2495297 / 1146348	1185	Versant sud- ouest	Pluviométrique (manuelle)

## 1.5.2 LES DONNEES HYDROCLIMATIQUES

Une majorité des données utilisées dans ce travail de recherche est disponible en accès libre aux domaines de l'enseignement et de la recherche sur la plateforme IDAWEB (https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/login.do). Cette plateforme mise en place par l'Office fédéral de la météorologie et de la climatologie permet d'accéder à toutes les valeurs climatiques et météorologiques des différentes stations présentes sur l'ensemble du territoire suisse depuis leur mise en service.

Ainsi, nous avons réalisé plusieurs commandes : les températures moyennes mensuelles depuis 1901 (tre200m0), les précipitations mensuelles homogénéisées et non homogénéisées depuis 1901 (rhs150m0, rre150m0), la somme de jours par an avec des températures négatives (tnd00ny0) et les sommes mensuelles des chutes de neige (hns000m0) (tableau 3).

Tableau 3 : Propriétés des données climatiques (MétéoSuisse, 2021a).

Nom des données	Code IDAWEB	Stations	Période
Températures moyennes mensuelles (homogénéisées)	tre200m0	Genève – Cointrin, Bâle, La Chaux-de- Fonds, Neuchâtel, Chaumont	1901- 2020
Précipitations moyennes mensuelles (homogénéisées)	rhs150m0	Genève – Cointrin, Bâle, La Chaux-de- Fonds, Neuchâtel, Chaumont, Langenbruck, Wittnau, Mormont, Couvet, Longirod	1901- 2020
Précipitations moyennes mensuelles (non homogénéisées)	Rre150m0	Les Brenets, Le Sentier – Les Bioux	1901- 2020
Jours de l'année avec des températures négative (°C)	tnd00ny0	Neuchâtel, La Chaux-de-Fonds, Chaumont	1901- 2020 1963- 2020
Sommes mensuelles des chutes de neige (cm)	hns000m0	La Chaux-de-Fonds, Chaumont, La Cure	1964/69 - 2020

Comme relevé dans l'introduction, les sécheresses météorologiques ont de fortes conséquences sur l'hydrologie. Le niveau des lacs, le niveau des nappes phréatiques ou encore le débit des cours d'eau sont très impactés lorsqu'un déficit pluviométrique apparait. Pour approfondir l'analyse des impacts hydroclimatiques des sécheresses de 2003 et 2018, il est nécessaire d'étudier l'évolution des niveaux d'eau des différents lacs, nappes et cours d'eau sur le massif. Pour cela, différentes mesures ont été retenues. Ces données ont été obtenues à travers des commandes à Office fédéral de l'environnement (dataOFEV 2021), à la Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL, 2021) et par l'intermédiaire d'entretiens (tableau 4) :

- Évolution du niveau des lacs de Joux (VD), Brenets (NE) et Saint-Point (Fr.) lors des sécheresses de 2003 et 2018.
- Évolution du niveau de la nappe de l'Arlier (Pontarlier) entre 1996 et 2021.
- Évolution du débit de l'Orbe (Le Chenit) entre 2000 et 2020

Tableau 4 : Les données hydrométriques étudiées (OFEV : Office fédéral de l'environnement, DETEC : Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, EPAGE : Établissement public d'aménagement et de gestion des eaux, ANTC : Agence nationale de la cohésion des territoires (OFEV 2021, DETEC, 2021).

Donnée	Lieu la prise de hauteur	Période	Source
Lac de Joux (VD)	Le Pont	1975 - 2020	OFEV – DETEC (commande)
Lac des Brenets (NE)	Brenets	1974 – 2020	OFEV – DETEC (commande)
Lac Saint-Point (Fr.)	Saint-Point	1994 – 2020	EPAGE Haut-Doubs (entretien)
Lac Saint-Point (Fr.)	Oye-et-Pallet	2014 - 2020	ANTC (commande)
L'Orbe (rivière) (VD)	Le Chenit	2000 - 2020	OFEV – DETEC (commande)
Nappe de l'Arlier (Fr.)	Puit de Champagne 3 (Pontarlier)	1996 - 2020	Grand Pontarlier (Entretien)

L'étude de la hauteur des lacs devait initialement être réalisée sur les lacs de Joux (VD) et de Saint-Point (Fr.), ces deux lacs étant les plus proches de Pontarlier et du Chenit. Cependant, les données de 2003 pour le lac Saint-Point sont relativement limitées puisqu'aucun relevé n'a été effectué entre mars et juillet 2003. De ce fait, l'analyse des impacts hydrologiques de la sécheresse de 2003 pour ce lac est limitée. Malgré son plus grand éloignement de Pontarlier, le lac transfrontalier des Brenets, est également situé sur le Doubs (figure 12). Nous l'utiliserons donc en tant que second terrain d'étude pour analyser les impacts hydrologiques des sécheresses sur le massif jurassien.

# 1.5.3 LA RECHERCHE DOCUMENTAIRE

Afin de compléter l'analyse des données hydroclimatiques pour les stations du massif choisies, une étude approfondie des diverses publications, rapports officiels et articles scientifiques concernant le climat jurassien et son évolution e été réalisée. Cette étape fut nécessaire pour reconstituer les effets des sécheresses de 2003 et de 2018 sur les conditions climatiques locales à Pontarlier et au Chenit. Elle a permis d'évaluer la fiabilité de nos résultats obtenus après l'analyse hydroclimatique des différentes stations. Elle a aussi mis en évidence les décisions prises en termes de gestion de l'eau lors de ces sécheresses.

Parmi la littérature traitée, nous pouvons citer les rapports de l'OFEV sur les effets des sécheresses et leurs conséquences ou les rapports sur l'évolution du climat et des différents impacts sur la Suisse publiés par le NCCS (National Centre for Climate Services). Ces derniers ont permis d'identifier les différents changements qui sont d'ores et déjà en cours sur le territoire suisse concernant le climat. Les bulletins météorologiques des différents services météorologiques nationaux tels que Météo-France et MétéoSuisse (annexe 16, 17) ont également été consultés pour connaître mois par mois l'évolution des pluies et des températures au cours de ces dernières années. Les arrêtés préfectoraux ou cantonaux pris par les autorités ont été retrouvés pour connaître les décisions prises lors des sécheresses. Certains articles de journaux archivés sur la plateforme de la bibliothèque cantonale de

Vaud « Scriptorium »<sup>19</sup> ont également permis de mettre en évidence l'évolution et l'importance des sécheresses au cours des étés de 2003 et 2018.

La liste non exhaustive ci-dessous donne un aperçu des différents documents traités.

- « Rétrospective de la sécheresse de l'été et l'automne 2015 » (Fallot, 2015)
- « La canicule et la sécheresse de l'été 2018 » (OFEV, 2019)
- « Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services CH2018 "(CH2018, 2018)
- « Coup de projecteur sur le climat suisse: État des lieux et perspectives » (Académie suisse des sciences naturelles, 2016)
- Bulletins météorologiques du Doubs 2003 et 2018 (MétéoFrance, 2003 & 2018)
- « Effets des changements climatiques sur les eaux suisses » (Hydro-CH2018, 2021)
- « Le climat Suisse des dernières décennies » (Rebetez, 2005)
- « Canicule de l'été 2003 Rapport de synthèse » (ProClim, OcCC, 2005)

# 1.5.4 QUESTIONNAIRES ET ENTRETIENS

Pour étudier les effets des récentes sécheresses sur la gestion de l'eau, une collecte d'informations a été réalisée auprès de professionnels de l'eau, de politiques et de personne de la société civile. En premier lieu, l'envoi d'un questionnaire type aux personnes souhaitées a été effectué (annexe 2). Cette première étape avait pour but de présenter ce travail de master et d'établir un premier contact avec les personnes souhaitées. Selon les réponses et l'intérêt porté par les personnes contactées, il a été possible de mener des entretiens individuels de type semi directif ciblé<sup>20</sup> entre septembre 2020 et mai 2021 (annexe 3). Au vu de la conjoncture sanitaire et des disponibilités de chacun, il n'a pas toujours été possible de se rencontrer physiquement. Par conséquent, certaines personnes ont été interrogées par vidéoconférence, appel téléphonique ou via l'échange de mails. Au total, 11 personnes ont pu être interrogées. Toutes ces personnes ont un rapport avec la problématique de l'eau sur le Chenit ou Pontarlier.

Voici la liste des personnes interrogées :

- -Monsieur Cotting Patrick, syndic de la commune du Lieu.
- -Monsieur Rogenmoser Loïc, responsable technique de la distribution de l'eau de ValRégiEaux.
- -Monsieur Nibio Jean-Pierre, ancien technicien à la ville de Pontarlier, aujourd'hui en retraite.
- -Monsieur Charrière Sylvain, responsable technique de la distribution de l'eau du Grand Pontarlier.
- -Monsieur Lonchampt Frédéric, technicien eau au sein du Grand Pontarlier.
- -Monsieur Sauret Michel, Agent technique des zones humides à l'établissement public d'aménagement et de gestion de l'eau du Haut-Doubs et de la Loue (EPAGE).

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> https://www.bcu-lausanne.ch/formation/plateforme-scriptorium/.

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> Entretien spécifiquement centré sur les sécheresses de 2003, 2018 et sur la gestion de l'eau de Pontarlier et du Chenit.

- -Monsieur Resch Jean-Noël, Hydrobiologiste à l'établissement public d'aménagement et de gestion de l'eau du Haut-Doubs et de la Loue (EPAGE).
- -Madame Leroux Alexandra, adjointe à la mairie de Pontarlier.
- -Monsieur & Madame Patrick et Aude Fuchs, habitant et agriculteurs à l'Alpage de la Petite-Dent à Vaulion (Vaud).
- Madame Florence Schmidt, Project & Energy Manager à Romande Energie SA.

Ces personnes ont été contactées pour tenter de répondre à notre problématique et à nos questions de recherche de la manière la plus complète possible. Les entretiens menés avec celles-ci ont eu pour but d'obtenir des informations supplémentaires sur le réseau et la gestion de la ressource en eau de chaque commune. Les professionnels de l'eau ont pu répondre aux questions d'ordre technique, portant sur les caractéristiques des réseaux d'eau et de la gestion de la ressource en eau. Les politiques ont permis de comprendre les enjeux autour des décisions qu'un élu doit prendre en période de sécheresse. Enfin les personnes de la société civile ont mis en évidence les effets des sécheresses sur la vie des populations locales. Ainsi, chaque personne interrogée a pu apporter des précisions sur son domaine de spécialisation, qu'il soit technique ou politique ou en tant que consommateur.

# CHAPITRE II - LES TERRAINS D'ETUDE

Ce chapitre est consacré à la description de nos terrains d'étude. Nous étudions ainsi les particularités géographiques, sociales et physiques du Chenit et de Pontarlier. Les caractéristiques des différentes gestions locales de l'eau et de leurs réseaux sont également détaillées.

### 2.1 Le Chenit et la vallee de Joux

### 2.1.1 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

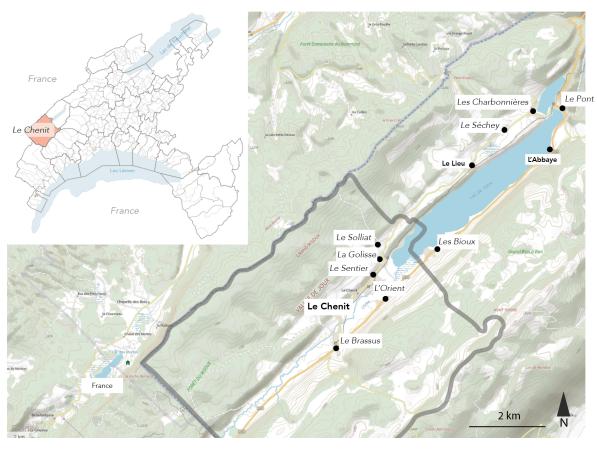


Figure 13: Localisation du Chenit (Cuenot A., 2021).

La vallée de Joux est composée de trois communes distinctes, L'Abbaye, Le Chenit et Le Lieu qui englobent plusieurs villages et hameaux (Annexe 4). La commune du Chenit est localisée en amont du lac de Joux à une altitude moyenne de 1013 mètres (figure 13). Le Chenit se compose de quatre villages, Le Sentier, Le Brassus, L'Orient et Le Solliat, qui possèdent chacun une certaine autonomie politique. Administrativement, le Chenit est situé dans le district Jura-Nord vaudois, dans le canton de Vaud. Avec une surface de 100 km², Le Chenit est la seconde commune du canton de Vaud de par sa superficie.

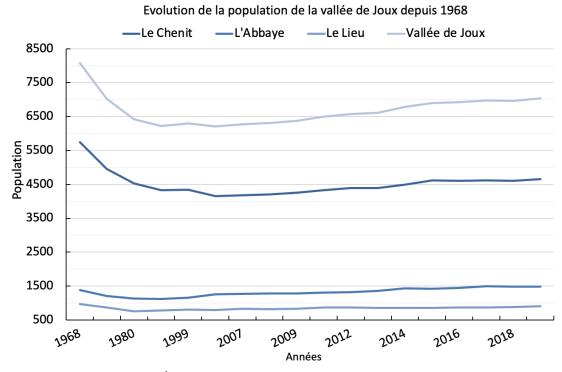


Figure 14 : Évolution de la population dans la vallée de Joux (OFS, 2020).

En 2018, la population du Chenit était de 4 586 habitants (OFS, 2020). Après une baisse de la population entre les années 1970 et 1980 consécutive à la crise horlogère, sa population, tout comme celle de la vallée de Joux en général, est restée stable depuis les années 2000 (figure 14). Cependant, avec ses nombreuses industries et la forte mobilité pendulaire<sup>21</sup> de la région, la population de la vallée de Joux connaît d'importantes fluctuations quotidiennes en fonction des horaires de travail. En effet, bien qu'il s'agisse d'un milieu rural, Le Chenit possède une industrie importante, avec 18 manufactures horlogères et microtechniques. Le Chenit fait partie des communes comprenant le plus d'industries horlogères de l'Arc jurassien, dont Audemars Piguet, Jaeger-LeCoultre ou encore Breguet. Le nombre d'emplois tous secteurs confondus était de 5520 en 2020 (OFS, 2020) . Selon les données statistiques de l'OSTAJ (Observatoire statistique transfrontalier de l'Arc Jurassien), en 2020, près de 3 319 travailleurs frontaliers se rendaient chaque jour sur la Commune du Chenit pour y travailler, ce qui représente près de 62.6% des actifs de la commune (figure 15) (Hmamda et al., 2020). Cette différence se répercute sur la consommation en eau du village qui est nettement moins élevée le week-end.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> Déplacements journaliers de la population entre les lieux de domicile et de travail.

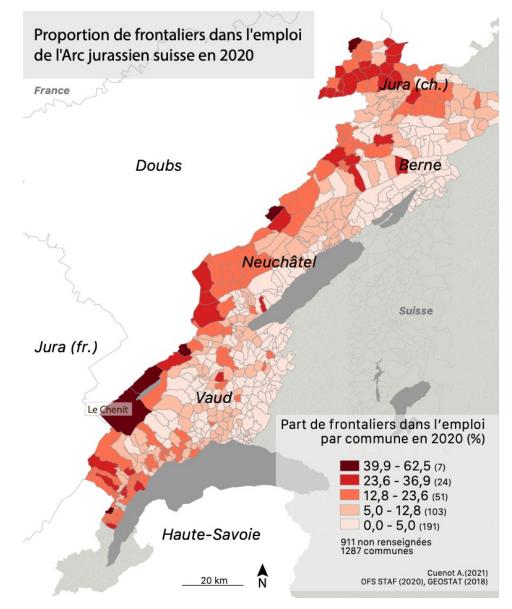


Figure 15 : Part des frontaliers dans l'emploi des communes de l'Arc jurassien Suisse en 2020 (OFS, 2020, Cuenot A. 2020).

Au-delà de l'industrie, Le Chenit, comme les autres communes alentour, est également tourné vers l'agriculture, avec la présence d'éleveurs, de fromageries et de chalets d'alpage. Les alpages structurent fortement l'activité agricole du massif jurassien. Depuis des siècles, ces habitats agricoles traditionnels permettent aux agriculteurs de s'y loger lorsqu'ils mettent leurs troupeaux en alpage l'été (Lebeau, 1948). La garde de vaches laitières ainsi que l'élevage de jeune bétail sont les principaux types d'exploitation, mais certains alpages produisent également des fromages locaux (Lauber et al., 2014). Sur la commune du Chenit, près de 14 chalets d'alpage encore en exploitation sont recensés. Ils sont situés entre 1100 m et 1500 m d'altitude (figure 16). 10 alpages ne sont pas raccordés au réseau d'eau de la vallée, et doivent fonctionner sur leurs réserves privées provenant de l'eau de pluie et de la fonte des neiges pour faire boire les troupeaux (Rogenmoser L., communication personnelle, 4.03.2021). La présence d'eau en surface étant éphémère sur un sol karstique, des réservoirs ont été aménagés en profitant des toits pour récupérer l'eau des précieuses précipitations. Ces citernes sont un élément fondamental des chalets d'alpage jurassien car sans eau, l'exploitation ne peux pas fonctionner. De plus,

l'élevage est très gourmand en eau puisqu'une vache laitière adulte boit entre 90 et 150 litres d'eau par jour en période de forte chaleur (Pasto'alpes, 2014).

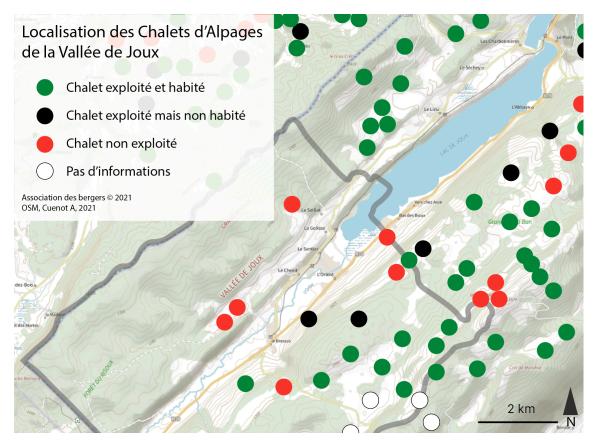


Figure 16 : Localisation des chalets d'alpages dans la vallée de Joux (Association des bergers, Cuenot A. 2021)

Le tourisme fait également partie de l'économie locale. Loin du tourisme de masse, Le Chenit, comme le reste de la vallée de Joux, est plutôt orienté vers un tourisme de « quatre saisons », avec la présence de quelques remontées mécaniques, de pistes de ski de fonds, de randonnées, de VTT ainsi que des activités aquatiques sur le lac en période estivale et hivernale (Cotting P, communication personnelle, 14.01.2021). La commune possède un camping et 4 hôtels proposant au total 76 chambres, une piscine municipale ainsi qu'une patinoire (OSTAJ, 2016).

#### 2.1.2 LA GEOMORPHOLOGIE

Le Chenit est localisé dans une des nombreuses vallées du massif jurassien (Bichet & Campy, 2008). Appelée Vallée de Joux, elle s'étend sur 30 km entre Les Rousses en France voisine et le village du Pont en Suisse. Le Chenit se situe à 1013 m d'altitude. La commune est entourée par des monts importants comme la Dent de Vaulion, le Mont Tendre, le Mont de Bière ou encore le Gros Crêt dépassant les 1400 m d'altitude (figure 17) (Meylan, 1964).

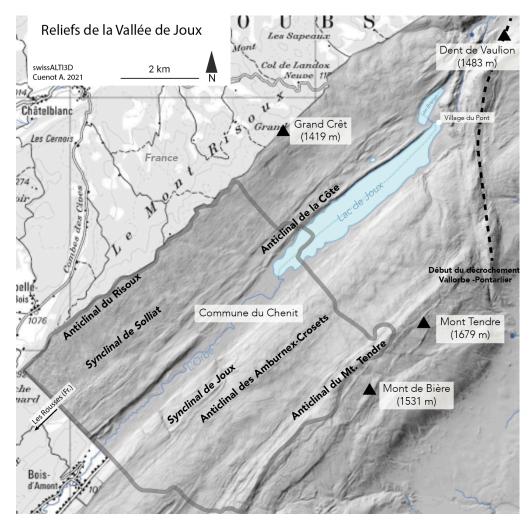


Figure 17 : Reliefs de la Vallée de Joux (Cuenot A. 2021)

La vallée de Joux est un bassin fermé caractérisé par l'absence d'exutoire naturel au niveau de son hydrologie. L'Orbe coule des Rousses jusqu'au lac de Joux, puis grâce à la géologie karstique locale caractéristique du massif jurassien, l'eau s'infiltre dans le sol et réapparaît quelques kilomètres en aval, à travers des résurgences au niveau des grottes de l'Orbe (Meylan, 1964). L'eau s'écoule également en aval par l'intermédiaire d'une centrale électrique depuis le siècle passé (Rogenmoser L., communication personnelle, 4.03.2021). La particularité géomorphologique de ce bassin fermé est le résultat de la formation du décrochement « Vallorbe-Pontarlier » datant de la fin de la période de plissement du Jura (Sommaruga, 2000). Il s'agit d'un accident tectonique majeur caractérisé par le déplacement de certaines couches géologiques vers le Nord, coupant différents synclinaux jurassiens perpendiculairement entre Vallorbe (CH) et Pontarlier (F). Cette perturbation a provoqué le déplacement de la Dent de Vaulion en direction du Nord, créant un barrage naturel (Reynard & Schoeneich, 2021).

Comme le reste du massif jurassien, la lithologie de la vallée de Joux est principalement composée de grès, de marnes et de calcaires. Cependant, cette composition n'est pas la même sur l'ensemble de la vallée. La partie située au nord du lac semble plus calcaire que la zone située au sud qui est plus marneuse. Comme discuté en introduction, la marne retient davantage l'eau que le calcaire qui laisse l'eau s'infiltrer (Sommaruga, 2000). De ce fait, la partie sud de la vallée possède d'importantes sources d'eau, dont celle du Brassus, et des Bioux (figure 18) (Cotting P., communication personnelle, 14.01.2021).

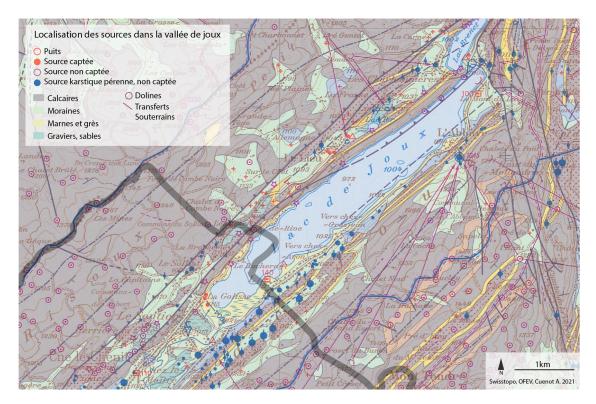


Figure 18 : Carte hydrogéologique de La vallée de Joux : Localisation des sources d'eau (Swisstopo, , Cuenot A. 2021).

# 2.1.3 LA GESTION LOCALE DE L'EAU POTABLE AU CHENIT

#### 2.1.3.1 Gestion institutionnelle

En Suisse, les articles 118 et 97 de la Constitution fédérale datant du 18 avril 1999 encadrent la protection du consommateur vis-à-vis de l'eau potable. Ces articles stipulent que la distribution de l'eau potable est à la charge des cantons. Dans le Canton de Vaud, l'article premier de la loi cantonale sur la distribution de l'eau (LDE RSV 721.31) datant du 5 mars 2013 définit que la distribution est déléguée aux communes (figure 19) : « les communes sont tenues de fournir l'eau nécessaire à la consommation (eau de boisson) et à la lutte contre le feu ». Cette gestion peut être réalisée en collaboration avec les communes avoisinantes (art. 4 al.2 LDE RSV 721.31). La distribution de l'eau potable est donc une compétence communale et villageoise.

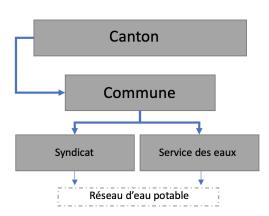


Figure 19 : Organigramme de la gestion de l'eau potable en Suisse (Cuenot A., 2021)

# 2.1.3.2 Gestion technique

Jusqu'au 31 décembre 2020, la distribution de l'eau sur la commune du Chenit était totalement gérée par la municipalité elle-même, au sein de son service des eaux. La commune était responsable de sa ressource depuis le prélèvement jusqu'à sa distribution. Le Chenit approvisionnait également une partie du village des Bioux lors des périodes d'étiage (Bissig, 2004). Ainsi, chaque commune de la vallée de Joux gérait son propre réseau d'eau. Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2021, Le Chenit et toutes les autres communes de la vallée se sont regroupées au sein de l'Association intercommunale pour la distribution de l'eau à la vallée de Joux appelée ValRégiEaux. Cette association centralise la collecte, le traitement ainsi que la distribution de l'eau. Tout est donc contrôlé par une seule équipe en un même lieu, au Chenit, dans le village du Sentier (tableau 5) (Cotting P., communication personnelle, 14.01.2021).

Tableau 5 : Compétences de la gestion de l'eau au Chenit avant et depuis janvier 2021 (Cotting P., communication personnelles, 14.02.2021)

Compétences	Structures compétentes jusqu'en 2020	Structures compétentes depuis 2021
Protection du point de prélèvement	Service des eaux du Chenit	ValRégiEaux
Production	Service des eaux du Chenit	ValRégiEaux
Traitement	Service des eaux du Chenit	ValRégiEaux
Transport	Service des eaux du Chenit	ValRégiEaux
Stockage	Service des eaux du Chenit	ValRégiEaux
Distribution	Service des eaux du Chenit	ValRégiEaux

En 1989, un accident de train a provoqué l'afflux de polluants au niveau du puits du village du Pont (VD). Ce puits, qui alimentait uniquement la commune à ce moment-là, a dû être fermée pendant quelques semaines, impactant l'approvisionnement en eau de la commune. Les habitants se sont ravitaillés en utilisant l'eau de citernes et via une conduite provisoire construite d'urgence depuis Le Lieu (VD). Cette conduite est finalement devenue définitive (Cotting P., communication personnelle, 14 janvier 2021). En 1991, c'est la source du Brassus qui fut à son tour polluée par une fuite de lisier en amont de cette source. Les habitants avaient à nouveau dû se tourner vers les citernes et là encore une conduite a dû être installée depuis la source de la Lionne. Suite à cela, la source du Brassus a été équipée d'un centre de traitement, « le plus important de la vallée » (Cotting P., communication personnelle, 14 janvier 2021) (Bissig, 2004). Le Chenit avait donc déjà été connecté à la commune de L'Abbaye depuis 1991 (Bissig, 2004). En 2018, la création d'un réservoir sur la commune du Lieu, ainsi qu'une conduite permettant de relier la commune du Chenit avec celle du Lieu a finalisé la connexion de tout le réseau d'eau de la vallée (figure 20). Ainsi, si la gestion de l'eau est désormais centralisée et gérée par ValRégiEaux depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2021, le réseau d'eau quant à lui était déjà en partie interconnecté depuis les années 1990.

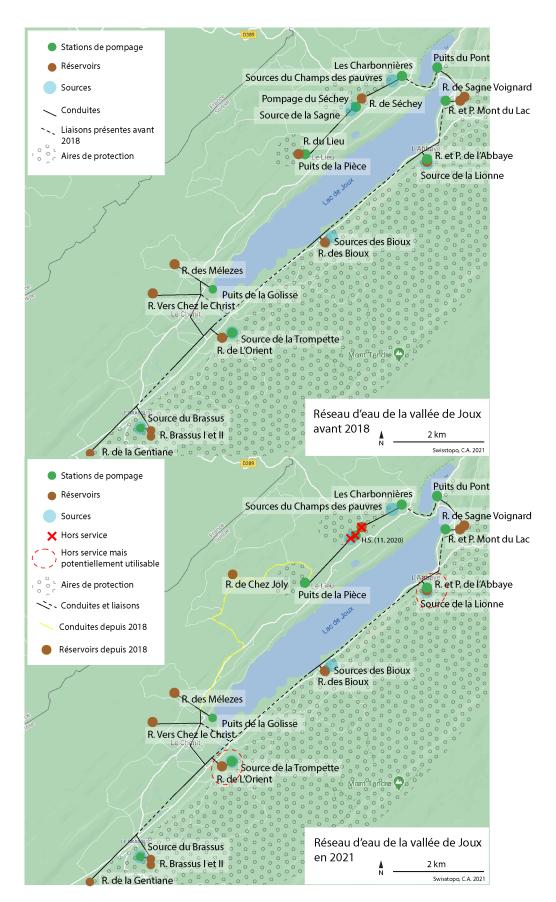


Figure 20 : Réseau de distribution de la vallée de Joux avant et après 2018 (Bureau technique communal du Chenit, 2020)

Malgré un investissement important, tout le réseau n'a pas encore été totalement rénové et certains tronçons construits il y a des dizaines d'années ne résisteraient pas à la pression à laquelle l'eau est actuellement distribuée sur le réseau neuf<sup>22</sup> (Rogenmoser L., communication personnelle, 4.03.2021). C'est pour cela que les différentes portions du réseau sont interconnectées par l'intermédiaire de suppresseurs ou de réducteurs de pression. Ainsi, l'ancien réseau de basse pression a pu être intégré au réseau de haute pression plus moderne pour former un seul et même réseau d'eau dans la vallée de Joux (annexe 5).

#### 2.1.3.3 Ressource

Le Chenit possède différentes sources d'approvisionnement en eau (tableau 6). On y retrouve des sources karstiques ainsi que des aquifères poreux. La source karstique la plus importante est celle du Brassus (figure 21). Elle se situe au Sud du Chenit, en amont du village du Brassus, a une altitude de 1060 m. Cette source est située sous une couverture morainique peu perméable, au contact d'une couche de calcaire et de marne. Elle est l'exutoire d'un aquifère présent dans ces couches (Perrin et al., 2000).



Figure 21 : Captage de la source du Brassus (Cuenot A., 2021).

Le puits de la Golisse est une autre source d'approvisionnement d'eau du village. Ce puits est localisé à 990 m d'altitude aux abords du lac de Joux, dans un aquifère constitué d'alluvions fluviatiles datant du Quaternaire. Ces alluvions sont caractérisés par des sédiments perméables, constitués de galets, de graviers et de sable. Cet aquifère est poreux (figure 5) (Fouché, 2016). La source de la Trompette est également présente sur la commune du Chenit. Celle-ci n'est pas connectée au réseau, mais pourrait l'être à l'avenir après une modernisation et une meilleure protection du captage.

-

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Pression qui peut atteindre 10 bars sur certains tronçons.

Tableau 6 : Ressource en eau présents sur la commune du Chenit selon Rogenmoser L. (communication personnelle, 4.03.2021).

Nom	Туре	Capacité de pompage
Source du Brassus	Exutoire d'un aquifère karstique	180m³/h
Puits de la Golisse	Aquifère poreux	3.6m³/h

### 2.1.3.4 Infrastructure

Après être prélevée au niveau de la source du Brassus et du puits de la Golisse (ch 2.1..3.3), l'eau du Chenit est traitée pour devenir potable.

L'eau captée à la source du Brassus passe par trois bassins différents. Le premier sert de préfiltration et utilise un filtre à sable. Le deuxième, permet d'éliminer toute trace de pollution grâce à un traitement par ozonation puis par charbon actif. Enfin, une légère chloration peut être ajoutée à l'eau dans le troisième bassin avant son stockage, pour maintenir la qualité de l'eau dans les réservoirs. Le contrôle de la turbidité est également effectué avant et après toutes ces étapes (figure 22) (Rogenmoser L., communication personnelle, 4.03.2021). Toute la chaîne de traitement de l'eau se réalise quelques mètres en aval de la source, dans un bâtiment qui y est dédié.

De manière générale, « l'eau présente dans les aquifères poreux est en général plus claire que l'eau provenant de source karstique » (Rogenmoser L., communication personnelle, 4.03.2021). Ainsi, l'eau pompée au niveau du puits de la Golisse subit un unique traitement ultraviolet par lampe UV avant d'être stockée.

Le respect des normes de potabilité est effectué à travers des prélèvements annuels sur tous les lieux de pompage. Chaque échantillon est alors envoyé au laboratoire cantonal afin d'être analysé. Si un échantillon ne respecte pas la norme cantonale de potabilité, une prospection est menée sur place pour connaître l'origine de cette pollution et en résoudre la cause.

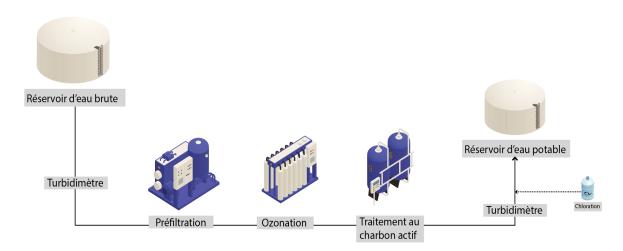


Tableau 7 : Réservoirs d'eau présents au Chenit (Cuenot A. 2021)

Après traitement, l'eau est acheminée dans des réservoirs. L'eau de la source du Brassus est envoyée dans les réservoirs du Brassus I et II, ainsi que dans le réservoir de la Gentiane. L'eau du puits de la Golisse est acheminée au réservoir des Mélèzes et au réservoir appelé « Vers chez le Christ » (tableau 7) (figure 20).

Figure 22 : Les étapes de potabilisation des eaux de la source du Brassus selon Rogenmoser L., communication personnelle, 4.03.2021 (Cuenot A., 2021)

Nom	Caractéristiques
Brassus I	300 m³ (réserve incendie)
Brassus II	400 m³ (réserve alimentaire)
Les Mélèzes	200 m³ (réserve alimentaire)
Vers Chez le Christ	2 x 800 m³ (réserve alimentaire) 2 x 200 m³ (réserve incendie)

# 2.1.3.5 Protection

Comme discuté plus haut (ch 2.1.3.2), les ressources en eau de la vallée sont confrontées à des risques de pollution importants (Bissig, 2004). En effet, les caractéristiques karstiques du réseau hydrologique souterrain le rendent vulnérable à toute pollution de surface. Afin de limiter les risques de pollution pouvant nuire à une bonne distribution de la ressource, 3 zones de protection sont définies en fonction des vulnérabilités locales comme le promeut la méthode EPIK (figure 23) (annexe 1.a). De plus, l'accès au col passant par la zone S3 est interdit pour certains camions à risque, tels que les camions transportant des hydrocarbures (figure 23) (ordonnance sur la signalisation routière (OSR 2.11 RS 741.21., « Circulation interdite aux véhicules dont le chargement peut altérer les eaux »). En parallèle, des contrôles annuels aux alentours des alpages présents sur cette zone permettent également d'écarter tout risque de pollution des sols (Rogenmoser L., communication personnelle, 4.03.2021).

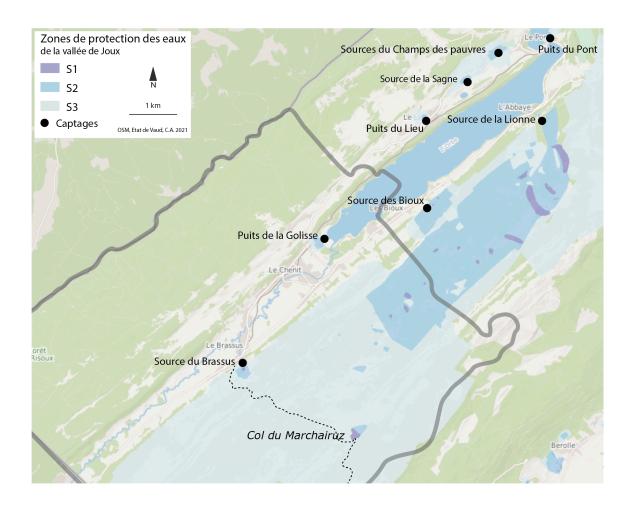


Figure 23 : Protection des points de captage de la vallée de Joux. (S1 : Protection des environs immédiats du captage, S2 : Rayon de protection de 100 m minimum, protection face à d'éventuels polluants, S3 : Zone de protection permettant de laisser assez de temps pour intervenir en cas de pollution (annexe 1.a) (Magéoadmin, Cuenot A., 2021)

# 2.2 Pontarlier et la communaute de communes du grand Pontarlier

#### 2.2.1 Contexte geographique

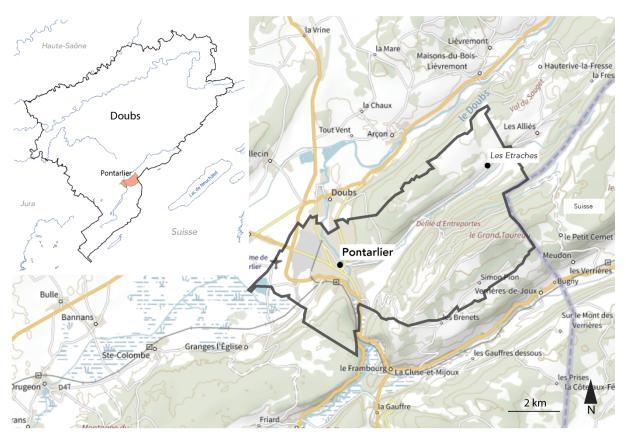


Figure 24 : Localisation de la Ville de Pontarlier (Cuenot A., 2021)

Pontarlier est une commune française située en Bourgogne-Franche-Comté, dans le département du Doubs. La ville s'étend sur une superficie de 41.4 km² (Commune de Pontarlier, 2018). Avec 9 autres communes, Pontarlier fait partie de la Communauté de Communes du Grand Pontarlier (CCGP), qui est un établissement public de coopération intercommunale (EPCI) (annexe 7). La commune possède également différents hameaux, le plus grand étant celui des Etraches, situé à 7 km au Nord-Est de la ville (figure 24). Au 31 décembre 2018, sa population était de 17 393 habitants, lui conférant un statut de « petite ville » (INSEE, 2020). Sur le long terme, sa population a tendance à légèrement baisser au profit des communes aux alentours présentes dans l'agglomération du Grand Pontarlier. Selon le taux d'évolution moyen annuel de la population, il est prévu que d'ici décembre 2021, la population de la ville soit de 16 653 habitants (figure 25) (INSEE, 2020).

#### Evolution de la population du Grand Pontarlier depuis 1968 ----Pontarlier -----Grand Pontarlier Population du Grand Pontarlier Population de Pontarlier Années

Figure 25 : Évolution de la population de Pontarlier (ordonnée gauche) et de la CCGP (ordonnée droit) (source : INSEE 2020)

Proche de la Suisse et sur un axe de transport important (RN47), le tertiaire y est dynamique et d'importantes usines y sont implantées comme Nestlé, Armstrong, ou encore Schrader (Lonchampt F. communication personnelle, 15.04.2021). On y retrouve également près de 150 PME/PMI réparties à travers divers secteurs tels que le commerce, l'agroalimentaire, le bâtiment ou encore la filière bois (Reilé & Doubs, 2012; Terre d'avance, 2020).

#### 2.2.2 LE CONTEXTE PHYSIQUE

Pontarlier se situe à 837 mètres d'altitude entre une vaste étendue plate à l'Ouest, définie par la plaine de l'Arlier, et des reliefs à l'Est et au Sud dont la montagne du Larmont avec un sommet (le Grand Taureau) qui culmine à 1323 m (figure 26). La commune est également localisée à l'extrémité nord du décrochement « Vallorbe-Pontarlier » cité précédemment (ch 2.1.2) (Sommaruga, 2000).

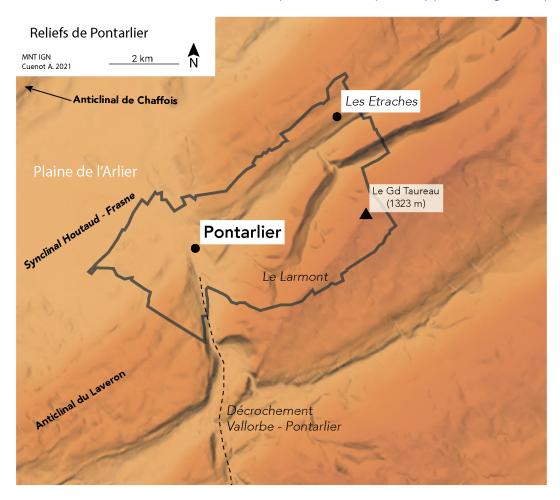


Figure 26 : Les reliefs de Pontarlier (géoportail, Cuenot A., 2021)

Une vaste plaine alluviale d'une superficie de 28.89 km² borde la ville. Cette plaine se situe dans le large synclinal Houtaud-Frasne. La plaine est limitée au Nord-Ouest par l'anticlinal de Chaffois, à l'Est par le décrochement Vallorbe - Pontarlier et au Sud par l'anticlinal du Lavernon (figure 26) (Campy, 1982; Idées EAUX, 2018). La plaine s'est formée suite à la dernière glaciation, lorsque des langues glaciaires s'écoulaient depuis le centre du massif, jusqu'au niveau des bas plateaux (annexe 8a) (Arn & Campy, 1990). La fonte des glaces a créé un cône alluvial bordé par un lac proglaciaire au niveau de l'actuelle plaine de l'Arlier (figure 27) (annexe 8a). Différentes couches d'alluvions fines, de galets et de graviers s'y sont déposés (Reilé & Doubs, 2012). Ces couches mesurent aujourd'hui près de 20 mètres d'épaisseur et reposent sur des couches d'argiles imperméables (annexe 8b). Elles constituent deux aquifères distincts. La vallée alluviale du Drugeon qui est définie par un ensemble de zones humides et influencée par les apports de la rivière du Drugeon, et la nappe phréatique de l'Arlier, une nappe poreuse qui se recharge majoritairement par l'infiltration des précipitations. Ces deux aquifères ont des réserves souterraines qui varient spatialement en fonction de la granulométrie des sables (Eaufrance, 2014). Cette masse d'eau souterraine est « la principale source d'approvisionnement en eau de

Pontarlier et des alentours » (Reilé & Doubs, 2012) (Lonchampt F. communication personnelle, 15.04.2021). En effet, malgré des sols karstiques qui entourent la ville de Pontarlier, aucune source karstique importante n'y est présente. La source Martin, qui a déjà alimenté la ville en eau par la passé, est localisée sur la commune de la Cluse-et-Mijoux, plus au Sud (annexe 9) (Agence de l'eau, 2013).

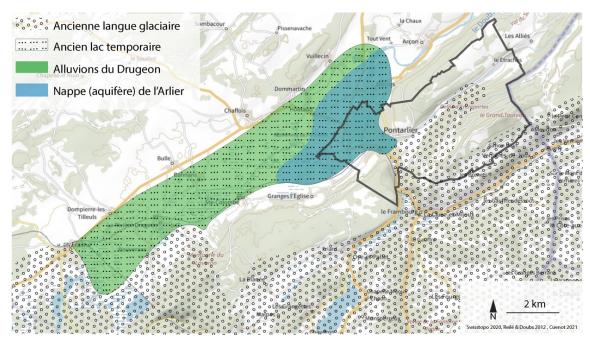


Figure 27 : Localisation des aquifères de l'Arlier par rapport à l'ancienne langue glaciaire datant de la dernière période glaciaire (GK500-LGM) à Pontarlier selon (Reilé & Doubs, 2012) (Cuenot A., 2021)

# 2.2.3 LA GESTION LOCALE DE L'EAU POTABLE A PONTARLIER

#### 2.2.3.1 Gestion institutionnelle

La France possède une approche « top down » concernant la distribution de l'eau. L'Etat français introduit une règlementation générale en respectant des directives européennes. Cette législation s'applique ensuite au niveau local par l'intermédiaire des communes.

A travers le Code général des collectivités territoriales<sup>23</sup> (CGCT) datant du 30 décembre 2006, la distribution de l'eau potable est un service public confié aux communes ou aux groupements intercommunaux : "Les communes sont compétentes en matière de distribution d'eau potable". Celles-ci déterminent librement leur mode de gestion. En fonction de la taille des réseaux et de leur complexité, les communes ou les EPCI<sup>24</sup> peuvent décider d'assurer directement la gestion de leurs réseaux, en régie directe, avec leur propre personnel, ou de mandater des entreprises spécialisées privées. Toutefois, chaque année, les maires des communes ou présidents des EPCI<sup>24</sup> sont tenus de remettre un rapport sur le prix et la qualité de ce service. Depuis la Loi n° 2015-991 portant sur la

-

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> art. L2224-12 à L2224-12-5.

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Établissement public de coopération intercommunale.

nouvelle organisation territoriale de la République du 7 août 2015 (NOTRE NOR : RDFX1412429L), élaborée pour une « décentralisation des compétences et un meilleur développement des territoires », la gestion de l'eau en France doit passer progressivement sous la tutelle des établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) et des communautés d'agglomération afin notamment de mutualiser les coûts de gestion (figure 28).

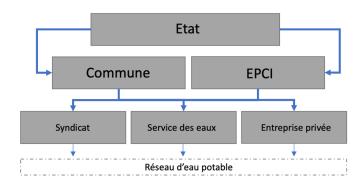


Figure 28 : Organigramme de la gestion de l'eau potable en France (Cuenot A. 2021).

# 2.2.3.2 Gestion technique

Dans le Doubs, la gestion de l'eau s'effectue en fonction de zones dites « homogènes », regroupant différentes communes, intercommunalités et syndicats (annexe 10). Pontarlier se localise dans la zone « haut Doubs sud ». Cette zone est divisée en 75 unités de gestion des eaux (UGE). A Pontarlier, c'est l'unité de la Communauté de Communes du Grand Pontarlier (CCGP) qui a cette charge via un contrat de gérance direct (tableau 8) (Service des eaux de la ville de Pontarlier, 2016).

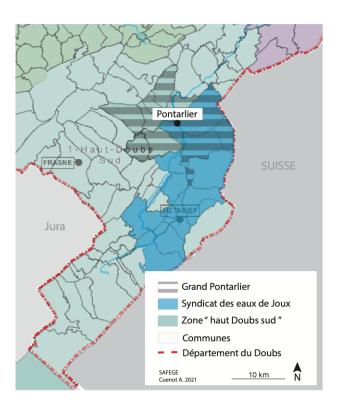


Figure 29 : Gestion de l'eau à Pontarlier (SAFEGE, Cuenot A, 2021)

L'unité de gestion de la CCGP distribue l'eau potable aux 10 communes qui en font partie depuis 2017. Elle a pour mission d'entretenir les ouvrages de stockage (réservoirs) et de distribution (conduites d'adduction et de distribution, branchements, etc.). Pontarlier est également membre du syndicat des eaux de Joux (figure 29). Il s'agit d'une autre unité de gestion qui a pour tâche de distribuer l'eau potable à 13 communes dont Pontarlier.

Tableau 8 : Gestion de l'eau à Pontarlier (Ville de Pontarlier, 2016)

Compétences	Structures compétentes
Protection du point de prélèvement	Grand Pontarlier
Production	Grand Pontarlier
Traitement	Grand Pontarlier
Transport	Ville de Pontarlier
Stockage	Ville de Pontarlier
Distribution	Ville de Pontarlier

#### 2.2.3.3 Ressource

Pontarlier possède deux sources d'approvisionnement en eau potable. Tout d'abord, l'aquifère de l'Arlier décrit plus haut (ch 2.2.2), ensuite le lac Saint-Point situé à 8 km (figure 30). Ce lac a une superficie de 5.2 km² et un volume d'eau d'environ 81,6 millions de m³ (DREAL, 2020). Il s'agit du quatrième lac naturel de France. Il a une origine glaciaire (Leroux et al., 2006). Auparavant, la source karstique Martin citée plus haut (ch 2.2.2) alimentait également Pontarlier. Elle a été abandonnée il y a plus d'une vingtaine d'années en raison de la très mauvaise qualité de son eau et de son débit d'étiage limité (SAFEGE, 2018).

L'unité de gestion de la CCGP prélève l'eau de la plaine alluviale, et le syndicat des eaux de Joux prélève l'eau du lac Saint-Point. En période normale, « environ 10% de l'eau distribuée à Pontarlier provient du lac. Ce pourcentage est bien plus élevé en période de sécheresse » (Charrière S., communication personnelle, 15.04.2021).

# 2.2.3.4 Infrastructure

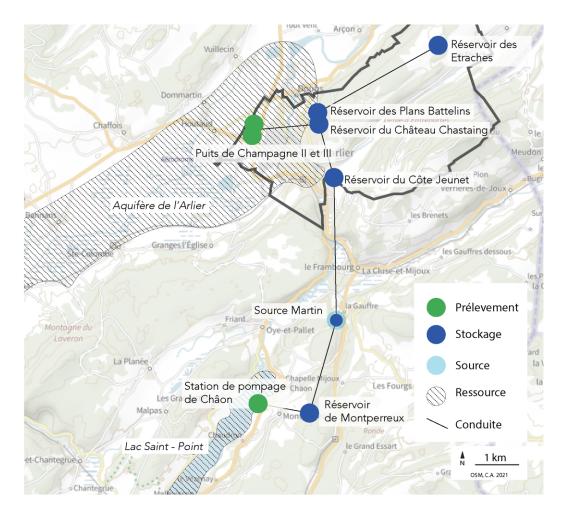


Figure 30: Réseau d'approvisionnement en eau de la ville de Pontarlier selon le service des eaux de la ville de Pontarlier, 2016 (Cuenot A., 2021).

Au niveau de la nappe de l'Arlier, Pontarlier prélève l'eau grâce à deux puits appelés « puits de Champagne II et III ». Chaque puits pompe l'eau en profondeur à un débit de 280 m³/h (annexe 11) (Service des eaux de la ville de Pontarlier, 2016). Après avoir été pompée, l'eau est désinfectée au chlore gazeux puis acheminée dans les différents réservoirs de la ville.

L'eau est stockée dans un premier réservoir en haut de la ville, le réservoir du Château Chastaing (figure 30). Ce réservoir à une capacité de stockage de 3200 m³. Il est en service depuis 1962. A ce niveau, deux pompes permettent l'approvisionnement d'un réservoir secondaire appelé réservoir des Plans Battelins (figure 30). Ce réservoir a une capacité de stockage de 700 m³. Grâce à des pompes, il permet également d'approvisionner le réservoir des Etraches (figure 30). Ce troisième réservoir a une capacité de stockage de 150 m³ et alimente le hameau du même nom et des fermes aux alentours.

L'eau prélevée dans le lac Saint-Point est captée au niveau de la station de pompage de Châon depuis 1970 (figure 30). La station a une capacité de pompage de 90 m³/h et puise l'eau à 32 mètres de profondeur (SAFEGE, 2018). Ensuite, l'eau est également traitée au chlore gazeux puis envoyée dans le réservoir de Montperreux (2500 m³) situé sur les hauteurs du lac. L'eau est ensuite transférée par écoulement gravitaire jusqu'au quatrième réservoir de Pontarlier appelé réservoir du Côte Jeunet (3200 m³) (figure 30) en passant par l'ancien site de la source Martin. Chaque année,

tous ces réservoirs sont nettoyés et désinfectés pour éviter toute contamination (Service des eaux de la ville de Pontarlier, 2016).

# 2.2.3.5 Protection

Comme pour la commune du Chenit, les points de captage de l'eau potable de Pontarlier sont également protégés (annexe 12). Les Puits de Champagne II et III sont localisés au niveau d'un aquifère fluvioglaciaire poreux de marne-calcaire et de recouvrements glaciaires. L'aquifère n'a pas de structures karstiques, le zonage de protection des puits s'effectue par une méthodologie classique et non par la méthode PaPRIKa citée plus haut (ch 1.3.2).

Malgré la délimitation d'une zone de protection, les puits de captage Champagne II et III sont considérés « improtégeables » (Grand Pontarlier, 2018). En effet, la nappe de l'Arlier possède une couverture protectrice faible<sup>25</sup> et différentes activités<sup>26</sup> potentiellement source de pollution y sont présentes. La zone est très sensible, ses puits sont surveillés jusqu'à l'activation de nouveaux puits protégeables. Nous développerons une analyse à ce sujet dans le chapitre VI.

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Quelques dizaines de centimètres de terre végétale perméable.

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> Carrières, industries, infrastructures de transport terrestre.

# Chapitre III — Le massif jurassien et son climat : des changements en cours ?

Les changements climatiques mondiaux ont un impact sur le climat local jurassien. Cependant, il est très difficile de les évaluer dans leur globalité puisqu'ils sont très différents spatialement et temporellement. Dans cette partie, il y sera question de représenter l'évolution du climat jurassien depuis le début du 20e siècle, à travers des données climatiques et hydrologiques.

# 3.1 Temperatures: Les tendances observees

L'analyse des températures est primordiale dans une étude météorologique et climatique. En effet, la température a une influence sur tout le système hydrologique. C'est elle qui régit l'évaporation de l'eau et la création des nuages qui permettront les précipitations de pluie ou de neige. C'est également elle qui peut conduire à l'apparition de sécheresses en jouant sur le degré d'assèchement des sols par évapotranspiration.

Les températures mondiales ont toujours évolué avec des périodes froides suivies de périodes plus chaudes. Cependant, au regard de rapports publiés ces dernières années (Baude et al., 2021; GIEC, 2015 et 2018), le climat mondial actuel n'a jamais été aussi chaud. Comme à l'échelle mondiale, l'évolution des températures moyennes annuelles et saisonnière (annexe 13) sur le massif jurassien montre un réchauffement flagrant depuis 1901. Ainsi, les données relevées à Bâle, Neuchâtel, La Chauxde-Fonds, Genève - Cointrin ou encore Chaumont montrent toutes une augmentation de la température moyenne annuelle pouvant aller jusqu'à 3°C (figure 31). Cette augmentation n'a pas été homogène tout au long du 20° siècle. En effet, les températures moyennes annuelles ont très peu augmenté entre 1900 et les années 1980 (+0.5°C), mais depuis le début du 20° siècle, on assiste à une hausse marquée des moyennes annuelles. Elles ont augmenté de 1.5°C en moyenne entre 1980 et 2020 sur les stations étudiées (figure 31). Cette tendance n'est pas une surprise au regard des rapports du GIEC ou du NCCS<sup>27</sup> (CH2018, 2018; GIEC, 2018).

\_

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> NCCS = National Centre for Climate Services

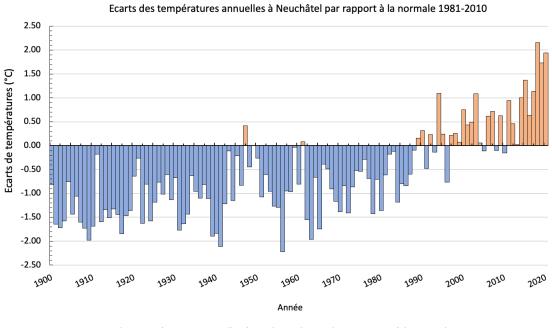
# Bâle 316 m Neuchâtel 485 m La Chaux-de-Fonds 1017 m Genève - Cointrin 411 m Chaumont 1136 m 13 9 7 5

### Evolution des températures moyennes annuelles depuis 1901

Figure 31 : Évolution de la moyenne annuelle des températures sur le massif jurassien depuis 1901 (dataMétéosuisse, 2021a, Cuenot A, 2021).

Années

La figure 32 montre l'évolution de la température moyenne annuelle pour les stations de Neuchâtel et de La Chaux-de-Fonds. Elle est représentée sous forme d'écart de cette dernière par rapport à la moyenne observée sur la période 1981-2010 (représentée ici en tant que normale climatique) (figure 32). Les normales climatiques ont pour but de constituer un point de comparaison avec des observations plus ou moins récentes, tout en servant de base à de nombreuses données illustrant les anomalies climatiques (moyennes mondiales de la température employées par le GIEC par exemple). Cela permet de représenter les évolutions au cours du temps. Ces normales sont utilisées quotidiennement en météorologie, et permettent de comparer les températures, les précipitations ou encore l'ensoleillement d'une année à l'autre. En Suisse, comme en France, ces normales de saison sont calculées sur la période de référence 1981-2010 conseillée par l'OMM. Ainsi, à travers les écarts-types suivants (figure 32), nous retrouvons une augmentation des températures moyennes de 0.5°C entre 2000 et 2010, et de 1.5°C entre 2015 et 2020 pour les deux stations.



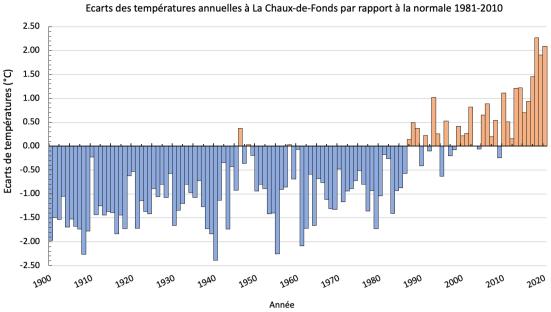


Figure 32 : Ecart des températures moyennes annuelles par rapport à la période 1981- 2020, depuis 1901 à Neuchâtel (485m) et La Chaux-de-Fonds (1017m) (dataMétéoSuisse 2021a, Cuenot A, 2021)

Pour illustrer l'évolution des températures au cours du 20<sup>e</sup> siècle, regardons maintenant les tendances observées par MétéoSuisse entre 1901 et 2020 (figure 33). Comme on peut le constater sur la figure 13, ces tendances à un réchauffement sont marquées et statistiquement significatives pour toutes les stations Suisse (cercles rouges, figure 33). Ces tendances sont assez homogènes pour les 5 stations climatiques du Jura (figure 33) avec un réchauffement moyen de 0.19 à 0.20°C par décennie de 1901 à 2020. Cela équivaut à un réchauffement moyen des températures annuelles de 2.28 à 2.4°C entre 1901 à 2020.

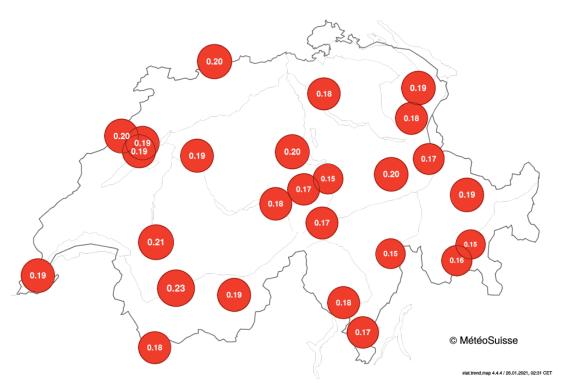


Figure 33 : Tendances des températures annuelles dans le Jura (°C/décennie) depuis 1901 (dataMétéoSuisse, 2021b).

Si on regarde les tendances saisonnières (figure 34), on remarque que l'été est la saison qui s'est en moyenne le plus réchauffée depuis 1901 dans le Jura et en Suisse de manière générale, tandis que l'hiver et le printemps comptabilisent des augmentations de température plus faibles. D'après les 5 stations climatiques du Jura, les températures se sont réchauffées en moyenne :

- de 0.21 à 0.25°C par décennie de 1901 à 2020 en été, soit un réchauffement moyen de 2.52 à 3°C de 1901 à 2020.
- de 0.16 à 0.19°C par décennie de 1901 à 2020 en hiver et au printemps, soit un réchauffement moyen de 1.92 à 2.28°C de 1901 à 2020.

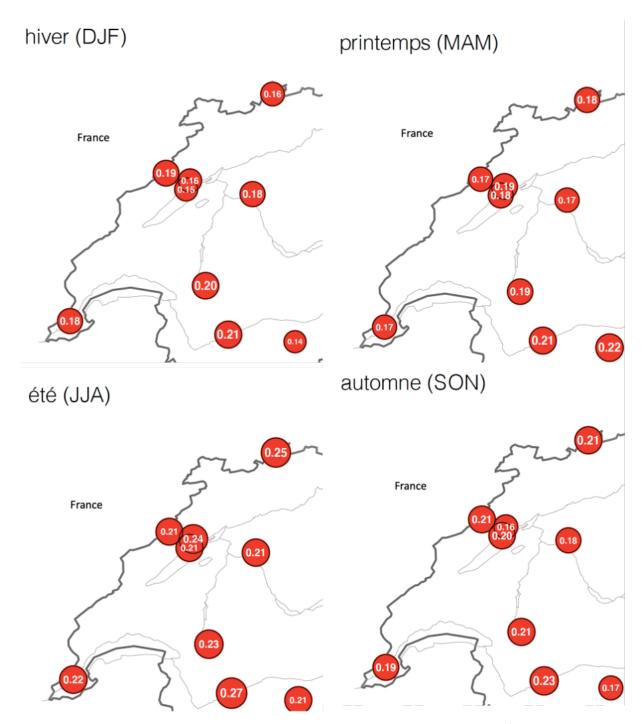


Figure 34 : Tendances des températures saisonnières en Suisse depuis 1901 (°C/décennie) (dataMétéoSuisse, 2021b).

Pour approfondir notre étude, nous avons examiné l'évolution du nombre de jours de gel, c'est-à-dire la somme des jours par année dont la température minimale durant la nuit est inférieure à 0°C, pour les stations de La Chaux-de-Fonds et Neuchâtel sur la période 1901-2020 et pour la station de Chaumont sur la période 1960-2020 (figure 35). Les données montrent que le nombre de jours de gel annuel comptabilisé est différent entre les stations de La Chaux-de-Fonds (et Chaumont) et Neuchâtel (Figure 35). Ceci résulte de l'évolution de la température en fonction de l'altitude (Fallot, 2019). En effet, La Chaux-de-Fonds étant située à plus de 1000 m d'altitude, il est normal que les gelées y soient plus fréquentes qu'à Neuchâtel (485 m). Si l'on regarde l'évolution dans le temps, on constate une légère augmentation du nombre de jours de gel par an entre les années 1960 et 1980 pour la station de La

Chaux-de-Fonds (1017 m). Néanmoins, il est important de rappeler que cette station a été déplacée à 2 reprises au cours de la période étudiée et notamment en 1971, date à laquelle elle est passée du centre-ville à un endroit plus froid située en périphérie de celle-ci. Ce changement peut être à l'origine des différences entre les températures relevées avant et après 1971. Pour nous en rendre compte, les données de la station de Chaumont (1136 m), qui est localisée à une altitude proche de La Chaux-de-Fonds (1017 m), ont été utilisées (figure 35). L'évolution du nombre de jours de gel annuel pour cette station ne montre pas d'augmentation significative des gelées à cette période (1960-1920). Ceci tend à montrer que le changement de localisation de la station de La Chaux-de-Fonds (1017 m) a influencé les relevés.

De manière globale, si l'on regarde l'évolution des relevés pour toutes les stations depuis 1901 (et 1960 pour Chaumont), nous pouvons constater une diminution progressive du nombre de jours de gel pour Neuchâtel (485 m), Chaumont (1136 m) et La Chaux-de-Fonds (1017 m). Cette diminution de la fréquence du gel est plus marquée et significative à Neuchâtel (485 m) qu'à Chaumont (1136 m) ou La Chaux-de-Fonds (1017 m) (figure 14). Cette tendance s'explique par la localisation de Neuchâtel (485 m) qui est à une altitude inférieure à celle des deux autres stations, et par conséquent possède des températures moyennes plus élevées (figure 31). Ces résultats posent ainsi la question des répercussions pour l'enneigement du massif jurassien. Ce point est abordé dans le sous-chapitre 3.4.

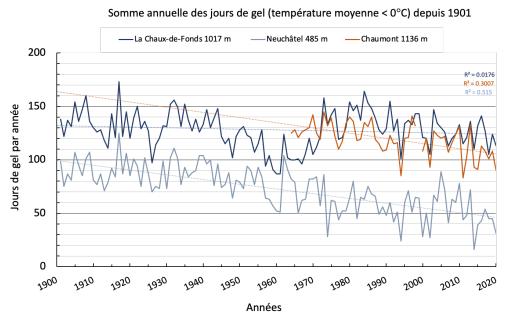


Figure 35 : Évolution du nombre de jours de gel (jour dont la température minimale est inférieure à 0°C) pour les stations de Neuchâtel (485 m), La Chaux-de-Fonds (1017 m) et Chaumont (1136 m) depuis 1901 (dataMétéoSuisse 2021a, Cuenot A. 2021).

# 3.2 Modification des precipitations : une question de saisonnalite

Les graphiques de la figure 36 représentent l'évolution de la somme annuelle des précipitations depuis 1901 pour les 5 stations pluviométriques. Pour simplifier la lecture, les données homogénéisées relevées à Longirod (900 m), Couvet (728 m) et La Chaux-de-Fonds (1017 m) et les données non homogénéisées du Sentier – Les Bioux (1025 m) et des Brenets (908 m) sont détaillées sur deux graphiques différents (figure 36). Les valeurs des précipitations relevées sur l'ensemble du massif

jurassien sont plutôt homogènes chaque année si l'on compare les 5 stations. De plus, l'évolution des précipitations sur le massif jurassien entre 1901 et 2020 ne semble pas être significative de manière globale (figure 36). En effet, selon les résultats obtenus pour Longirod (900 m), Couvet (728 m) et La Chaux-de-Fonds (1017 m), les précipitations annuelles ne montrent pas de tendance claire à la hausse ni à la baisse, avec des années humides et d'autres plus sèches. Les résultats obtenus sont très hétérogènes d'une année à l'autre (annexe 14 e). Pour les données relevées aux Brenets (908 m) et au Sentier – Les Bioux (1025 m), les données sont également irrégulières, avec de gros écarts entre les années. Cependant, il est important de rappeler que les données relevées au niveau de ces stations ne sont pas homogénéisées contrairement aux trois autres stations. En effet, la station du Sentier - Les Bioux (1025 m) a été déplacée du Sentier au Bioux en 1996, changement pouvant influencer les valeurs et donc les tendances.

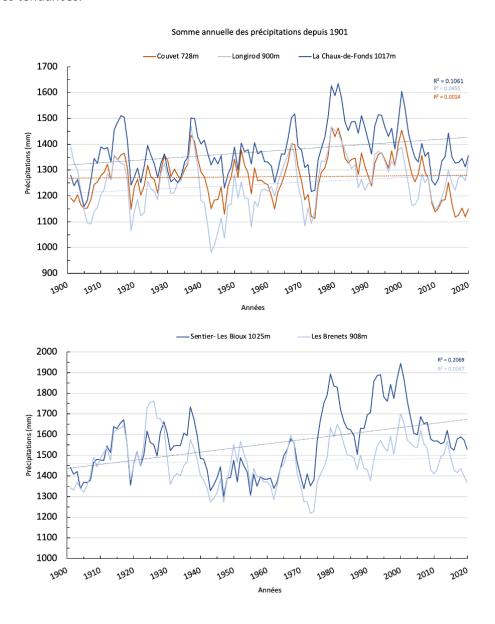


Figure 36 : Sommes annuelles des précipitations des différentes stations relevées depuis 1901 (dataMétéoSuisse, 2021a, Cuenot A. 2021).

Intéressons-nous maintenant aux écarts des précipitations moyennes annuelles par rapport aux moyennes de la période 1981-2010 (figure 37 et 38). A Longirod (900m), Couvet (728 m) et La Chaux de Fonds (1017 m), les écarts moyens sont négatifs depuis 2006 (figure 38). Cela se traduit par des années plus sèches que la normale (calculée sur la période 1981-2010). D'autres périodes plus sèches que la normale (calculée sur la période 1981-2010) sont également visibles dans les années 1900, 1920, 1940 à 1970 pour ces 3 stations (figure 38). Nous retrouvons cette tendance avec des résultats similaires aux Brenets (908 m) et au Sentier-Les Bioux (1025 m) (figure 37).

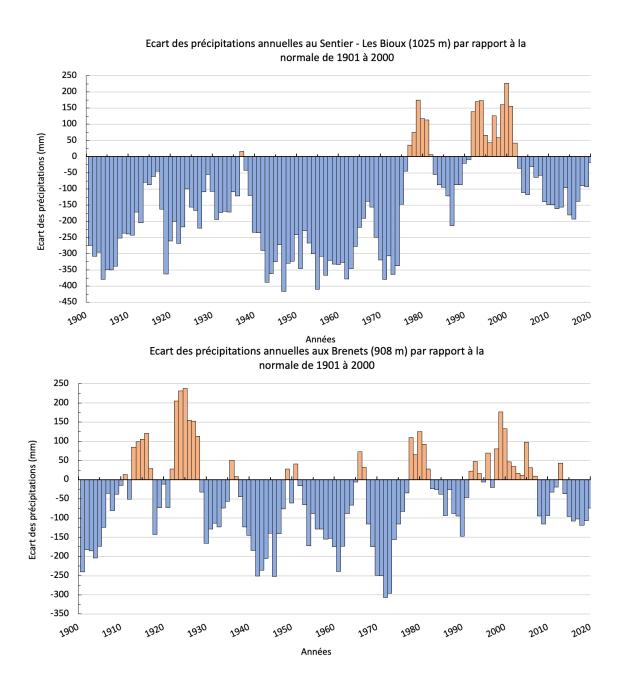
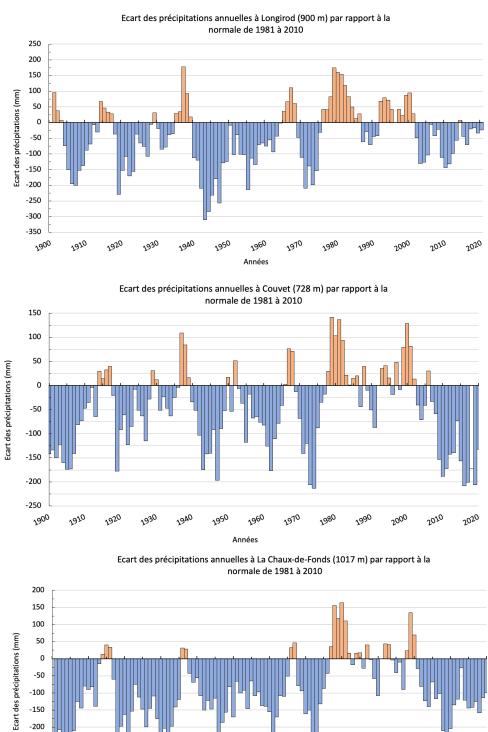


Figure 37 : Écarts des précipitations par rapport à la moyenne de 1901 à 2000 au Sentier – Les Bioux (1025 m), et aux Brenets (908 m) (dataMétéoSuisse 2021a, Cuenot A., 2021).



-100 -150 -200 -300 -350 -300 -350 -390 1910 1920 1930 1950 1960 1910 1980 1990 2000 2010 2020 Années

Figure 38 : Écarts des précipitations annuelles par rapport à la moyenne de 1981 à 2010 à Longirod (900 m), Couvet (728 m) et La Chaux-de-Fonds (1017 m) (dataMétéoSuisse 2021a, Cuenot, 2021).

Pour approfondir notre analyse, nous souhaitions regarder l'évolution des précipitations selon la saisonnalité, en réalisant deux graphiques représentant la somme des précipitations en hiver et en été sur la période de 1901-2020 pour les stations de Longirod (900 m), Couvet (728 m) et La Chaux-de-Fond (1017 m) (figure 39). Il semblerait que les précipitations augmentent en hiver, alors qu'elles auraient tendance à diminuer au printemps (annexe 14 b) et en été (figure 39). Néanmoins, il s'agit là de tendances dans les relevés puisque les résultats sont peu significatifs<sup>28</sup>, les précipitations variant fortement d'une année à l'autre et n'augmentant ou ne diminuant pas de manière régulière avec le temps (années). Pour l'automne (annexe 14 d), aucune tendance significative ne semble apparaître.

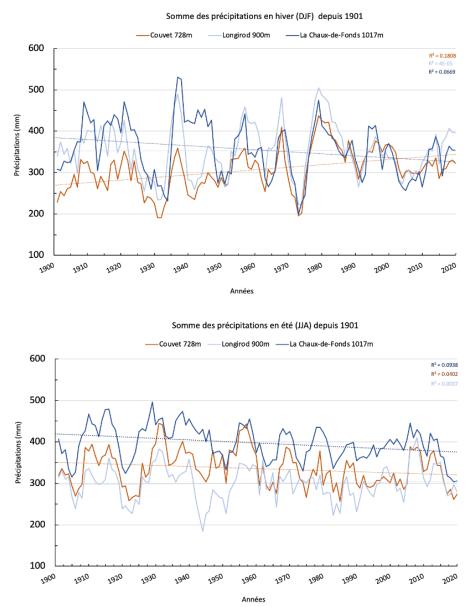


Figure 39 : Somme des précipitations en hiver (DJF) et en été (JJA) à Couvet (728 m), Longirod (900 m) et La Chaux-de-Fonds (1017 m) depuis 1901 (dataMétéoSuisse 2021a, Cuenot A., 2021).

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> Coefficients R<sup>2</sup> faibles.

Les tendances des précipitations annuelles et saisonnières observées par MétéoSuisse pour la période 1901-2020 sont présentées en figure 40. Les tendances saisonnières (1990-2020) sont en figure 41.

Nous pouvons noter que les précipitations ont augmenté pour les stations du Jura, en moyenne de 0.1 à 0.6% par décennie entre 1901 et 2020. Cela équivaut à une hausse de 1.2 à 7.2% entre 1901 et 2020 pour les précipitations annuelles suivant les stations. Les résultats montent également que les précipitations ont augmenté plus fortement en hiver dans le Jura entre 1901 et 2020, avec des tendances à la hausse marquées et statistiquement significatives pour plusieurs stations (figure 40). Elles tendent par contre à diminuer en été dans le Jura (sauf à Longirod (900 m)) sur cette même période, mais ces tendances sont peu marquées et souvent statistiquement non significatives. On observe aussi une légère tendance à la baisse des précipitations au printemps dans la plupart des stations du Jura, alors que les évolutions sont stables en automne pour la période 1901 à 2020 (figure 40). En revanche, les tendances observées en automne entre 1990 et 2020 sont beaucoup plus marquées, avec une baisse importante des précipitations pouvant atteindre -21.1% à Longirod (900 m) ou encore -18.7% et -15.6% à Couvet (728 m) et La Chaux-de-Fonds (1017 m) (figure 41).

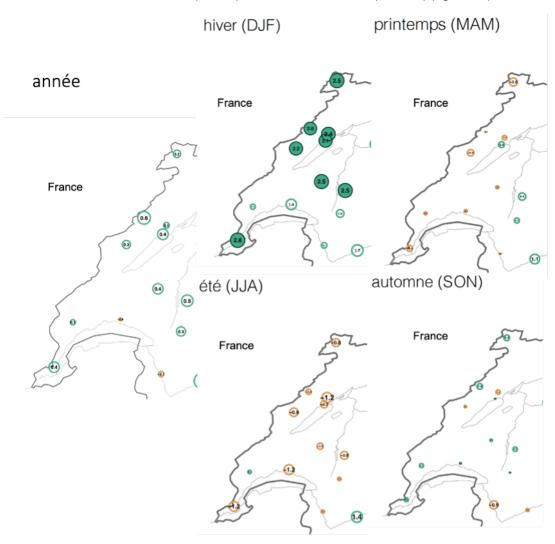


Figure 40 : Tendances des précipitations saisonnières Jurassiennes (%/décennie) de 1901 à 2020 (Cercle plein : significatif ; cercle vide : non significatif) (dataMétéoSuisse, 2021b).

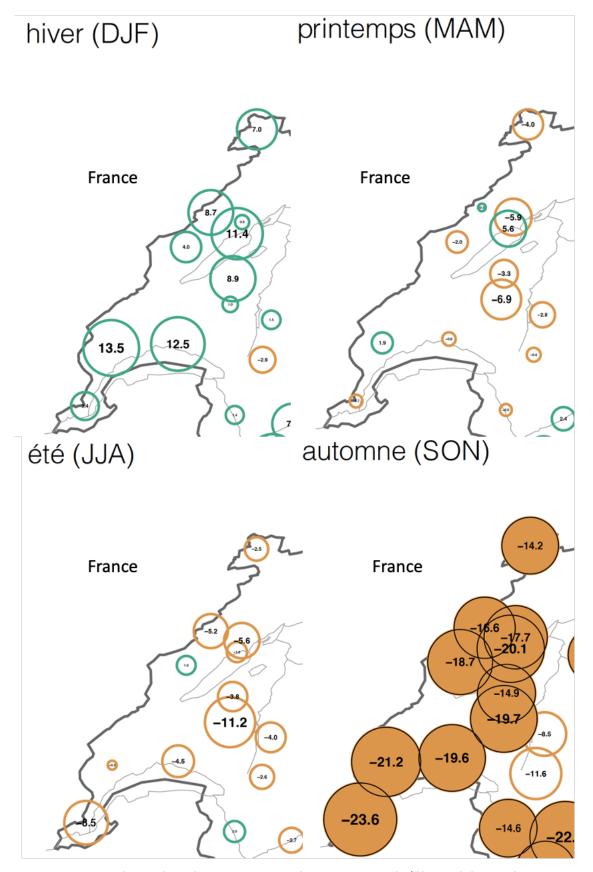


Figure 41 : Tendances des précipitations saisonnières Jurassiennes (%/décennie) de 1990 à 2020 (Cercle plein : significatif ; cercle vide : non significatif) (dataMétéoSuisse, 2021b).

# 3.3 AUGMENTATION DES SECHERESSES METEOROLOGIQUES

Notre étude des précipitations a permis de mettre en évidence l'évolution des quantités d'eau qui ont arrosé le massif jurassien depuis le début du 20° siècle. A partir de ces données, l'indice SPI peut être calculé afin de quantifier l'ampleur des différentes sécheresses survenues sur cette même période. L'indice SPI (« standardized precipitation index », en français : indice normalisé de précipitations ou INP) est un indice développé par l'Organisation mondiale de la météorologie (OMM). Par définition, c'est une mesure relative de l'anomalie des précipitations pour un lieu et une période donnée. C'est un indice de probabilité standardisé qui se base uniquement sur les précipitations, et permet donc de mesurer les sécheresses météorologiques. Sous recommandation de l'OMM, cette méthode est également employée par MétéoSuisse depuis 2013 pour mesurer les différentes sécheresses qui se produisent sur le territoire.

D'autres études ont utilisé cet indice pour quantifier diverses sécheresses dans le monde (par ex. Mehdaoui et al., 2018; Milano et al., 2018). Il est calculé à partir d'un ensemble de données de précipitations mensuelles pour une période continue de plusieurs mois. Plus précisément, le SPI se calcule à partir de la variation des précipitations tombées durant le ou les mois précédents, par rapport à une moyenne calculée sur une longue période de temps. L'ensemble des données est mobile dans le sens où une nouvelle valeur est déterminée chaque mois à partir des relevés des mois précédents. Ensuite, l'enregistrement des précipitations à long terme est transformé en distribution normale. Puis, il est divisé par l'écart-type des précipitations sur la période donnée (équation 1).

Équation 1 : Calcul du SPI (P : précipitations mensuelles normalisées sur 6 mois (en mm) ; P1901-2020 : moyenne mensuelle à long terme ; σ : écart type des précipitations sur la période étudiée (Milano et al., 2018).

$$SPI = \frac{P_{mois} - P_{mois de 1901-2020}}{\sigma^{p}_{mois de 1901-2020}}$$

Ainsi, chaque mois contribue au calcul d'une médiane mensuelle pluviométrique pouvant aller de 3 à 6 mois, en fonction des périodes de sécheresse et des impacts étudiés. Les sécheresses courtes de 1 à 3 mois, ont de rapides impacts sur la végétation ou encore l'agriculture. En revanche, les impacts hydrologiques tels que l'assèchement des cours d'eau découlent plutôt de périodes de sécheresse plus longues (MétéoSuisse, 2020a). Dans ce mémoire, nous nous intéressons principalement aux conséquences hydrologiques des sécheresses, l'indice est donc calculé sur une période de 6 mois.

C'est à travers un logiciel appelé « SPI generator », qu'il est possible de définir les indices SPI des périodes sèches. La valeur SPI obtenue correspond à la valeur du déficit (ou de l'excédent) de précipitations pour un lieu et une période donnée. Des valeurs positives traduisent un excédent pluviométrique, a contrario, des valeurs négatives illustrent une période de déficit pluviométrique (tableau 9) (MétéoSuisse, 2020). Nous pouvons évaluer la longueur et l'intensité des sécheresses en fonction du nombre de mois consécutifs avec une valeur SPI inférieure à 0 (OFEV et al., 2019).

Tableau 9 : Valeur de l'indice SPI (OFEV, 2019).

Valeurs du SPI	Signification
<-2.0	Extrêmement sec
-1.50 < SPI < -1.99	Très sec
-1 < SPI < - 1.49	Moyennement sec
-0.99 < SPI < +0.99	Précipitations proches de la normale
1 < SPI < 1.49	Moyennement humide
1.50 < SPI < 1.99	Très humide
> 2.0	Extrêmement humide

Pour connaître l'évolution des sécheresses depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle, regardons les indices SPI calculés depuis 1901 pour les différentes stations jurassiennes (tableaux 10,11,12) (annexe 15). Le code couleur se réfère à la valeur SPI calculée, le rouge représentant un mois sec (SPI < -0.99) et le bleu un mois humide (SPI > 0.99). Ce code couleur met en évidence les grandes sécheresses citées plus haut (ch 1.1) dont celles de 1976 et 2003 (tableau 10 -12). Nous retrouvons également la sécheresse de 2018, en fin d'été et début d'automne. L'intensité des indices est différente selon les stations. En effet, les indices SPI sont plus bas (valeurs négatives plus marquées) à Longirod au maximum de la sécheresse en novembre 2018 (-2.34) qu'à Couvet (-2.14) ou au Sentier - Les Bioux (-1.43). L'indice SPI pour la station de La Chaux-de-Fonds (-2.34) à la même valeur négative qu'à Longirod en novembre 2018. Des périodes plus humides sont également visibles.

lee-	r.i					t. d.		F	0.1	No		
1901	0.21	0.76	0.81	0.80	0.83	July 0.87	1.03	Sep 1.06	0.93	0.73	0.51	0.34
1902 1903	0.37	0.42 -0.09	0.62 -0.14	0.79 -0.20	0.89	1.07 0.39	1.17 0.61	1.08 0.92	0.90 1.04	0.73 1.05	0.49	0.19 0.77
1904	0.68	0.52	0.46	0.57	0.57	0.34	0.36	0.22	-0.19	-0.67	-0.80	-1.12
1905 1906	-1.34 0.58	-1.37 0.46	-1.27 0.25	-1.27 -0.02	-1.21 -0.22	-0.94 -0.59	-0.72 -1.19	-0.48 -1.79	0.03 -2.05	0.42 -2.07	0.57 -1.95	0.60 -1.70
1907	-1.31	-0.96	-0.84	-0.58	-0.43	-0.38	-0.55	-0.56	-0.74	-0.87	-1.00	-0.89
1908 1909	-0.78 -1.03	-0.67 -1.35	-0.47 -1.60	-0.28 -1.61	-0.10 -1.40	0.05 -1.18	0.43 -1.20	0.59 -0.93	0.67 -0.73	-0.45	0.06 -0.05	-0.53 0.42
1910	0.72	0.86	0.93	0.82	0.62	0.38	0.20	-0.04	0.18	0.36	0.29	0.42
1911 1912	0.34	0.16	-0.22 0.41	-0.28 0.44	-0.33 0.50	-0.54 0.48	-0.90	-0.79 0.34	-0.68 0.42	-0.65 0.39	-0.47 0.35	-0.25 0.42
1912	0.05	0.47	0.41	0.36	0.50	0.48	0.33 -0.26	-0.63	-0.70	-0.56	-0.58	-0.59
1914	-0.21	0.05	0.17	0.47	0.94	1.29	1.41	1.49	1.27	0.91	0.52	0.38
1915 1916	0.30 -0.13	0.38	0.50	0.55	0.59	0.65	0.60	0.25	-0.01 1.10	-0.16 1.09	-0.33 1.02	0.82
1917	0.72	0.51	0.17	-0.14	-0.22	-0.06	0.00	0.43	0.89	1.02	0.81	0.50
1918 1919	0.06	-0.47 0.92	-1.00 1.16	-1.28 1.25	-1.33 1.32	-1.47 1.23	-1.18 0.86	-0.87 0.21	-0.68 -0.04	-0.30 -0.25	-0.03 -0.22	-0.05
1920	0.23	0.46	0.40	0.28	0.15	0.03	-0.16	-0.32	-0.41	-0.58	-0.86	-1.31
1921 1922	-1.83 -1.76	-2.30 -0.91	-2.47 -0.18	-2.70 0.35	-3.03 0.82	-2.94 1.23	-2.74 1.33	-2.82 1.07	-2.75 0.70	-2.51 0.53	-2.21 0.26	-2.06 0.11
1923	0.20	0.23	0.20	0.20	0.18	0.08	-0.04	-0.09	0.11	0.36	0.62	0.81
1924 1925	0.84 -1.16	0.78 -1.63	0.62 -1.88	-2.03	-2.07	0.28 -1.78	0.45 -1.19	0.60 -0.77	0.56 -0.36	0.30	-0.09 0.16	-0.55 0.06
1926	0.00	0.05	0.07	0.09	0.20	0.29	0.24	0.17	0.07	-0.19	-0.40	-0.50
1927 1928	-0.56 0.59	-0.64 0.14	-0.64 -0.14	-0.41 -0.37	-0.14 -0.53	0.22 -0.51	-0.54	1.55 -0.39	-0.04	0.27	1.60 0.56	0.70
1929	0.55	0.11	-0.47	-0.95	-1.29	-1.52	-1.50	-1.11	-0.78	-0.64	-0.64	-0.64
1930 1931	-0.55 1.34	-0.50 1.04	-0.29 0.73	-0.08 0.50	0.33	0.72	1.28 0.71	1.81	2.11 1.31	2.08 1.43	1.90 1.14	1.65 0.53
1932	-0.07	-0.59	-0.86	-1.02	-0.61	-0.08	0.50	0.93	0.95	0.75	0.26	-0.29
1933 1934	-0.93 -0.98	-1.44 -1.24	-1.71 -1.28	-1.53 -1.25	-1.23 -1.17	-0.90 -1.08	-0.46 -1.11	-0.04 -1.04	0.02 -1.08	-0.25 -1.00	-0.48 -1.17	-0.74 -1.00
1935	-0.80	-0.51	-0.26	-0.06	0.10	0.25	0.54	0.87	1.40	1.91	2.41	2.68
1936	2.75	2.64	2.35	1.90	1.47	1.07	0.84	0.60	0.54	0.46	0.43	0.46
1937 1938	0.63 -0.61	-0.80	1.19 -0.92	1.59 -1.02	1.77 -1.12	1.81 -1.02	1.74 -0.74	1.38 -0.43	0.68 -0.23	0.08 -0.27	-0.15 -0.29	-0.35 -0.49
1939	-0.70	-0.66	-0.38	0.02	0.51	1.16	1.64	2.12	2.26	2.15	1.82	1.56
1940	1.25 0.56	0.82	0.41	0.21	0.21	0.11	0.37	0.66	0.89 -0.19	-0.75	0.78 -1.30	0.65 -1.96
1942	-2.47	-2.73	-2.61	-2.39	-2.03	-1.79	-1.55	-1.30	-1.22	-1.19	-1.03	-0.96
1943 1944	-1.05 -1.47	-1.06 -1.73	-0.92 -2.01	-0.86 -2.22	-0.94 -2.47	-1.03 -2.58	-0.84 -2.39	-0.86 -1.77	-0.90 -0.63	-0.92 0.29	-0.96 0.93	-1.15 1.37
1945	1.47	1.24	0.78	0.28	-0.43	-1.09	-1.74	-2.07	-2.17	-1.96	-1.70	-1.49
1946	-1.37 0.11	-1.15 0.04	-0.98 0.05	-0.86 0.06	-0.87 0.20	-0.80 0.16	-0.40 -0.25	-0.10 -0.72	0.16	-1.30	-1.19	-0.75
1948	-0.33	0.02	0.31	0.50	0.54	0.71	0.85	0.93	0.69	0.45	-0.03	-0.77
1949 1950	-1.39 -1.32	-1.84 -1.19	-2.01 -1.06	-2.05 -0.91	-1.91 -0.85	-1.82 -0.63	-1.76 -0.29	-1.76 -0.13	-1.70 0.58	-1.56 1.07	-1.49 1.45	-1.33 1.64
1951	1.90	1.85	1.50	1.16	0.81	0.35	-0.35	-0.13	-0.64	-0.66	-0.49	-0.40
1952	-0.20	-0.09	-0.05	-0.06	-0.14	-0.18	-0.15	0.45	1.14	1.82	2.20	2.37
1953 1954	2.09 -1.97	1.43 -2.45	0.59 -2.49	-0.14 -2.36	-0.76 -2.26	-1.20 -1.80	-0.99 -1.25	-0.47 -0.64	-0.24 -0.08	-0.54 0.45	-0.88 0.81	-1.37 1.00
1955	1.06	1.00	0.97	0.78	0.54	0.26	0.04	-0.31	-0.72	-0.91	-0.90	-1.05
1956 1957	-1.23 0.09	-1.16 -0.17	-1.03 -0.32	-1.03 -0.14	-0.93 0.01	-0.54 -0.02	-0.02 0.14	0.40	0.72	0.90 -0.50	0.65 -0.51	0.43 -0.52
1958	-0.56	-0.52	-0.21	0.17	0.31	0.46	0.61	0.66	0.32	-0.01	-0.15	-0.45
1959 1960	-0.66 -0.68	-0.68 -0.38	-0.60 -0.18	-0.53 -0.07	-0.40 -0.03	-0.34 -0.05	-0.57 0.20	-0.95 0.69	-1.27 1.25	-1.34 1.56	-1.40 1.74	-1.14 1.72
1961	1.38	0.93	0.50	0.09	-0.23	-0.43	-0.60	-0.64	-0.62	-0.50	-0.31	-0.07
1962 1963	0.39 -1.47	0.77 -0.71	1.05 -0.26	1.18 0.16	1.13 0.42	0.73	-0.04 1.05	-1.27 1.18	-2.35 1.36	-2.71 1.21	-2.70 0.83	-2.20 0.31
1964	0.03	-0.40	-0.75	-1.06	-0.99	-1.11	-1.59	-1.57	-1.50	-1.47	-1.38	-1.20
1965 1966	-0.92 2.06	-0.69 2.30	-0.35 2.24	-0.09 2.02	1.67	0.57 1.31	0.96	1.09 -0.22	1.17 -0.68	1.47 -0.63	1.63 -0.47	1.85 -0.16
1967	0.26	0.56	0.76	0.75	0.69	0.51	0.34	-0.02	-0.07	-0.03	0.25	0.51
1968 1969	0.67	0.86	0.87	0.74	0.45	0.42	0.59	0.87	1.03 -0.40	1.40 -0.89	1.48 -1.27	1.17
1970	-0.48	0.24	0.84	1.41	1.72	1.73	1.41	0.93	0.40	-0.18	-0.32	-0.41
1971 1972	-0.31 -2.14	-0.40 -2.14	-0.56 -1.98	-0.63 -1.69	-0.77 -1.32	-0.93 -1.16	-1.19 -1.21	-1.29 -1.33	-1.40 -1.24	-1.58 -1.29	-1.86 -1.32	-2.09 -1.22
1973	-1.02	-0.94	-0.99	-0.93	-0.82	-0.74	-0.70	-0.40	-0.17	-0.17	-0.25	-0.37
1974 1975	-0.45	-0.58 1.02	-0.61 0.79	-0.44 0.46	-0.34 0.10	-0.27 -0.06	-0.01	0.55 -0.03	0.93 -0.02	1.15 0.06	1.45 -0.05	1.51 -0.28
1975	1.32 -0.57	-0.86	-1.24	-1.69	-2.15	-2.49	-2.43	-1.99	-1.16	-0.32	0.42	0.99
1977	1.25	1.50	1.60	1.65	1.63	1.63	1.51	1.27	1.02	0.68	0.58	0.67
1978 1979	0.99 -0.21	1.16 0.34	1.32 0.82	1.54	1.59	1.47 0.97	1.20 0.41	0.78 -0.47	0.00 -1.02	-0.42 -0.96	-0.61 -0.54	-0.57 0.13
1980	0.80	1.22	1.45	1.47	1.44	1.25	1.00	0.86	0.66	0.39	0.30	0.33
1981 1982	0.27 1.39	0.15 1.41	0.25 1.26	0.26	0.18	-0.07 0.24	-0.13 0.05	-0.04 0.08	-0.05 0.47	0.42	0.87 1.26	1.26 1.57
1983	1.69	1.70	1.76	1.64	1.53	1.39	1.27	0.78	0.34	0.08	0.18	0.36
1984 1985	0.68	1.01 0.16	1.20 0.42	1.15 0.71	0.81	0.27 1.14	-0.24 1.31	-0.62 1.05	-0.90 0.32	-0.76 -0.52	-0.35 -1.00	-0.04 -1.34
1986	-1.25	-0.74	-0.16	0.23	0.44	0.62	0.48	0.19	-0.22	-0.21	-0.30	-0.32
1987 1988	-0.19 0.66	-0.07 0.67	-0.01 0.91	0.13 1.14	1.24	0.56 1.11	0.83	1.07 0.74	1.15 0.31	0.86	0.64 -0.08	0.58 -0.03
1989	-0.20	-0.26	-0.35	-0.45	-0.60	-0.86	-1.19	-1.86	-2.25	-2.45	-2.50	-1.96
1990	-1.35 -0.22	-0.71 -0.43	-0.19 -0.61	-0.66	0.70 -0.71	-0.91	-0.94	-0.70	-0.36	-0.02 -0.15	-0.01 -0.02	-0.12 0.11
1992	0.13	0.06	-0.02	-0.02	0.03	0.18	0.25	0.56	1.03	1.20	1.22	1.23
1993 1994	1.06	0.65 1.59	0.12 1.41	-0.27 1.03	-0.55 0.55	-0.76 0.36	-0.37 0.50	0.50	0.42	1.58 0.66	1.98	2.08 1.28
1995	1.45	1.62	1.82	1.78	1.48	1.13	0.90	0.38	-0.25	-0.42	-0.41	-0.49
1996 1997	-0.78 0.15	-0.87 0.14	-0.93 0.03	-1.09 0.14	-1.13 0.29	-0.95 0.45	-0.83 0.65	-0.79 0.96	-0.39 0.95	-0.17 0.71	-0.08 0.50	0.05
1998	-0.09	-0.18	-0.28	-0.40	-0.54	-0.64	-0.54	-0.27	0.18	0.58	0.89	1.10
1999 2000	1.11 0.69	0.99	1.01 0.57	1.05 0.40	0.97	0.96	1.12 0.10	1.22 0.02	0.98	0.87	0.82	0.80
2001	1.12	1.34	1.46	1.66	1.92	2.02	1.87	1.61	1.03	0.46	-0.39	-0.73
2002	-0.95 0.97	-1.19 0.86	-1.13 0.46	-0.95 0.01	-0.75 -0.57	-0.62 -1.30	-0.50	-0.33 -1.97	0.04	0.31 -1.23	0.59 -0.61	0.88 -0.22
2003	-0.02	-0.01	0.46	-0.15	-0.57	-0.81	-2.02 -0.90	-1.97 -0.70	-1.65 -0.48	0.01	0.18	-0.22 0.18
2005	0.01	-0.21	-0.37	-0.54	-0.57	-0.72	-0.84	-1.22	-1.58	-1.80	-1.99	-2.03
2006	-1.51 0.28	-0.88 0.15	-0.25 0.16	0.30	0.89	1.44	1.76	1.85 1.63	1.69	1.36 0.98	0.87	0.49
2008	-0.19	-0.07	0.12	0.33	0.72	1.14	1.39	1.43	1.24	0.98	0.54	0.09
2009	-0.32 -0.24	-0.65 -0.16	-0.99 -0.13	-1.19 -0.19	-1.33 -0.32	-1.39 -0.49	-1.48 -0.75	-1.55 -1.06	-1.25 -1.16	-0.95 -1.06	-0.76 -1.03	-0.52 -1.13
2011	-1.21	-1.21	-1.44	-1.81	-1.90	-1.98	-2.01	-1.78	-1.40	-0.74	-0.29	-0.08
2012	0.00	0.28	0.38	0.24	0.12	0.14	0.10	-0.30 1.05	-0.21 1.33	0.11	1.19	0.31
2014	1.04	0.76	0.43	0.26	0.09	-0.04	-0.01	0.22	0.43	0.35	0.28	0.15
2015 2016	0.07	-0.01 0.32	0.04	0.18	0.28 1.14	0.35 1.22	0.46 1.16	0.44	0.25	0.06 -0.36	0.03 -0.88	0.07 -1.21
2017	-1.36	-1.53	-1.50	-1.25	-1.10	-1.17	-1.36	-1.51	-1.67	-1.50	-0.85	-0.21
2018 2019	0.50 -0.77	1.10 -0.29	1.53 -0.03	1.56 0.10	1.40 0.22	1.09 0.24	0.50	-0.38 -0.11	-1.19 0.15	-1.25 0.51	-1.30 0.70	-1.13 1.09
2020	1.42	1.47	1.37	1.24	1.02	0.53	0.07	-0.12	-0.28	-0.35	-0.02	0.39

Tableau 10 : SPI de Longirod (900m) depuis 1901 (dataMeteoSuisse 2021a, Cuenot A., 2021)

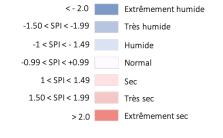
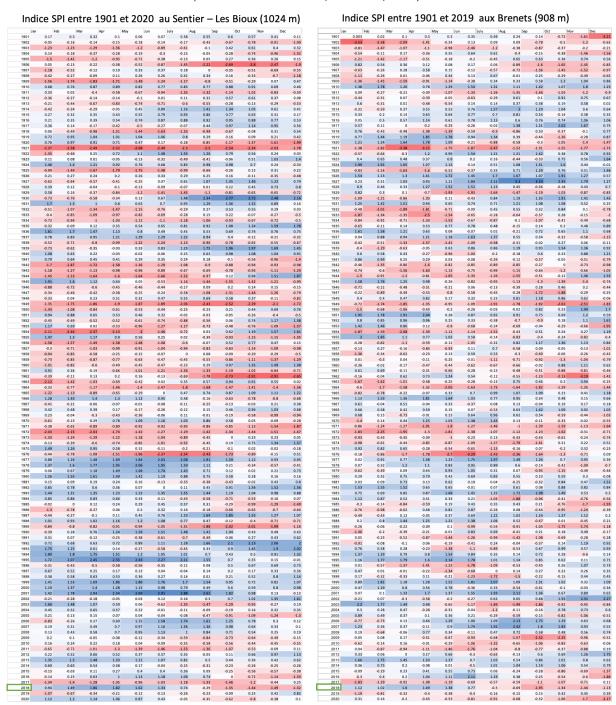
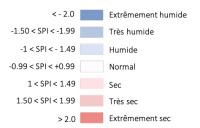


Tableau 11 : SPI de La Chaux de Fonds (1017m) et Couvet (900m) depuis 1901 (dataMeteoSuisse 2021a, Cuenot A., 2021)



Tableau 12 : SPI du Sentier – Les Bioux (1024m) et des Brenets (908m) depuis 1901 (dataMeteoSuisse 2021a, Cuenot A., 2021)





L'évolution de la part de chaque SPI a ensuite été réalisée. Pour cela, nous avons séparé les valeurs obtenues en 5 catégories (extrêmement sec, très sec, moyennement sec, normale et humide<sup>29</sup>), pour 4 périodes de 30 années : 1901-1930, 1931-1960 ; 1962-1990, 1991-2020. Chaque catégorie a été divisée par le nombre total mois que chaque période possède, puis ensuite multiplié par 100. Selon les résultats obtenus (figure 42), nous pouvons de nouveau remarquer qu'il n'y a pas d'évolution significative du nombre de mois secs depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle pour toutes les stations. En revanche, de légères différences sont visibles entre les périodes de 1961-1990 et 1991-2020. En effet, la part de jours humides avec un indice SPI supérieur à 0.99 (couleur bleu) semble moins important sur la période 1991-2020 que sur la période 1961-1990. Les jours dits « normaux », qui ont une valeur SPI entre -0.99 et 0.99 sont quant à eux plus fréquents sur la période 1991-2020. Aucun gros changement n'apparait pour les mois avec des valeurs SPI supérieures à 0.99 (humide).

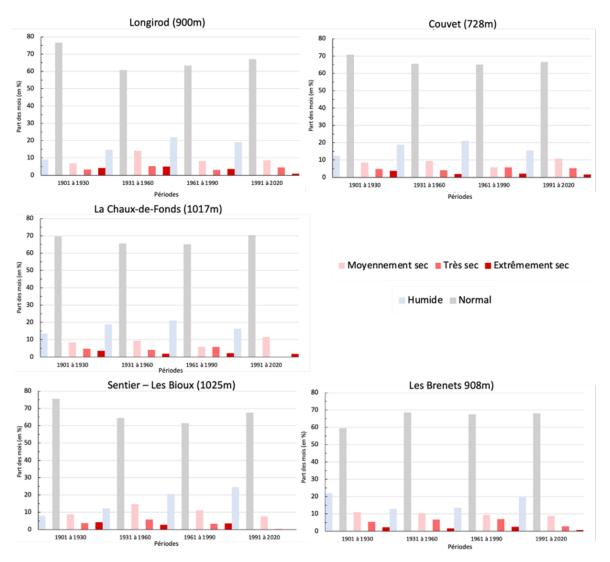


Figure 42 : Évolution de la part des mois en fonction de leur indice SPI depuis 1901 à Longirod (900 m), Couvet (728 m), La Chaux-de-Fonds (1017 m), au Sentier – Les Bioux (1025 m) et aux Brenets (908 m) (dataMeteoSuisse 2021a, Cuenot A. 2021)

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Une seule catégorie a été représentée pour les mois humides pour cause de visibilité.

# 3.3.1 ÉTE 2003: L'ETE DES RECORDS

#### 3.3.1.1 Contexte météorologique

L'été 2003 a été une période exceptionnellement chaude pour la Suisse, la France et toute l'Europe. Des températures anormalement élevées ont été mesurées entre les mois de mai et septembre, les valeurs les plus anormales ayant été atteintes en juin et août. En Suisse, ces deux mois ont connu des températures moyennes situées entre 4.0 et 5.5 °C au-dessus des normales de température pour la période 1864-2003 (ProClim & OcCC, 2005). Un été aussi chaud n'avait pas été recensé depuis des centaines d'années. Il a fallu remonter à l'été 1540 pour retrouver une situation comparable (ProClim & OcCC, 2005).

Cette canicule a été couplée à une période de déficit des précipitations et d'humidité. En effet, selon les bulletins météorologiques de Météo-France pour le département du Doubs (annexe 16), le déficit des précipitations a été constant toute l'année et a duré de février 2003 à juin 2004. La sécheresse de cette année a été générée par des vents de Sud-Sud-Ouest qui ont amené de l'air tropical sec depuis l'anticyclone des Açores qui était localisé un peu plus à l'est que la normale (ProClim & OcCC, 2005). Ces conditions atmosphériques ont engendré un climat de type continental de haute pression avec une durée prolongée des déficits pluviométriques et des températures extrêmement élevées (annexe 16).

Étudions maintenant l'impact hydrologique local de cette période chaude et sèche. Premièrement, analysons les indices SPI des stations pluviométriques des Brenets (908 m : tableau 13) et du Sentier – Les Bioux (1025 m : tableau 14) qui sont les stations les plus proches des lacs des Brenets et de Joux. Ces deux stations semblent avoir eu la même évolution au cours de l'année 2003.

La station des Brenets (908 m) recense des indices SPI négatifs à partir du mois de mai. Les valeurs les plus basses ont été calculées pour les mois de juillet, août et sptembre 2003. De plus, ces indices sont restés négatifs jusqu'en décembre 2003 (tableau 13). Ces résultats sont corrélés avec les données hydrologiques. En effet, le lac des Brenets a vu son niveau baisser en 2003 et cette décrue s'est enclenchée dès le mois de juin cette année-là (figure 43). Pour la station du Sentier – Les Bioux (1025 m), les indices SPI ont été négatifs depuis le mois de juin et ont également atteint leurs valeurs minimales entre juillet, août et septembre 2003 (tableau 14). Là encore, ces indices ont été négatifs jusqu'au mois de novembre 2003.

Tableau 13 : Indice SPI à la station des Brenets (908 m) entre 2000 et 2005 (dataMétéoSuisse 2021a, Cuenot A., 2021)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2000	0.47	1.19	0.8	0.56	0.78	-0.36	0.33	-0.54	-0.41	-0.1	-0.03	0.34
2001	0.07	0.1	1.33	1.7	1.37	1.55	1.93	2.11	1.36	0.67	0.89	0.65
2002	-0.21	0.07	-0.3	-0.58	-0.2	-0.27	0.62	0.65	0.68	1.55	2.31	2.27
2003	2.2	1.77	1.49	0.98	-0.65	-1.17	-1.89	-1.99	-1.86	-0.92	-0.95	-0.84
2004	0.3	0.28	0.47	-0.28	-0.31	-0.04	-1.2	-0.11	-0.16	0.78	0.73	0.6
2005	0.89	0.49	0.37	0.1	0.36	0.21	-0.29	-0.59	-0.15	-0.82	-1.06	-0.51

Tableau 14 : Indice SPI à la station du Sentier – Les Bioux (1025 m) entre 2000 et 2005 (dataMétéoSuisse 2021a, Cuenot A., 2021)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2000	1.18	1.34	1.39	1.28	1.16	0.98	0.77	0.49	0.6	0.59	0.8	0.98
2001	1.41	1.75	2.03	2.35	2.7	2.9	2.72	2.6	1.81	0.98	0.14	-0.11
2002	-0.22	-0.28	-0.18	-0.05	0.04	0.13	0.18	0.31	0.7	1.02	1.35	1.61
2003	1.65	1.46	1.06	0.59	0.06	-0.6	-1.23	-1.41	-1.25	-0.93	-0.26	0.2
2004	0.44	0.51	0.64	0.57	0.23	0.01	-0.08	-0.08	-0.18	0.17	0.32	0.35
2005	0.2	0.12	0.15	0.07	0.05	-0.02	-0.05	-0.46	-0.89	-1.07	-1.2	-1.25

#### 3.3.1.2 Les eaux de surface

Pour analyser l'évolution des eaux de surface, prenons les graphiques 43 et 44, qui représentent le niveau des lacs des Brenets et de Joux en 1976 et 2003.

En 2003, le niveau du lac de Joux a connu une première décrue dès mars (figure 44). Cette baisse du niveau de l'eau ne se traduit pas par un manque de précipitations, mais par des précipitations sous forme de neige. Lorsqu'il neige, l'eau est stockée en surface et ne s'écoule pas. En revanche, quand les températures augmentent, la neige fond, se liquéfie, et génère l'augmentation du niveau des écoulements, des rivières et des lacs. Sur le lac des Brenets, les effets de la neige ne sont pas visibles puisque son bassin versant se situe à une altitude moins élevée. Les précipitations sont donc tombées sous forme de pluie et se sont écoulée directement.

Une autre décrue est également visible sur les deux graphiques. Pour les deux lacs, cette décrue est apparue en juin et s'est accentuée jusqu'en septembre pour le lac des Brenets, et octobre pour le lac de Joux. Cette baisse s'apparente à la période d'étiage provoquée par le manque de pluie de la sécheresse de 2003 (figure 43, 44).

Le niveau du lac de Joux a eu une évolution semblable lors des sécheresses de 1976 et de 2003 (figure 44). La première baisse de niveau provoquée par l'enneigement a été plus forte en 1976. Cela pourrait s'expliquer par un enneigement plus important en 1976. Néanmoins, pour la décrue de l'été, le lac a atteint 1002,58 m environs ces deux année-là. Ce niveau minimum a été atteint en août durant l'été 1976 et en septembre durant l'été 2003. En ce qui concerne le lac des Brenets lors des sécheresses de 2003 et 1976, nous pouvons remarquer que la sécheresse de 2003 a eu le plus fort impact sur le niveau du lac (figure 43). En effet, son altitude minimale a été de 746 m en 1976 contre 744 m en 2003.

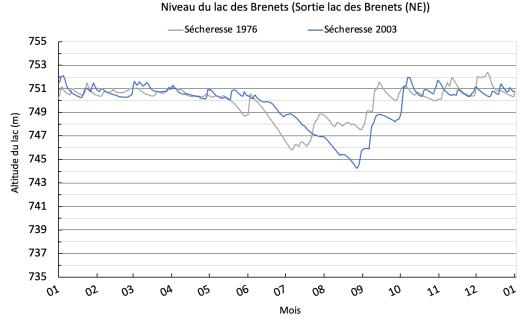


Figure 43 : Altitude du lac des Brenets lors des sécheresses de 1976 et 2003 (dataOFEV, 2021)

# Niveau du lac de Joux (Station de pompage du Pont (VD))

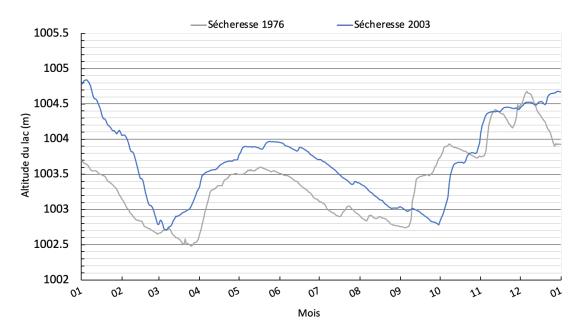


Figure 44 : Altitude du lac de Joux lors des sécheresses de 1976 et 2003 (dataOFEV, 2021)

## 3.3.1.3 Les eaux souterraines

La sécheresse de 2003 a également eu un impact sur les ressources souterraines régionales. Pour illustrer cela, regardons les relevés obtenus à la station de pompage Champagne III située à Pontarlier (figure 45). Le niveau de la nappe de l'Arlier a connu une baisse constante depuis le mois d'avril cette année-là pour atteindre son niveau minimal au mois de juillet 2003 (figure 45). L'eau avait alors atteint le niveau de la cote de désamorçage du puits qui avait dû être ralenti durant quelques semaines (Lonchampt F., communication personnelle, 15.04.2021; ProClim & OcCC, 2005).

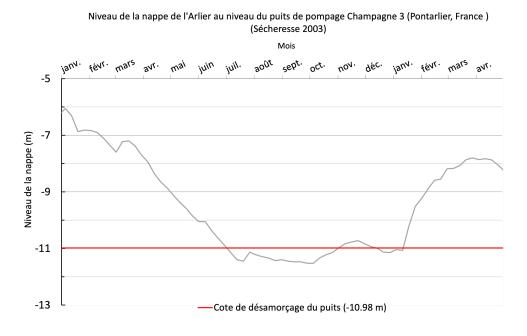


Figure 45 : Évolution du niveau de la nappe de l'Arlier en 2003 (GrandPontarlier, 2021)

#### 3.3.2 Annee 2018: Une secheresse inattendue

# 3.3.2.1 Contexte météorologique

La sécheresse de 2018 fut l'une des dernières grandes sécheresses qu'a connue l'Europe occidentale. Dès juillet, des hautes pressions centrées sur la Scandinavie ont engendré l'apport d'air continental chaud sur l'Est de la France et la Suisse cette année-là (OFEV et al., 2019). 2018 est le troisième été le plus chaud après 2003 et 2015 (figure 46). En Suisse, les températures moyennes des mois de juin, juillet et août ont été supérieures de 2°C par rapport aux normales de 1981-2010, et une période caniculaire s'est installée sur la région du 24 juillet au 8 août (OFEV et al., 2019).

# Températures moyennes estivales depuis 2000

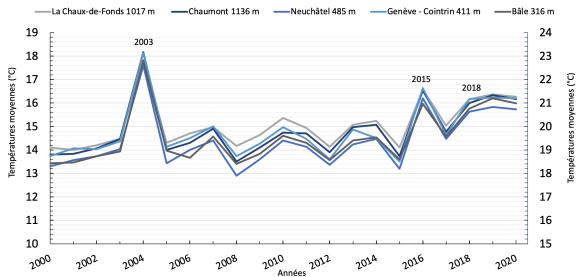


Figure 46 : Températures moyennes estivales pour les stations de La Chaux-de-Fonds (1017 m), Chaumont (1136 m) (ordonnée gauche) et Bâle(316 m), Neuchâtel (485 m), Genève-Cointrin (411 m) (ordonnée droit) depuis 2000 (dataMeteosuisse 2021a, Cuenot A., 2021).

Pourtant, au regard des premiers mois de l'année (annexe 17), personne n'aurait pu imaginer que 2018 allait devenir une année record avec une sécheresse parmi les plus importantes depuis le début des relevés météorologiques. La sécheresse de 2018 s'est étendue en seconde partie d'année. Les mois les plus secs ont été les mois de septembre, octobre et novembre. Le début de l'année 2018 a été relativement humide avec un indice SPI mensuel au-dessus des 0.99 dès le mois de février. Cela peut être visualisé avec les indices SPI calculés sur 6 mois (tableau 15, 16). En effet, nous pouvons remarquer que ces indices sont plutôt « élevés » jusqu'en juin. Ensuite ils passent en-dessous de zéro, jusqu'à

-2. Cela s'est traduit par les déficits pluviométriques importants cités plus haut.

Tableau 15 : Indice SPI à la station des Brenets (908 m) entre 2015 et 2020 (dataMétéoSuisse 2021a, Cuenot A., 2021)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2015	-0.09	-0.29	0.23	0.41	0.55	0.73	0.06	-0.24	-0.28	-0.86	-0.69	-1.37
2016	-0.3	0.4	0.2	1.04	1.11	2.11	1.19	0.38	0.25	-0.54	-0.6	-1.86
2017	-1.83	-1.29	-0.92	-1.08	-1.19	-0.69	-0.57	-0.59	-1.1	-1.07	-0.71	0.11
2018	1.12	1.02	1.6	1.49	1.38	0.77	-0.5	-0.69	-1.95	-1.34	-1.44	-1.13
2019	-1.19	-0.81	-0.32	-0.4	-0.38	-0.4	-0.16	-0.15	0.15	0.42	0.45	0.39
2020	0.31	0.16	-0.2	-0.43	-0.53	-0.81	-0.91	-0.68	-0.32	-1.06	-1.7	-2.17

Tableau 16 : Indice SPI à la station du Sentier – Les Bioux (1025 m) entre 2015 et 2020 (dataMétéoSuisse 2021a, Cuenot A. 2021)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2015	-0.15	-0.03	0.11	0.27	0.4	0.4	0.36	0.09	-0.25	-0.56	-0.57	-0.38
2016	-0.14	0.23	0.63	1	1.13	1.18	1.06	0.74	0	-0.72	-1.14	-1.33
2017	-1.34	-1.4	-1.28	-1.05	-0.96	-1.03	-1.18	-1.33	-1.46	-1.2	-0.44	0.25
2018	0.94	1.49	1.86	1.82	1.62	1.33	0.74	-0.29	-1.35	-1.44	-1.49	-1.32
2019	-1.07	-0.67	-0.34	-0.21	-0.12	-0.13	-0.26	-0.23	-0.09	0.25	0.42	0.82
2020	1.12	1.2	1.14	1.06	0.87	0.43	-0.05	-0.35	-0.62	-0.8	-0.38	0.1

#### 3.3.2.2 Les eaux de surface

Les caractéristiques pluviométriques de cette année 2018 se retrouvent dans l'hydrologie des lacs étudiés. Pour le lac des Brenets, nous percevons très bien les effets du déficit pluviométrique tardif. En effet, le niveau de l'eau était relativement haut et stable jusqu'en juillet. Puis, il a progressivement diminué et une situation d'étiage marquée s'est installée jusqu'à atteindre un niveau record en décembre 2018 (figure 47). En 2018, le niveau du lac s'est retrouvé 6 mètres en dessous du niveau minimal relevé lors de la sécheresse de 2003, et 8 mètres en dessous du niveau de la sécheresse de 1976 (figure 47). Cette baisse a été plus grande mais également plus longue. En 2003 un niveau « normal » avait été retrouvé dès le mois d'octobre alors qu'en 2018, ce niveau n'a pas été retrouvé avant le milieu du mois de décembre.

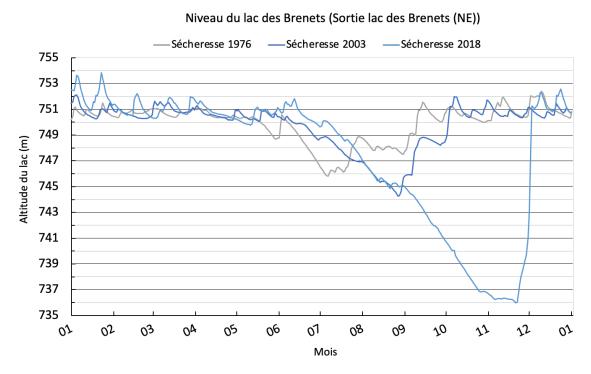


Figure 47 : Niveau du lac des Brenets en 1976, 2003 et 2018 (dataOFEV, 2021)

Le niveau (436 m) atteint par le lac des Brenets en décembre 2018 n'avait jamais été atteint par le passé. Le graphique ci-dessous (figure 48) illustre bien l'importance de cette sécheresse par rapport aux différentes périodes sèches que la région a connus depuis 1975.

#### Niveau du lac des Brenets (Sortie lac des Brenets (NE)) de 1975 à 2020 Altitude du lac (m) 19<sup>15</sup> Année

Figure 48 : Évolution du niveau du lac des Brenets depuis 1975 (dataOFEV, 2021)

Plusieurs abaissements du niveau de l'eau ont été observés sur le lac de Joux (figure 49). Le premier se localise sur les mois de mars et avril, il est consécutif aux chutes de neiges. Cette première baisse est moins importante qu'en 1976 puisque le niveau était 40 cm en dessous de celui de 2018 pour la même période. Ensuite, son niveau s'est accru pour de nouveau diminuer à partir de juillet jusqu'en décembre, comme en 2003. En revanche en 2018, le lac de Joux a également atteint une altitude record avec un niveau plus faible que pour les années 1976 et 2003. En effet, le niveau du lac est descendu à 1002,56 m, soit 20 cm plus bas qu'en 1976. A la différence du lac des Brenets, les écarts du niveau du lac de Joux sont plus réduits car il est en partie influencé par la CVE (usine hydroélectrique de Vallorbe) située en aval. Néanmoins, son niveau peut varier de 1001.5 m à 1005 m (figure 50) (Bissig, 2004).

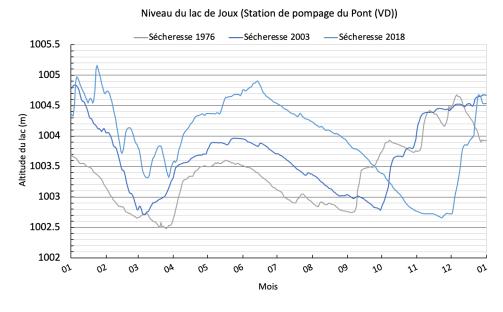


Figure 49: Niveau du lac de Joux en 1976, 2003 et 2018 (dataOFEV, 2021).

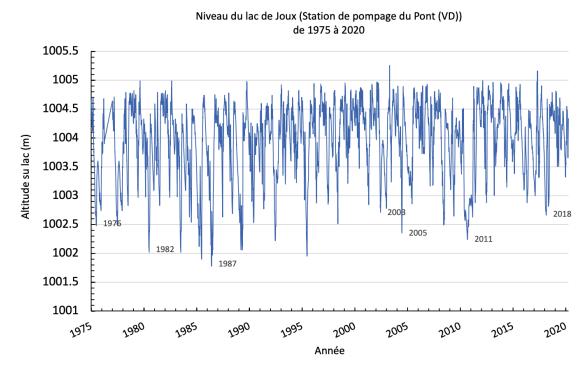


Figure 50 : Évolution du lac de Joux depuis 1975 (dataOFEV, 2021)

Avec l'évolution des conditions météorologiques en 2018, le niveau des deux lacs étudiés a commencé à décroitre à partir du mois de juin 2018 jusqu'à atteindre un niveau minimum en décembre. Ce manque d'eau a particulièrement affecté le tourisme de rivière (OFEV et al., 2019). Certaines compagnies de croisière ont notamment dû cesser leur activité sur le lac des Brenets en partie asséché (Nussbaum, 2018; OFEV et al., 2019) phénomène de nouveau observé en août 2020 (Brignoli, 2020). Tout comme le lac des Brenets, certains tronçons de cours d'eau se sont retrouvés asséchés provoquant d'importantes conséquences sur la faune et la flore aquatique locale. Le Doubs ou encore l'Orbe font partie de ces cours d'eau impactés par la sécheresse de 2018 comme nous pouvons le voir avec l'évolution de la hauteur d'eau de l'Orbe cette année-là, où un niveau d'étiage s'est prolongé jusqu'en novembre (figure 51). Cette situation n'avait pas été la même lors de la sécheresse de 2003. D'après les relevés suivants (figure 51), le niveau de l'Orbe avaient également connu une situation d'étiage, mais un niveau normal avait très vite été retrouvé dès octobre 2003.

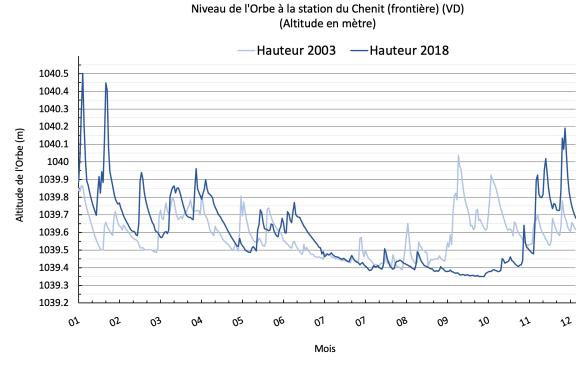


Figure 51 : Niveau de l'Orbe en 2003 et 2018 (dataOFEV, 2021)

#### 3.3.2.3 Les eaux souterraines

En 2018, les réserves d'eau souterraine ont également atteint des niveaux très bas. La nappe de l'Arlier, située près de Pontarlier a de nouveau atteint le niveau de désamorçage de la pompe, comme en 2003. Cependant, la baisse du niveau de la nappe a été plus tardive qu'en 2003 (figure 52). Cela peut s'expliquer par les conditions humides du début de l'année 2018.

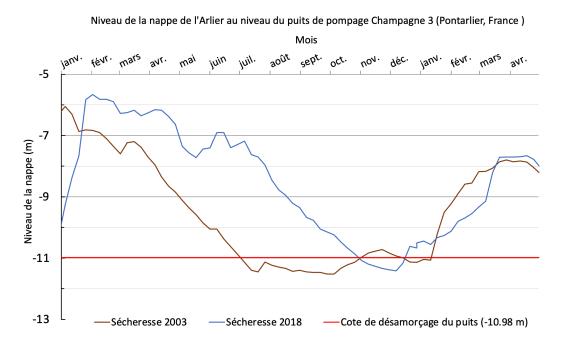


Figure 52 : Niveau de la nappe de l'Arlier en 2003 et 2018 (GrandPontarlier, 2021)

# 3.4 Des consequences sur l'enneigement?

L'évolution de l'enneigement est un autre facteur clé à prendre en compte lorsque l'on réalise une étude climatique jurassienne. L'altitude et notamment la température ont un rôle essentiel sur les moyennes annuelles des chutes de neige (Serquet & Rebetez, 2013). En effet, une grande partie du territoire jurassien possède un climat montagnard, la neige y est présente chaque hiver et joue un rôle important dans l'hydrologie locale, et plus particulièrement lors de la fonte au printemps. Contrairement à la pluie, la neige a un temps de réponse beaucoup plus long. De la neige tombée en début d'hiver aura des répercussions sur le système hydrologique seulement lors de sa fonte au printemps. La quantité d'eau générée par la fonte des neiges contribue à la montée du niveau des nappes mais également aux écoulements de surface (Musy & Higy, 2004). Moins de neige en hiver se traduit par plus de débit dans les cours d'eau à cette saison, mais a des périodes d'étiages plus importantes en été, modifiant fortement les régimes hydrologique régionaux (Milano et al., 2015).

Depuis les années 1960, certaines stations jurassiennes mesurent les quantités de neige tombées chaque hiver. C'est notamment le cas de La Chaux-de-Fonds (1017 m) et de Chaumont (1136 m) qui relèvent les précipitations neigeuses depuis 1964, et de La Cure (1185 m) depuis 1969. D'après l'analyse des données, les chutes de neige annuelles ont diminué entre les années 1980 et 1990 dans le Jura, puis elles sont restées constantes, voire ont même légèrement augmenté au début des années 2000 (figure 53). Serquet & Rebetez (Serquet & Rebetez, 2013) ont observé une diminution du nombre de jours avec des précipitations neigeuses de 13% à 6% en 10 ans depuis les années 1990 pour les stations suisses se localisant entre 801 et 1100 m. Selon les données obtenues, cette diminution ne semble pas s'observer sur les stations citées précédemment (La Chaux-de-Fonds (1017 m), Chaumont (1136 m) et La Cure (1185 m).

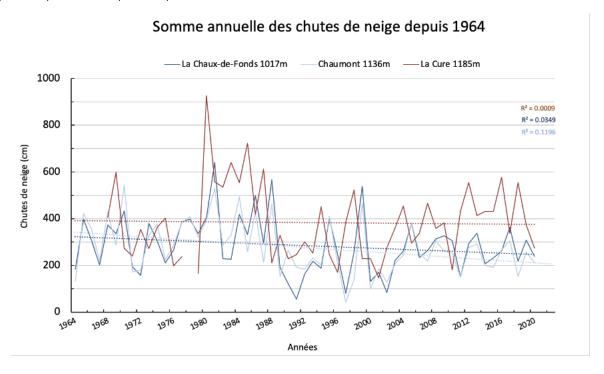


Figure 53 : Évolutions des moyennes annuelles des chutes de neige depuis 1964 à La Chaux-de-Fonds, La Cure et Chaumont (dataMétéoSuisse 2021a, Cuenot A.2021).

Nous pouvons nous demander si la diminution de neige a une répercussion sur l'apparition des sécheresses hydrologiques de 2003 et 2018. La présence de neige en hiver peut être perçue comme une source d'eau importante pour le renouvellement des nappes phréatiques au printemps. En effet, celle-ci est considérée comme de l'eau temporairement stockée en surface qui, à long terme, va fondre et permettre d'approvisionner les sols au printemps lorsque les plantes en auront le plus besoin pour leur croissance. Or, si les quantités de neige diminuent à l'avenir, c'est toute une partie du cycle de l'eau jurassien qui sera bouleversée

Regardons l'importance de l'enneigement des hivers précédents les sécheresses de 2003 et 2018. Comme pour les températures, l'écart moyen des chutes de neiges pour chaque hiver a été calculé par rapport à la moyenne des chutes de neige pour la période de 1981 à 2010 (figure 54).

Nos résultats indiquent que les quantités de neige tombées les hivers précédant les sécheresses de 2003 et 2018 étaient plus basses que les quantités moyennes calculées pour la période 1981-2010, pour les stations de Chaumont et La Chaux-de-Fonds. D'autres hivers ont également été moins enneigés. C'est le cas par exemple des hivers 1997, 2000 ou encore 2002. En revanche, ces 3 années n'ont pas connu de sécheresses marquantes. Il est probable que des précipitations plus importantes le reste de l'année aient joué un rôle crucial ces années-là.

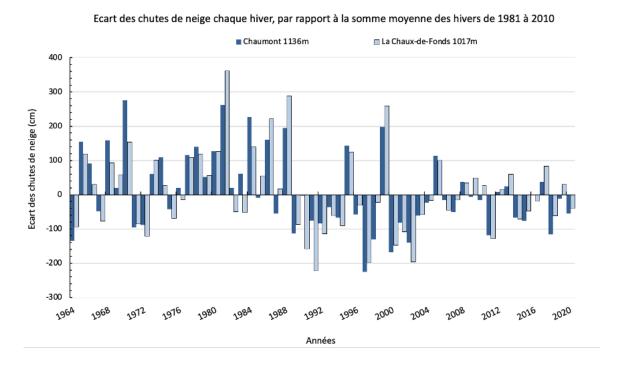


Figure 54 : Évolution de l'écart des chutes de neige chaque hiver par rapport à la moyenne des hivers de 1981 à 2010 (source : MétéoSuisse 2021a, Cuenot A. 2021).

# CHAPITRE IV - IMPACT DES SECHERESSES SUR LA GESTION DE L'EAU

Au cours des deux dernières décennies, les communes jurassiennes ont connu différentes périodes de sécheresse. La première du 21<sup>e</sup> siècle a été celle de 2003 et la dernière en date est celle de 2018, même si les étés 2019 et 2020 ont eux aussi été particulièrement secs. Dans cette partie, nous nous intéressons aux mesures qui ont été prises dans les communes du Chenit et de Pontarlier lors des sécheresses de 2003 et 2018.

#### 4.1 LA LEGISLATION QUI ENCADRE LES SECHERESSES

#### 4.1.1 LES MESURES CANTONALES ET COMMUNALES POUR LA SUISSE

En Suisse, chaque canton doit être en mesure de répondre aux problèmes d'approvisionnement en eau potable lors d'une crise. En règle générale, selon M. Cotting, « le canton de Vaud laisse chaque commune décider quelles restrictions mettre en place selon leur situation » (Cotting P., communication personnelle, 14.01.2021). Néanmoins, lorsqu'une crise plus grave apparaît, le canton peut intervenir pour appliquer les mesures nécessaires. Ces mesures reposent aujourd'hui sur l'Ordonnance de la garantie de l'approvisionnement en eau potable lors d'une pénurie grave datée du 1er octobre 2020 (OAP RS 531.32). Cette ordonnance oblige les cantons à prendre toutes les mesures nécessaires afin de garantir un approvisionnement en eau potable, même en période critique.

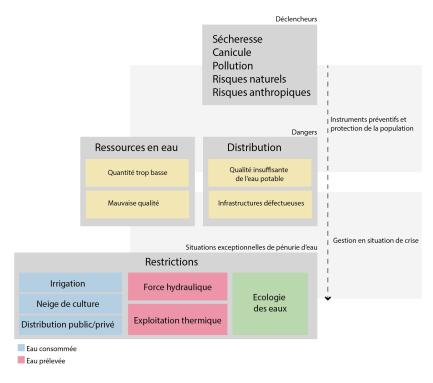


Figure 55 : Prise de mesures exceptionnelles en période de crise en Suisse selon Dübendorfer, et al., 2015 modifié (Cuenot A., 2021).

Ces mesures peuvent s'appliquer à l'agriculture, au tourisme, à la consommation domestique ou encore à l'industrie (figure 55). Elles peuvent être conduites à différentes échelles à travers des restrictions, mais également par une préparation de la crise en amont, notamment sur les infrastructures de distribution de l'eau (art.4 OAP RS 531.32). L'objectif de cette ordonnance est « d'assurer la disponibilité d'une quantité minimum d'eau potable en temps de crise, par exemple 4 litres par personne et par jour jusqu'au 5e jour » (art.1 OAP RS 531.32). Dans le canton de Vaud, ces mesures sont décidées par la commission cantonale de gestion des ressources en eau (GRE), créée en 1977 pour répondre aux problèmes engendrés par la sécheresse de 1976. Cette commission est responsable de prendre des mesures sur la gestion de l'eau en période de crise en appliquant l'ordonnance OAP. Les décisions sont coordonnées avec les cantons de Genève et de Fribourg. Cette commission se réunit en général une à deux fois par an. Elle compte 7 membres représentant :

- La Direction générale de l'environnement, domaine des eaux de surface, des eaux souterraines et de l'hydrogéologie (DGE).
- Le Service des améliorations foncières (SAF).
- Le Service de la pêche.
- Le Service de l'agriculture.
- Le Service de la consommation et des affaires vétérinaires, section distribution de l'eau (SCAV).
- Les assurances bâtiment (subventions au réseau de conduites d'eau).

En cas d'événement exceptionnel, une réunion d'urgence est organisée afin de mettre en place des mesures spécifiques pour répondre au mieux à la crise en cours. Les mesures peuvent être de simples préventions voire des mesures concrètes de protection et de restriction (Dübendorfer et al., 2015). La majorité des mesures prises lors de ces commissions sont accessibles sur le site du canton sous forme de communiqué de presse (annexe 18).

#### 4.1.2 LES DECISIONS DEPARTEMENTALES POUR LA FRANCE

En France, les mesures de restrictions d'eau sont prises à l'échelle départementale. Ce sont les préfets des départements qui interviennent et font appliquer les mesures pour faire face à une pénurie de la ressource en eau. Ces derniers sont amenés à mettre en place des mesures exceptionnelles afin de limiter ou de suspendre des usages de l'eau. Ces mesures s'inscrivent dans l'article L.211-3 du code de l'environnement du 26 janvier 2017 et de la circulaire du 18 mai 2011 relative aux mesures exceptionnelles de limitation ou de suspension des usages de l'eau en période de sécheresse (NOR : DEVL1112870C).

Les décisions des préfets sont prises par le « comité ressource en eau ». Ces comités doivent refléter l'ensemble des usages de l'eau et réunissent :

- Les techniciens en charge de la gestion des réseaux (communes, intercommunalités, syndicats),
- Les représentant de l'Office national de la Biodiversité (OFB),
- Les pompiers,
- Les gendarmes,
- Les météorologues,
- Le préfet ou un représentant de la préfecture.

Lors des séances, chaque partie présente un aperçu des conséquences de la crise en cours. Des scénarios sont émis en fonction des prévisions météorologiques, notamment pour prédire l'évolution des quantités d'eau disponibles. En période de grande sécheresse, la commission se réunit toutes les deux semaines. « Cette organisation a pour but de réagir rapidement en cas de crise et permet de mettre en place une concertation entre les différents acteurs d'un même bassin versant » (Laresh J.N., communication personnelle, 16.03.2021).

Le préfet soumet ensuite des « arrêtés sécheresse », pour une durée et une zone limitée (figure 56). Ces mesures sont établies localement et équitablement de façon à ne pas pénaliser certaines zones d'un même bassin versant. Ces arrêtés limitent et priorisent l'emploi de l'eau pour des usages prioritaires comme la sécurité civile (réserve en cas d'incendie), la santé, l'approvisionnement des populations en eau potable ou la préservation des écosystèmes. Les mesures évoluent en fonction des bassins versants, de l'ampleur des crises, et des décisions des préfectures.

4 niveaux d'alertes ont été définis en fonction de l'ampleur de la crise (tableau 17). Puis, selon ces niveaux d'alertes, des mesures de limitation des prélèvements sont progressivement mises en place:

T 11 47 44		/ • 1 1 / 1	c	1 11
Tahleau 17 Nlesures	nrises en	nériode de sécheresse	en tonction a	de l'intensité de l'alerte.
Tubicuu III. IVicuuicu	prises en	periode de secricies		ic i illicitotte ac i alci te.

Niveau	Mesures
« Vigilance »	Information et incitation des particuliers et des professionnels à faire des économies d'eau.
« Alerte »	Réduction des prélèvements à des fins agricoles inférieure à 50% (ou interdiction jusqu'à 3 jours par semaine), mesures d'interdiction sur les activités nautiques, interdiction à certaines heures d'arroser les jardins, espaces verts, golfs, de laver sa voiture.
« Alerte renforcées »	Réduction des prélèvements à des fins agricoles supérieure ou égale à 50% (ou interdiction supérieure ou égale à 3,5 jours par semaine), limitation plus forte des prélèvements pour l'arrosage des jardins, espaces verts, golfs, lavage des voitures,, jusqu'à l'interdiction de certains prélèvements.
« Crise »	Prélèvements non prioritaires interdits y compris les prélèvements à des fins agricoles. Seuls les prélèvements permettant d'assurer l'exercice des usages prioritaires sont autorisés (santé, sécurité civile, eau potable).

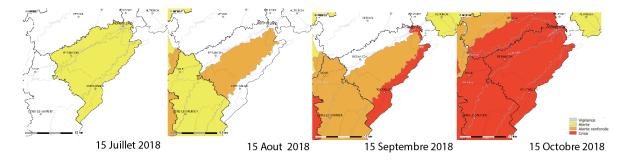


Figure 56 : Évolution du niveau d'alerte de juillet à octobre 2018 sur le département du Doubs (Département du Doubs).

#### 4.2 IMPACT DES DERNIERES SECHERESSES

#### 4.2.1 LA SECHERESSE DE 2003

#### 4.2.1.1 Contexte

L'année 2003 débute avec des mois relativement humides. Les indices SPI relevés notamment à Longirod (900 m) ou Couvet (728 m) sont tous positifs jusqu'en avril. En revanche, la suite de l'année est caractérisée par des déficits pluviométriques observés dès le milieu du printemps (MétéoSuisse et al., 2004). Les indices SPI sont négatifs depuis le mois de mai et le restent jusqu'à la fin de l'automne sur les différentes stations jurassiennes étudiées plus haut (ch 3.3). Parallèlement, des températures plus hautes que les moyennes de saison sont relevées tout au long de l'été, particulièrement au mois d'août, lorsqu'une canicule touche le massif sur une période de 11 jours (annexe 16). Un déficit pluviométrique prolongé couplé à des températures très hautes aura des répercussions directes sur les quantités d'eau disponibles sur le massif jusqu'à l'automne.

#### 4.2.1.2 Le Chenit

Dans le canton de Vaud, la sécheresse devient problématique dès le début de l'été où certains cours d'eau voient leur niveau baisser rapidement. Dès le 1<sup>er</sup> juillet, le pompage de l'eau d'arrosage dans les cours d'eau du canton est interdit (Canton de Vaud, 2003a). Cette première mesure avait pour but de réduire l'importance des prélèvements au niveau du canton. Le 18 juillet à Morges, lorsque le niveau de la nappe dans laquelle la commune puise son eau atteint une limite critique, il est demandé à la population de « réduire sa consommation d'eau » (Commune de Morges, 2003). Le 24 juillet c'est le journal L'Hebdo qui publie des photos de l'impact de la sécheresse en cours sur le lac des Brenets et sur les champs agricoles de la région (L'Hebdo, 2003). Dans la vallée de Joux au mois d'août, les sources des Bioux et de la Trompette<sup>30</sup> ne coulent plus assez pour alimenter certains villages dont Les Bioux et L'Orient. De plus, le niveau de l'eau au puits du Lieu a atteint son niveau de désamorçage obligeant l'arrêt des pompes (Bissig, 2004).

Une adaptation de la distribution de l'eau a donc été nécessaire. Le village du Lieu a été approvisionné par le puits du Pont via la connexion qui avait été réalisée en 1989. Des restrictions d'usage ont néanmoins été demandées aux habitants du Lieu. Les villages des Bioux et de l'Orient ont également pu être approvisionnés par Le Chenit tout au long de l'été, sans restrictions spécifiques grâce à la source du Brassus<sup>31</sup> et au puits de la Golisse, qui continuaient à fournir suffisamment d'eau pour la consommation des villages (Bissig, 2004). Cette situation a perduré jusqu'à l'arrivée des pluies en octobre 2003.

Au niveau des alpages, la situation a été très compliquée. En plus du manque d'herbages pour nourrir le bétail dû à des sols trop secs, les ressources en eau sont très vites devenues insuffisantes. En effet, les précipitations permettent de remplir les réservoirs d'eau des alpages qui ne sont pas connectés au réseau d'eau et une pénurie de pluie a engendré un assèchement progressif des réserves. Au Chenit, les exploitants se sont ravitaillés dans la vallée en puisant l'eau dans les réservoirs communaux de L'Abbaye et du Brassus dès la fin du mois de juin (Bissig, 2004). Le 20 août, une opération spéciale

-

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> Active à cette époque

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> La source du Brassus continue de fournir un débit d'eau de près des 3000l/min, même en période d'étiage.

appelée « AQUA- CONCERT» a été mise en place d'urgence à l'échelle du canton de Vaud (Canton de Vaud, 2003b). Cette opération a notamment mobilisé l'armée pour livrer de l'eau et du fourrage aux alpages les plus impactés. 37% des alpages jurassiens ont ainsi été secourus entre le 20 août et le 1<sup>er</sup> septembre 2003 (Reymond, 2003).

#### 4.2.1.3 Pontarlier

La sécheresse de 2003 impacte également la France. Dans le quart Nord-Est, les déficits de précipitations ont atteint 50%, et « c'est la zone métropolitaine où la sécheresse météorologique a été la plus grave » (Wahl et al., 2005). En Franche-Comté, le manque de précipitations survenu au cours de l'été 2003 a très fortement impacté le niveau des ressources en eau locales, si bien qu'en juillet il était interdit de pêcher sur le Doubs (Droz, 2003). D'autres cours d'eau comme le Drugeon se sont localement retrouvés à sec (Resch J.N., communication personnelle, 16.03.2021) tandis que le niveau de la nappe de l'Arlier a atteint la côte de désamorçage du puits de Champagne III (figure 57). Pour Pontarlier, la situation de la nappe de l'Arlier a été problématique du fait de son importance primordiale dans l'alimentation en eau de la ville au quotidien. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre II, le puits de Champagne III est l'un des deux puits (Champagne II et III) d'approvisionnement en eau de Pontarlier. Pour combler le déficit, l'apport en eau du lac Saint-Point vers Pontarlier a été augmenté jusqu'à devenir le second point d'alimentation (avec le puits de champagne II) de la ville entre les mois d'août et novembre 2003 (figure 57).

# Origine de l'eau potable de la ville de Pontarlier en 2003 Puits de Champagne II ——Puits de Champagne III ——Lac Saint-Point 200 000 180 000 160 000 Quantité consommée 140 000 120 000 100 000 80 000 60 000 40 000 20 000 0 Mois

Figure 57 : Origines de l'approvisionnement en eau potable de Pontarlier en 2003 (GrandPontarlier, 2021)

#### 4.2.2 LA SECHERESSE DE 2018

#### 4.2.2.1 Contexte

Les premiers mois de 2018 ont été plutôt humides. Comme mentionné au chapitre III, certains cours d'eau du massif jurassien ont même connu d'importantes crues en janvier et février 2018. Sur toutes les stations observées, les indices SPI ont été positifs jusqu'à la fin du printemps, notamment grâce à d'importants orages. Puis, de fortes chaleurs accompagnées de déficits pluviométriques se sont progressivement installés sur le Jura avec des conditions chaudes et très sèches perdurant sur le massif jusqu'à la fin de l'automne 2018 (annexe 17).

#### 4.2.2.2 Le Chenit

Dans le canton de Vaud, les étiages des lacs et des cours d'eau ont été importants dès la fin du mois de juillet (OFEV et al., 2019). Cette situation s'est accentuée dans les mois qui ont suivi, si bien qu'en octobre, le canton de Vaud comptabilisait un déficit de pluie de 50% par rapport à la normale sur une période juillet-octobre (ATS, 2018). Certains lacs ont vu leur niveau baisser drastiquement. Le lac de Joux a perdu par exemple près de 2 m, diminuant fortement son débit de sortie (ATS, 2018). Situé plus en amont, l'Orbe a atteint également des niveaux très bas. Ce cours d'eau a d'ailleurs été maintenu en eau uniquement par le trop-plein de la source du Brassus, car comme lors de la sécheresse de 2003, le débit de cette source était suffisant pour maintenir l'approvisionnement en eau du Chenit (Rogenmoser L., communication personnelle, 4.03.2021). En 2018, le réseau de distribution d'eau de la vallée de Joux était déjà interconnecté et l'eau a pu alimenter les différents villages de la vallée plus facilement que lors de la sécheresse de 2003 quand seules des petites portions étaient en place. La source du Brassus et les puits du Pont et de la Golisse ont été les principales sources d'approvisionnement en eau lors des périodes d'étiage. « Malgré une baisse importante des niveaux de stockage, aucune pénurie sur le réseau d'eau n'a été déplorée en 2018 » (Rogenmoser L., communication personnelle, 4.03.2021).

Les alpages jurassiens qui n'étaient pas connectés au réseau ont quant à eux été très impactés. Après des semaines sans précipitations, les réserves d'eau de certains alpages se sont taries (M. et M<sup>me</sup> Fuchs, communication personnelle, 5.05.2021). Pour faire face à cette situation exceptionnelle, le plan « Alpha 18 » initié par l'Etat-major cantonal de conduite, ainsi que le plan ORCA<sup>32</sup> instauré par le Conseil d'État ont fonctionné conjointement afin de ravitailler les alpages en eau le plus rapidement possible. Ainsi, différents dispositifs de gestion de l'approvisionnement en eau ont été mis en place à travers une permanence téléphonique, de camions citernes et des hélicoptères de l'armée (figure 58) (Canton de Vaud, 2018a). Bien que la majorité des ravitaillements aient été réalisés par les exploitants eux-mêmes, le canton de Vaud a traité au total 120 demandes en moins de 12 semaines. Une opération similaire avait déjà été mise en place lors de la sécheresse de 2015 (Canton de Vaud, 2018b). Dans la vallée de Joux, deux bassins de 50 m³ ont été installés pour effectuer la distribution d'eau (Canton de Vaud, 2018b). Dans le Canton de Vaud, 31% des alpages en ont bénéficié avec 2,3 millions de litres d'eau transportés en 7 jours. De même, 45% des alpages du massif jurassien en ont profité (Prométerre et al., 2019). Dans le Jura vaudois, cette problématique a affecté au total 330 alpages estivants soit près de 20 000 têtes de bétail (Canton de Vaud, 2018b).



Figure 58 : Ravitaillement en eau d'un chalet d'alpage vaudois par camion-citerne et hélicoptère en 2018 (Source : https://protectioncivile-vd.ch/item/secheresse-et-canicule.html).

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> Organisation en cas de catastrophe

#### 4.2.2.3 Pontarlier

La sécheresse de 2018 a impacté de manière importante les ressources en eau dans le Doubs. Malgré un début d'année humide, les premières limitations d'usage de l'eau ont été annoncées dès le 11 juillet dans le Doubs (figure 56) (Arrêté N° 25-2018-07-11-006, 2018). Dès lors, la surveillance des conditions météorologiques ainsi que des niveaux d'eau des sources, lacs et cours d'eau s'est accrue. Dans les semaines qui ont suivi, la situation s'est aggravée et, après être sorti de son lit en début d'année, le Doubs s'est retrouvé totalement à sec sur certains tronçons (figure 59) (Collin, 2018). Plus en aval, le lac des Brenets s'est également asséché. Cette situation dramatique a engendré de graves conséquences sur le tourisme de rivières, puisque des compagnies de croisières ont dû cesser leur activité dès le mois de juillet (Bohnenblust, 2021).



Figure 59 : Tronçon du Doubs à sec en octobre 2018 (Cuenot A., 2018)

La fin de l'été et le début de l'automne (septembre et octobre) ont été le point critique de cette sécheresse. Au cours de cette période, tout le haut massif jurassien du Doubs était en alerte rouge « crise » (figure 56) qui est l'alerte maximale pour un territoire en période de sécheresse. Dans cette situation, les prélèvements non prioritaires sont interdits, y compris les prélèvements à des fins agricoles. Seuls les prélèvements permettant d'assurer des usages de santé, sécurité civile, ou domestique, sont autorisés. A Pontarlier, comme en 2003, la nappe de l'Arlier a connu une baisse importante de son niveau atteignant son point le plus bas à la fin de l'année 2018 et le puits de Champagne III a été ralenti à partir d'octobre. Ainsi, le lac Saint-Point est devenu à nouveau la seconde source d'alimentation en eau de la ville (avec le puits de Champagne II) jusqu'à la fin de l'année 2018 (figure 60).

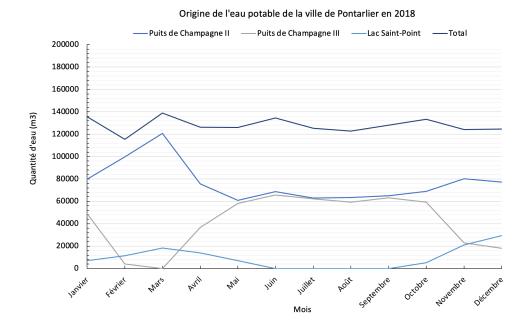


Figure 60 : Origines de l'approvisionnement en eau potable de Pontarlier en 2018 (GrandPontarlier, 2021)

Le niveau du lac Saint-Point est entièrement régulé par un barrage situé à son exutoire. Cette retenue est utilisée depuis la fin du 20<sup>e</sup> siècle pour maintenir un débit résiduel dans le Doubs, principalement pour des raisons écologiques. Comme indiqué plus haut (ch 3.3.2), en été 2018, les aquifères autour de Pontarlier, dont dépendent les puits de Champagne II et III, ont atteint un niveau critique nécessitant le pompage du lac Saint-Point pour approvisionner la ville en eau (Resch J.N., communication personnelle, 16.03.2021). Ainsi, de l'eau était pompée dans le lac en plus des lâchers hebdomadaires réalisés dans le Doubs. Cette double utilisation, associée à un manque de précipitations, a engendré une forte diminution du niveau du lac (figure 61). A partir du mois d'octobre, le niveau du lac atteignait presque le niveau limite de désamorçage<sup>33</sup>, qui aurait engendré un arrêt total du système de pompage.

Au début du mois de novembre 2018, afin de limiter la menace sur l'approvisionnement en eau de Pontarlier et des 13 autres communes qui dépendent du lac Saint-Point, la préfecture décide de diminuer d'urgence les quantités d'eau relâchées dans le Doubs<sup>34</sup>, dans le but de préserver l'eau du lac pour l'approvisionnement de la population. En conséquence, le débit du Doubs a été divisé par trois<sup>35</sup>. Cette décision a été prise en connaissant la particularité karstique du Doubs. En effet, la rivière du Doubs

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> Altitude du lac nécessaire à l'amorçage des pompes. En dessous de ce niveau, la pression exercée par l'eau n'est plus assez importante, ce qui entraîne l'arrêt des pompes (Nibio J.P., communication personnelle, 27.03.2021).

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> La quantité d'eau destinée au soutien à l'étiage du Doubs est près de 40 fois plus importante que la quantité d'eau réservée à l'approvisionnement en eau potable des populations (Charrière S., communication personnelle, 15.04.2021).

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> Au lieu de 600 litres/seconde, seuls 200 litres/seconde d'eau étaient lâchés à la sortie du barrage.

est une rivière karstique caractérisée par la présence de pertes au niveau de son lit. Une partie de l'eau qui s'écoule dans cette rivière s'infiltre dans le karst et ressurgit plus en aval. En 2018, ces infiltrations ont été plus importantes que la normale puisque toute l'eau qui s'écoulait en surface s'infiltrait très rapidement, laissant le Doubs à sec. Selon S. Charrière, Directeur Eau et Assainissement du Grand Pontarlier, « l'eau relâchée dans le Doubs était pour ainsi dire gaspillée puisqu'elle s'infiltrait directement au niveau des pertes et ne s'écoulait plus en surface » (Charrière S., communication personnelle, 15.04.2021).

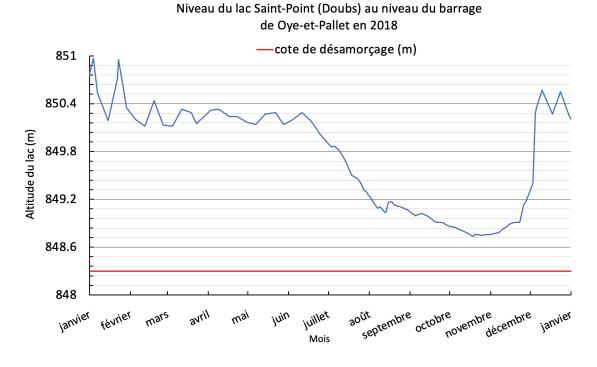


Figure 61: Niveau du lac Saint-Point à Oye-et-Pallet, en 2018 (DREAL, 2020)

#### 4.2.3 DES FACTEURS AGGRAVANTS

L'analyse hydroclimatique développée plus haut a mis en exergue les causes naturelles de l'apparition des sécheresses sur le massif jurassien dues aux conditions climatiques. Néanmoins, les activités humaines ont également leur part de responsabilité. Voici quelques exemples.

Pontarlier se situe à la limite d'un aquifère poreux qui permet aux précipitations de s'infiltrer dans le sol et de remplir la nappe de l'Arlier. Cependant, l'imperméabilisation des sols<sup>36</sup> due à la croissance urbaine perturbe ce processus et affecte les réserves en eau naturelle locales (Lonchampt F., communication personnelle, 15.04.2021). De plus, la méthode d'évacuation des eaux usées de la ville a été développée en un seul réseau qui fait converger les eaux sales des ménages ainsi que les eaux de pluie qui ne s'infiltrent pas dans le sol en un même point : la station d'épuration. De ce fait, une grande partie des précipitations qui tombent sur les surfaces urbaines de la ville se retrouvent dans le Doubs

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> Engendrée par l'urbanisation.

après traitement dans la station d'épuration. Le rôle des précipitations sur la recharge des nappes souterraines est donc en partie limitée (Lonchampt F., communication personnelle, 15.04.2021).

L'assèchement des zones humides aux alentours de Pontarlier est un autre constat préoccupant (Sauret M. communication personnelle, 16.03.2021). Ces zones humides sont principalement des tourbières qui peuvent être assimilées à de grandes éponges qui stockent l'eau lorsqu'il pleut et la libèrent progressivement en période sèche (Matthey, 1971). Une partie des aquifères présents aux alentours de Pontarlier sont surplombés de tourbières. Or, beaucoup d'entre elles ont été drainées puis asséchées à des profits agricoles, et ne stockent plus suffisamment l'eau nécessaire à la recharge des nappes et des cours d'eau(Muller & Darinot, 2021).

Comme développé plus haut (ch II), Pontarlier et le Chenit ont une consommation d'eau non négligeable. Dans la vallée de Joux, « c'est près de 1500 m³ d'eau qui sont distribués quotidiennement » (Cotting P., communication personnelle, 14.01.2021). A Pontarlier, la distribution journalière approche les 4000 m³ (Charrière S., communication personnelle, 15.04.2021). Les consommations d'eau domestique et industrielle affectent particulièrement les ressources en eau : ce sont les industries, les hôpitaux et les fromageries qui consomment le plus pour les deux localités,. En effet, lors des périodes de vacances industrielles, les deux communes voient leur niveau de distribution baisser, en particulier lors des vacances d'été (Rogenmoser L., communication personnelle, 4.03.2021 et Lonchampt F., communication personnelle, 15.04.2021).

Ces trois exemples montrent bien que les activités humaines sont des facteurs aggravant une situation dans laquelle les conditions climatiques sont propices à l'apparition de sécheresses sur le massif jurassien.

## 4.3 QUE RETENIR DES SECHERESSES DE 2003 ET 2018 ?

#### 4.3.1 L'IMPORTANCE DE L'INTERCONNEXION

Les changements climatiques en cours associés aux activités humaines modifient les quantités d'eau disponibles : des pénuries peuvent désormais apparaître à certaines périodes de l'année (Hohmann et al., 2007). Afin de répondre à ce nouvel enjeu, les stratégies d'approvisionnement en eau des communes doivent s'adapter. L'objectif est de développer la distribution d'une eau de bonne qualité de manière raisonnée, équitable et durable. L'une des premières solutions trouvées est de développer la cogestion ou l'interconnexion de réseaux d'eau qui sont proches. Auparavant, la gestion de l'eau potable au Chenit et à Pontarlier était réalisée à l'échelle communale. Chaque localité possédait son propre captage et point de stockage pour la consommation de ses habitants. Aujourd'hui, pour simplifier la gestion de l'eau, minimiser les coûts de fonctionnement, diversifier les ressources afin de réduire la vulnérabilité des villes en cas de pollution ou de pénurie d'eau en période de sécheresse (Charrière S., communication personnelle, 15.04.2021), la distribution de l'eau se mutualise entre plusieurs communes.

C'est notamment le cas au Chenit où depuis janvier 2021, les différents villages de la vallée de Joux ont transmis leur rôle de gestionnaire de la distribution de l'eau au syndicat ValRégiEaux (ch 2.1.3.2). Ce syndicat a été créé à partir du syndicat des eaux du Chenit, qui était la seule commune de la vallée de Joux à avoir une gestion professionnelle de sa distribution d'eau potable. « Cette stratégie s'est construite par nécessité il y a plus de 20 ans maintenant » (Cotting P., communication personnelle, 14.01.2021). L'évolution de la gestion de l'eau a également modifié sa tarification. Désormais, le consommateur ne paie plus un forfait mais sa consommation de manière précise. Cela invite les consommateurs à faire davantage attention à leur consommation. En effet, même si le prix du m³ a augmenté, une personne économe en eau payera sa facture moins cher. La même stratégie est utilisée par la commune de Pontarlier. Elle-même gérante de son réseau d'eau jusqu'en 2017, l'eau de la ville est aujourd'hui dirigée par l'intercommunalité du Grand Pontarlier (ch 2.2.3.2). De plus, le nouveau schéma de développement de la ville se construit sur une future interconnexion du réseau de la ville avec les autres syndicats présents sur la plaine de l'Arlier (annexe 19) (Reilé & Doubs, 2012).

Ainsi, nous pouvons constater que les deux communes étudiées ont déjà en partie modifié leur gestion de l'eau. Différents principes ressortent de cette stratégie d'interconnexion des réseaux (Schmid et al., 2014). Elle permet notamment :

- Aboutir à une meilleure coordination entre les différents acteurs,
- Développer une vision globale au-delà des frontières spatiales,
- Avoir assez de ressources financières pour entretenir les installations du réseau,
- Diversifier les sources d'approvisionnement,
- Garantir une distribution de qualité et en quantité suffisante même en période sèche,
- Diminuer la vulnérabilité de chaque source d'approvisionnement,
- Permettre aux consommateurs de mieux gérer leur consommation.

#### 4.3.2. LA FRAGILITE DES ALPAGES FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les dernières sécheresses ont montré à quel point les chalets d'alpage sont touchés en cas de pénuries de précipitations. Les alpages doivent gérer leur ressource en eau à une échelle très locale, en récupérant l'eau de pluie et en la stockant dans des citernes. Avec la baisse des précipitations au printemps et en été comme en 2003 et en 2018, il est devenu plus difficile de maintenir les réserves d'eau sur le long terme.

Pour réduire leur vulnérabilité, certains chalets<sup>37</sup> se sont d'ores et déjà dotés de plusieurs citernes, voir même d'étangs (M. et M<sup>me</sup> Fuchs, communication personnelle, 5.05.2021). Néanmoins, lorsqu'un déficit pluviométrique prolongé apparait, même les chalets les plus préparés sont impactés. En 2018, 48% des chalets possédant au moins 3 sources d'approvisionnement en eau ont été contraints d'importer de l'eau (Prométerre et al., 2019).

Depuis 15 ans, près de la moitié des exploitants de chalets d'alpage ont réalisé des travaux pour améliorer leur approvisionnement en eau (Prométerre et al., 2019). Ces travaux ont été incités par le biais de subventions fédérales de type « améliorations foncières » (AF) mises à disposition par la Direction générale de l'agriculture, de la viticulture et des affaires vétérinaires (DGAV) afin d'améliorer les conditions de production des agriculteurs (Agrihebdo, 2019). Cela passe par la création de nouvelles citernes, la modernisation de leur système d'exploitation, ou encore le raccordement au réseau d'eau général. Dans certains cas, « la proximité des chalets par rapport au Chenit leur permet d'être raccordé au réseau », comme cela a été fait sur la commune du Lieu (Cotting P., communication personnelle, 14.01.2021). Au Chenit, en 2018, les alpages des Grandes Roches et de la Moësette ont été raccordés au réseau. Le projet de raccordement d'une longueur de 1,6 km (figure 62) avait été estimé à près de CHF 1 640 000. Un coût très élevé, mais en partie financé par les ECA<sup>38</sup> (10 à 15%) et les améliorations foncières (AF) (60 à 70% pour certaines parties du tronçon) du Canton de Vaud (Commune du Chenit, 2018).

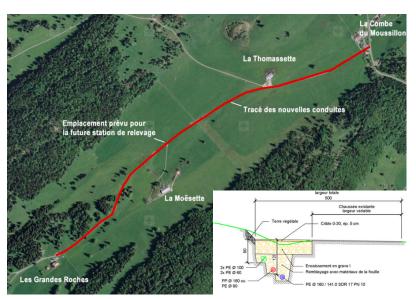


Figure 62 : Conduite d'eau devant raccorder deux alpages au réseau d'eau du Chenit, (Commune du Chenit, 2018)

-

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> Comme l'alpage de Petite Dent et du Grati « Nous disposons d'une citerne qui récupère l'eau du toit. Au Chalet de la Petite Dent Dessus nous avons un filtre UV. Sinon il y a aussi deux autres citernes et un étang ».

<sup>&</sup>lt;sup>38</sup> Établissement d'assurance contre l'incendie et les éléments naturels du Canton de Vaud

Cependant, tous les alpages ne peuvent pas bénéficier de cette alternative. D'autres moyens sont alors mis en place afin d'améliorer leur capacité de stockage. Cela a été le cas en 2019 au Chenit. Selon le préavis du conseil municipal du 28 août 2019 (Commune du Chenit, 2019), la commune du Chenit a autorisé la création de nouveaux réservoirs pour 3 alpages dans le but « d'améliorer la gestion des troupeaux sur la pâture tout en comblant les déficits lors de sécheresses » (Commune du Chenit, 2019). Après avoir été subventionné par le canton et la Confédération, le montant des travaux à la charge de la commune s'élevait à CHF 72 000. Un coût moins important que si ces alpages avaient dû être raccordés au réseau d'eau.

# 4.3.3 DES SOLUTIONS POUR REDUIRE L'IMPACT DES FUTURES SECHERESSES

En parallèle des stratégies d'interconnexion, d'autres modes techniques ou de gestion peuvent être améliorés à l'avenir pour permettre de réduire la vulnérabilité des communes face aux sécheresses. Ceci passe par différents aspects.

# 4.3.3.1 Améliorer le rechargement de la ressource :

Dans un premier temps, l'amélioration de la recharge des réserves souterraines passe par une meilleure protection des zones d'infiltration. Des aires de protection sont d'ores déjà délimitée à Pontarlier et dans la vallée de Joux pour protéger l'espace en amont des points de pompage ou de captage.

Nous avons déjà abordé le problème d'imperméabilisation des sols autour de la ville de Pontarlier en raison de l'urbanisme (ch 4.2.3). Pour combattre la réduction des infiltrations des précipitations dans les sols, des solutions sont d'ores et déjà activées dans les plans d'aménagement de la ville. Depuis quelques années maintenant, le PLU<sup>39</sup> oblige toute nouvelle construction à créer une zone d'infiltration<sup>40</sup> de l'eau sur la parcelle elle-même. « Le constructeur doit réaliser les aménagements nécessaires et normalisés garantissant le stockage, l'écoulement et l'infiltration à même la parcelle si la géologie le permet » (Révision du Plan local d'urbanisme de Pontarlier, 2017). Ces zones s'apparentent à des puits d'infiltration permettant à l'eau de s'infiltrer plus rapidement en profondeur. Le but de cette alternative au « tout tuyau » étant de réduire l'importance du volume d'eau finissant dans le réseau d'assainissement, et de dé-imperméabiliser les sols en augmentant l'infiltration locale de l'eau dans le sol (Lonchampt F., communication personnelle, 15.04.2021). La stratégie mise en place peut paraitre infime face aux surfaces imperméabilisées par l'urbanisation de la ville, mais en accumulant ces points d'infiltration, la quantité d'eau qui réussira à s'infiltrer deviendra plus importante.

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> PLU: plan local d'urbanisme.

<sup>&</sup>lt;sup>40</sup> Pouvant s'apparenter à des noues.

# 4.3.3.2 Mieux préserver la ressource :

Les communes doivent également moderniser leur réseau d'eau. En moyenne sur un réseau d'eau, 20% de l'eau qui circule est perdue à travers les purges de nettoyage, les réserves à incendies et les fuites (Charrière S., communication personnelle, 15.04.2021). Un réseau d'eau en bon état est indispensable si l'on souhaite réduire la consommation de manière globale et une bonne stratégie de gestion ne sert à rien si les infrastructures initiales sont mal ou peu entretenues. Dans la vallée de Joux, d'importantes ressources financières ont été injectées pour moderniser tout le réseau d'eau potable en remplaçant certains tronçons trop anciens qui avaient constamment des fuites, et en créant un nouveau réservoir permettant de terminer l'interconnexion complète de la vallée de Joux. La rénovation du réseau a permis de réaliser des économies d'eau très importantes. Selon M. Rogenmoser, responsable de la distribution de l'eau à ValRégiEaux, « en 5 années les prélèvements d'eau ont été réduits de près de moitié » (Rogenmoser L., communication personnelle, 4.03.2021). De plus, l'informatisation du réseau permet de surveiller les flux d'eau distribués de manière plus précise afin de repérer d'éventuelles fuites sur le réseau.

#### 4.3.3.3 L'accès à de nouvelles ressources

A Pontarlier, la majeure partie de l'eau potable est prélevée dans la nappe de l'Arlier, au niveau des stations de pompage de Champagne II et III. Avec la croissance urbaine, ces puits autrefois loin de toute construction se retrouvent aujourd'hui très proches de la ville. Il est maintenant impossible de protéger ces puits, d'autant plus que la route nationale (RN 57) (très fréquentée) passe juste à côté (annexe 12). Selon la législation, ils sont considérés comme non protégeables. Une situation qui en cas de grave accident, pourrait engendrer l'arrêt des stations de pompage de la ville.

Afin d'éviter cela, l'agglomération du Grand Pontarlier a mis en place des plans de recherche afin de trouver de nouveaux emplacements adéquats pour de futurs puits. Ces puits devront être plus éloignés des infrastructures afin d'être protégés au maximum d'éventuelles pollutions. Au total, 5 sites ont été étudiés et 4 sont maintenus pour un futur plan d'approvisionnement en eau (rond vert annexe 12) (Charrière S., communication personnelle, 15.04.2021). Le premier a été construit en mai 2020 (Est Républicain, 2020). Ces puits ont été sélectionnés à travers différents critères tels que :

- Une qualité chimique de l'eau conforme,
- Une quantité d'eau importante,
- Bien localisées (accès et distribution),
- Exploitables à des coûts acceptables.

Dans la vallée de Joux, la problématique n'est pas la même puisque les principales ressources de la vallée sont plutôt bien protégées. De plus, l'interconnexion de la Vallée permet à la distribution de fonctionner même si un captage doit être arrêté d'urgence. Néanmoins, la vallée possède encore des sources potentiellement exploitables. Celles-ci sont à l'étude et font partie des plans de développement du réseau de la vallée de Joux pour le futur. C'est le cas pour la source de la Lionne actuellement déconnectée du réseau. Cette source devra notamment passer par une étude de protection avant d'être exploitée (Rogenmoser L., communication personnelle, 4.03.2021).

Ainsi, nous pouvons constater qu'il existe des solutions techniques pouvant être développées à l'avenir pour favoriser le stockage naturel de l'eau et diminuer l'impact des sécheresses sur l'accès à l'eau potable.

# CHAPITRE V — SYNTHESE GENERALE

#### 5.1 Analyse hydroclimatique

Les résultats obtenus grâce aux relevés des températures sur les stations jurassiennes sont très clairs. En effet, l'analyse de l'évolution des températures moyennes montre une hausse significative des températures depuis 1901. Si cette augmentation est plutôt faible pour la période 1901-1980 (+0.5°C), elle ne cesse de s'accroître jusqu'à atteindre des records aujourd'hui (+1.5°C entre 1980 et 2020). En 1980, la température moyenne annuelle à Neuchâtel se situait 1,7 °C en-dessous de la moyenne de référence calculée pour la période de référence 1981-2010. Elle a atteint + 0,25 °C en 2000 et même + 2°C en 2018 (figure 32). Des résultats similaires ont été calculés pour La Chaux-de-Fonds. De manière globale, les températures annuelles ont augmenté de 0.19°C à 0.20°C par décennie depuis 1901 sur le massif jurassien (figure 33). Les températures ont augmenté pour chaque saison, de façon homogène sur l'ensemble du massif. Cette augmentation est de l'ordre de 0.16°C à 0.19°C par décennie entre 1901 et 2020 en hiver et au printemps dans le Jura. Cela équivaut à un réchauffement moyen de 1.92°C à 2.28°C entre 1901 et 2020 (figure 34). Ceci se traduit notamment par la diminution de la fréquence du gel en hiver autant pour les stations se localisant au-dessus des 1000 m (La Chaux-de-Fonds 1017 m et Chaumont 1136 m) que pour les stations plus basses comme Neuchâtel (485 m). Dans les années 1990, le nombre de jours de gel était de 120 à Chaumont (1136 m), 130 à La Chaux-de-Fonds (1017 m) et 60 à Neuchâtel (485 m). En 2020, on a compté 90 jours de gel à Chaumont (1136m), 110 à La Chaux-de-Fonds (1017 m) et 30 à Neuchâtel (485 m) (figure 35). Les valeurs mesurées pour La Chaux-de-Fonds sont toutefois à prendre avec précaution puisque la station a été déplacée 2 fois, ce qui a pu influencer les relevés.

La somme des précipitations annuelles relevées sur les différentes stations du massif ne montre pas de changement significatif au cours de la période 1901-2020 (figure 36). En revanche, les précipitations sont affectées de manière importantes si l'on regarde leur évolution par saison. Et le constat n'est pas le même selon la saison (annexe 14). En effet, les données saisonnières révèlent que les précipitations ont augmenté en hiver entre 1901 et 2020. En revanche, le cumul des précipitations tend à diminuer au printemps et en été sur toutes les stations<sup>41</sup> jurassiennes (annexe 14 abc).

L'évolution conjointe des températures et des précipitations hivernales ne semble pas encore avoir d'influence importante sur les quantités de neige tombées sur le massif. D'après les données des stations de La Chaux-de-Fonds (1017 m), Chaumont (1136 m) et La Cure (1185 m), une diminution des chutes de neige avait été mesurée entre les années 1980 et 1990. Mais cette quantité de neige a peu évolué depuis.

# 5.2 Analyse de la gestion de l'eau lors des secheresses de 2003 et 2018

Les sécheresses de 2003 et 2018 ont été des périodes très chaudes et sèches sur l'ensemble du massif jurassien. Lors de ces deux épisodes, les quantités d'eau présentes sur le massif ont dangereusement diminué, pour conduire à l'assèchement total de certains cours d'eau et lacs. Les

<sup>&</sup>lt;sup>41</sup> Exceptée à Longirod (900m).

ressources en eau locales de Pontarlier et du Chenit ont également été impactées, obligeant ces communes à s'adapter afin de maintenir une distribution d'eau en quantité et qualité suffisante.

Les alpages jurassiens qui sont aujourd'hui des acteurs importants dans l'agriculture locale ont été fortement touchés. En effet, du fait de leur isolement en terme d'alimentation en eau et leur important besoin, les alpages ont été très vite à court d'eau suite à ces périodes sans précipitations conséquentes.

L'analyse de l'impact des sécheresses de 2003 et 2018 sur les communes du Chenit et de Pontarlier a permis de mettre en exergue l'importance de l'interconnexion des réseaux de distribution en période de pénurie d'eau. En effet, la diversification des ressources en eau permet de réduire la vulnérabilité des communes en cas de problèmes majeurs<sup>42</sup>, sécurisant ainsi la distribution. On peut remarquer l'importance de l'interconnexion de la vallée de Joux, qui a permis d'éviter les impacts de la sécheresse de 2018 sur les quantités d'eau disponibles. Même si Pontarlier est déjà interconnectée au Syndicat des eaux de Joux, les schémas de développement de la ville montrent que de nouveaux projets d'interconnexion sont à l'étude. Ces interconnexions entrent dans une stratégie globale d'amélioration de la gestion de l'eau qui passe également par :

- La sensibilisation la population sur la préservation de l'eau,
- La rechercher de nouveaux points de captage,
- L'optimisation de l'urbanisme pour améliorer l'infiltration de l'eau,
- La préservation des zones humides,
- L'amélioration de la surveillance des réseaux pour intervenir rapidement en cas de fuite,
- Le développement de la surveillance des eaux pour alerter et réduire rapidement l'usage de l'eau en cas d'étiage.

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> Pollution ou pénurie.

# CHAPITRE VI – DISCUSSION

Les relevés météorologiques des différentes stations présentes sur l'ensemble du massif donnent un aperçu général de l'évolution climatique jurassienne depuis près d'un siècle. Dans ce travail, plusieurs paramètres ont été étudiés dont l'évolution des températures, des précipitations, de l'enneigement et des niveaux hydrologiques pour différentes stations du massif.

Les premiers résultats n'indiquent pas une diminution des précipitations annuelles entre 1901 et 2020 qui aurait pu expliquer les sécheresses observées de manière répétitive en 2003, 2015, 2018, 2019 et 2020. En effet, le niveau des précipitations moyennes annuelles n'a pas évolué de manière significative dans le Jura depuis 1901. L'article de Rebetez (Rebetez, 2005) avait abouti à la même conclusion pour le Jura et les Préalpes Vaudoises . Il était néanmoins important de s'intéresser au massif jurassien et nos résultats pour la somme annuelle des précipitations semblent donc confirmés. .

D'après nos résultats, les précipitations augmentent en hiver et diminuent au printemps et en été sur le massif jurassien (figure 39). Cette tendance est similaire pour toutes les stations étudiées. Des résultats comparables avaient également été relevés pour la Suisse dans différentes études, dont les rapports du NCCS CH2018 (2018) et Hydro-CH2018 (2021). Ces résultats permettent d'expliquer pourquoi même avec l'apparition de grandes sécheresses, les quantités annuelles de pluies restent stables. La problématique de l'évolution des précipitations est une question de quantité certes, mais également de temporalité. Et aujourd'hui, les précipitations semblent être davantage hétérogènes au cours de l'année, avec des périodes très sèches et des périodes plus humides. Cette problématique a été développée dans la thèse de Boé « Les effets des changements climatiques sur le cycle hydrologique » (2007), ainsi que dans l'article de Rebetez (Rebetez, 2005) cité plus haut. Ces derniers ont notamment mis en avant l'augmentation des évènements extrêmes comme les orages qui apportent énormément de pluie en peu de temps.

Les températures relevées dans les différentes stations climatiques du massif montrent une augmentation rapide depuis les années 1980, et ce pour les 4 saisons de l'année. Il s'agit d'un réchauffement moyen de 0.19°C à 0.20°C par décennie entre 1901 et 2020. L'été est la saison où les températures ont le plus augmenté ces dernières années. Des résultats similaires ont été mis en avant pour la Suisse et le Jura dans le rapport NCCS CH2018 (2018) ainsi que dans les différents articles traitant des conditions climatiques jurassiennes (Milano et al., 2015; Rebetez, 2005; Serquet & Rebetez, 2013). En effet, les derniers étés et notamment les étés de 2003 et 2018 ont connu des températures plus hautes que les normales de la période 1981-2010. De plus, les étés connaissent des périodes caniculaires toujours plus longues et intenses chaque année, avec des températures qui restent élevées même la nuit pendant plusieurs jours. La canicule de l'été 2020 est la dernière en date sur le massif jurassien. Elle aura durée entre 6 et 7 jours selon la localité avec des températures moyennes proche des 30 °C en journée (MeteoSuisse, 2021).

D'après notre analyse, ces évolutions ont peu perturbé les quantités de neige présentes chaque année sur le massif. Dans leur article, Serquet & Rebetez (2013) ont écrit que de 1979 à 2008, les précipitations neigeuses hivernales avaient diminué de 6 à 13% par décennie aux altitudes situées entre 800 et 1100 m sur le Jura et dans les Préalpes. Au regard des relevés réalisés à La Chaux-de-Fonds, Chaumont et La Cure, l'enneigement ne semble pas diminuer depuis les années 1990. En effet, après une diminution observée entre les années 1980 et 1990, les chutes de neige n'ont pas évolué de

manière significative depuis 1990 pour les trois stations étudiées. Dans un autre rapport, la CESFR<sup>43</sup> (2010) précise que si les quantités de neige n'ont pas évolué en Franche-Comté depuis les années 1980, la durée annuelle d'enneigement semble quant à elle bien diminuer. Depuis les années 1990, elle a été majoritairement inférieure à 90 jours chaque année, situation qui était plutôt rare avant les années 1980 (CESFR, 2010). En outre, dans leur article Serquet & Rebetez précisent qu'avec l'augmentation des températures, les altitudes comprises entre 800 et 1100 m risquent d'être davantage touchées par le manque de neige en hiver puisque les précipitations de neige seront désormais de la pluie. Il serait donc intéressant de poursuivre cette analyse pour les années futures afin de déterminer l'évolution de ces tendances.

Les cours d'eau jurassiens possèdent actuellement un régime nivo-pluvial (Hydro-CH2018, 2021). Ils sont influencés par les périodes de pluie au cours de l'année, mais également par la fonte des neiges au printemps. Cette fonte participe activement à la recharge des réserves souterraines (Resch J.N., communication personnelle, 16.03.2021). L'évolution future de l'enneigement pourrait engendrer une modification du régime d'écoulement des cours d'eau jurassiens. Dans sa thèse, Renard (Renard, 2006) développe l'analyse des impacts spatio-temporels des écoulements sur des régions de haute montagne. Il en conclut notamment que le manque de neige en hiver peut devenir l'une des explications à l'apparition des sécheresses en été pour une région de montagne, puisque la contribution nivale n'est plus suffisante pour compenser l'absence de pluie et les températures élevées de la saison estivale. Les accumulations de neige agissent comme des réservoirs pour le stockage de l'eau (Nijssen et al., 2001). Toute nouvelle modification des volumes de neige accumulée devrait donc fortement affecter la disponibilité de l'eau dans les environnements montagneux (Adam et al., 2009 ; Barnett et al., 2005 ; de Jong et al., 2009). Cette situation pourrait naître dans le massif jurassien, notamment aux altitudes les plus basses où il ne neigera plus. Il semble cependant encore difficile de déterminer l'impact des chutes de neige sur l'apparition des sécheresses hydrologiques en été dans le Jura. En outre, il est tout à fait concevable qu'une sécheresse soit intensifiée en été si elle apparait après un hiver sans neige.

Dans ce mémoire, l'analyse climatique des sécheresses se base sur l'indice SPI développé par l'OMM. Celui-ci se développe uniquement sur des données pluviométriques. Le choix d'utiliser cet indice est principalement lié à l'accès libre des données. Cet indice apporte de réelles informations sur les sécheresses météorologiques, il permet notamment de se représenter l'intensité et la récurrence des sécheresses. Le 5ème rapport du GIEC (GIEC, 2013) avait exposé qu'aucune tendance claire n'apparaissait pour les sécheresses dans le monde depuis 1950, sauf dans quelques régions subtropicales (Méditerranée) et tropicales (Sahel) où elles tendent à augmenter depuis le milieu du 20e siècle. Le rapport CH2018 (CH2018, 2018) pour la Suisse indique lui aussi que les sécheresses ne montrent pas de tendance significatives pour leur récurrence dans le pays depuis le début du 20e siècle. Selon les modèles climatiques régionaux, la fréquence des sécheresses pourrait toutefois augmenter dans le futur si la diminution des précipitations en été et la hausse des températures et de l'évapotranspiration persistent (CH2018, 2018; GIEC, 2015 et 2018; Hydro-CH2018, 2021). Nos résultats illustrent ces propos puisque lorsque l'on regarde l'évolution des indices SPI depuis le milieu du 20e siècle, il ne semble pas y avoir de tendance à la hausse en ce qui concerne leur récurrence. En revanche, cet indice met en évidence les sécheresses passées. Ainsi, lorsque l'on regarde les indices SPI des

<sup>&</sup>lt;sup>43</sup> Conseil économique et social de Franche-Comté.

différentes stations étudiées, on repère les sécheresses jurassiennes de 1921, 1942, 1954, 1962, 1964 et 1976 pour le 20<sup>e</sup> siècle, et de 2003, 2009, 2011, 2015, 2018, 2019 et 2020 pour le 21<sup>e</sup> siècle.

L'analyse des sécheresses à travers cet indice a été effectué pour d'autres régions dans le monde comme le Maroc avec l'article de Mehdaoui et al. (Mehdaoui et al., 2018), l'Iran avec Salehnia et al. (Salehnia et al., 2017) ou encore São Paulo avec l'étude de Milano et al. (Milano et al., 2018). En revanche, une telle analyse n'a jamais été réalisée pour quantifier l'ampleur des sécheresses sur le massif jurassien. Notre étude permet d'ouvrir la voie à de futures analyses. Calculer l'indice SPI sur plus de stations suisses et françaises pourrait peut-être aboutir à des résultats différents. De plus, cette analyse ne prend pas en compte l'humidité des sols et l'évapotranspiration. L'indice normalisé de précipitation-évapotranspiration (SPEI) également développé par l'OMM inclut ces facteurs. Si les données sont un jour toutes accessibles, l'étude des sécheresses à travers cet indice permettrait d'apporter plus de précisions sur les caractéristiques du milieu jurassien en périodes de sécheresse.

A l'avenir, si les tendances observées se confirment, les périodes de sécheresse vont s'accentuer en devenant plus fréquentes, plus longues, et plus sèches. Les étés de 2003 et 2018 pourraient devenir la norme dans le futur, nécessitant toujours plus d'adaptations ou de mesures de restrictions. Comme il a été relevé dans le l'article de Montginoul (Montginoul, 2011) qui développe une analyse sur les eaux alternatives, la diversification des sources d'approvisionnement en eau est un enjeu important car avoir un seul point de captage est dangereux. En effet, si ce point s'assèche ou est pollué, la totalité du réseau d'eau est affectée et peut être arrêtée. La nécessité de développer une stratégie d'approvisionnement en eau en utilisant différentes sources est primordiale afin d'éviter des situations d'urgence comme cela a été le cas dans la vallée de Joux en 1989 et 1991 (ch 2.1.3.2). D'autres articles définissent également cette stratégie comme indispensable. Dans l'article de Boyer & Le Lay, il est question de diversification des ressources en eau pour la région de Tucson en Arizona (EUA) (Boyer & Le Lay, 2019). Ils mettent en avant la nécessité de compléter les ressources traditionnelles par des ressources nouvelles et alternatives, qui permettraient de réduire la vulnérabilité des populations lors de sécheresses importantes. Dans sa thèse, Trinh développe également son analyse autour de la question de la gestion durable de l'eau à travers la diversification des ressources (Trinh 2017).

Les sécheresses sont des phénomènes qui impactent les Hommes, mais également la faune et la flore. Agir au-delà des infrastructures humaines est une option à prendre en compte dans le futur. A titre d'exemple, l'enjeu autour de la renaturation des tourbières aux alentours de Pontarlier est primordial. Ces zones humides, aujourd'hui très endommagées par les activités humaines, ont une grande importance puisqu'elles permettent de stocker l'eau et de l'écouler progressivement au cours de l'année. La disparition de tels biomes peut accentuer les sécheresses. La protection de ces zones humides fait partie aujourd'hui d'un programme de reconstruction soutenu par le « projet life » (Ministère de la Transition écologique, 2007) de l'Union européenne, qui finance des projets à but environnementaux depuis 1992 pour améliorer la résiliences des écosystèmes. Le but final étant de rendre leur état naturel aux zones humides, cours d'eau et lacs afin qu'ils puissent s'adapter aux futurs changements.

Malgré des résultats concrets, ce travail de recherche se limite aux aspects de gestion de l'eau pour deux communes. Il serait intéressant de poursuivre cette analyse avec plus de communes afin de connaître toutes les solutions mise en œuvre pour une meilleure gestion de l'eau potable sur le massif jurassien en période de pénurie. Il serait également intéressant d'identifier l'évolution des usages futurs pour créer des scénarios précis sur l'évolution de la consommation de la ressource à l'avenir.

En outre, Il conviendrait aussi d'étudier plus d'épisodes de sécheresse et leurs impacts sur la gestion des ressources en eau.

# CONCLUSION

Nos résultats montrent une évolution incontestable du climat jurassien avec des températures moyennes qui augmentent inexorablement depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle. La saisonnalité des précipitations est également touchée avec moins de pluie au printemps et en été, et plus en hiver. Il est encore difficile de constater une évolution significative des phénomènes extrêmes tels que les sécheresses. Toutefois, sur le massif jurassien, elles apparaissent de manière récurrente tous les étés depuis dix ans. Comme nous l'avons vu pour l'année 2018, il est parfois très difficile d'anticiper l'apparition de sécheresses sur le massif. Ceci nous montre à quel point il est important d'étudier les sécheresses pour connaître tous les paramètres nécessaires à la construction de bons outils de prédiction, ce qui permettra de prévenir un maximum ces catastrophes. Cependant, les sécheresses des régions de montagne sont encore peu étudiées en comparaison des travaux réalisés sur des milieux arides (Alibou, 2002; Sahabi-Abed & Kerrouche, 2018). Les quelques études qui se sont intéressées aux précédentes sécheresses sur le massif jurassien constituent néanmoins une première base de données solide (Dübendorfer et al., 2015; MétéoSuisse, 2018; Rebetez et al., 2006; Serquet & Rebetez, 2013).

Longtemps perçue comme ressource illimitée, dans les régions tempérées, les Hommes ont toujours exploité l'eau sans limites spécifiques. Cependant, dans un contexte de sécheresse devenu récurrent, la quantité d'eau potable disponible tend à se raréfier. De plus, les activités humaines, l'agriculture et l'industrie sont des sources de pollution pour cette ressource vitale qui est désormais en péril. C'est pourquoi mieux gérer les réserves en eau est un enjeu primordial pour notre société. La conférence sur l'eau qui s'est déroulée à Dublin en 1992 a été le facteur déclencheur de la prise de conscience mondiale de l'importance des ressources en eau. Les grandes puissances ont alors défini l'eau comme une ressource qui n'est pas inépuisable. Celle-ci doit être protégée et son emploi doit devenir durable.

De la protection des zones de prélèvements jusqu'à la consommation raisonnée de l'eau, en passant par l'amélioration des réseaux de distribution, il est nécessaire de reconsidérer tout le système de gestion de l'eau. L'objectif final étant de diminuer la vulnérabilité de l'Homme face à un événement extrême tel qu'une sécheresse. Les milieux naturels ont un fort impact sur le cycle de l'eau et doivent également être reconsidérées. Les mesures écologiques comme la ré-perméabilisation des sols ou la restauration des zones humides sont aussi des éléments à intégrer dans les systèmes futurs. Ainsi, les services des eaux doivent se préparer à des périodes de plus en plus difficiles à gérer et le développement d'une gestion durable de l'eau doit faire partie des stratégies pour l'avenir.

Alexis Cuenot - Sécheresse sur le massif jurassien : quels impacts sur la gestion des ressources en eau ?

# **BIBLIOGRAPHIE**

#### REFERENCES

- Agence de l'eau. (2013). Karst du massif du Jura : Ressources majeures en eau potable. *Inventaire, gestion et protection*. (6). Repéré en avril 2021 à l'adresse :

  http://www.cpiehautdoubs.org/upload/pdf/plaquette karst agence eau 2013.pdf
- ARS Agences régionales de santé. (2014). *La qualité de l'eau du robinet en France : Donnée 2013.* Paris : Auteurs. Repéré en avril 2021 à l'adresse : http://social-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/eaux/article/eau-du-robinet.
- Agrihebdo. (2019 5 juillet). Stockage d'eau sur les alpages. Des mesures pour contrer la problématique du manque d'eau dans les alpages. *Agrihebdo*. Repéré en avril 2021 à l'adresse : https://www.agrihebdo.ch/dossiers/stockage-d-eau-sur-les-alpages
- Alibou J. (2002). Impacts des changements climatiques sur les ressources en eau et les zones humides du Maroc. Table Ronde Régionale en Méditerranée. 39p. Athènes, Grèce.
- ALPEAU. (2012). Protection des eaux souterraines en forêts. *Guide ALPEAU dans l'arc Alpin et jurassien*.p.37. Annecy, Neuchâtel : Interreg.
- ArcInfo. (2019 14 mai). Eau du robinet: 3 Suisses sur 4 en boivent régulièrement. *ArcInfo*. Repéré à l'adresse https://www.arcinfo.ch/articles/lifestyle/sante/eau-du-robinet-3-suisses-sur-4-en-boivent-regulierement-840645
- Arn R., & Campy M. (1990). Un problème de paléogéographie glaciaire au maximum würmien dans la zone circumalpine : le glacier jurassien. *Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles*, 113, 18p. Repéré à l'adresse http://doi.org/10.5169/seals-89316
- Arzel A., Champion E., Mangeret F., & Possich A. (2019). *Impacts du changement climatique sur les forêts du site*Natura 2000 de « Petite Montagne du Jura » : prévisions et conseils de gestion. Communauté de communes de Petite Montagne, Université Claude Bernard Lyon 1. Lyon : Auteurs.
- ATS. Agence télégraphique suisse (2018, 22 octobre). Vaud: une sécheresse exceptionnelle depuis quatre mois. *La Côte*. Repéré en avril 2021 à l'adresse : https://www.arcinfo.ch/articles/regions/canton/le-lac-desbrenets-est-a-sec-784845
- Audétat M., Heiss G., Christen D., Deriaz P., & Heiss C. (2002). Inventaire spéléologique de la Suisse. *Tome 4 : Jura vaudois*. Commission de spéléologie de l'académie suisse des sciences naturelles. La Chaud de Fonds : Auteurs.
- Babillot P., & Le Lourd P. (2000). Y-a-t-il un marché de l'eau ? *La Houille Blanche*, pp. 39-54. Doi : 10.1051/lhb/2000016.
- Bakalowicz M. (2000). Protection des ressources en eau karstique et amenagement et gestion du territoire. Houille Blanche, 7-8, pp.122-126. Doi : 10.1051/lhb/2000086.
- Bandelier A. (2019, 19 septembre). *Jura*. Dictionnaire historique de la Suisse (DHS). Repéré à l'URL https://hls-dhs-dss.ch/fr/articles/008567/2019-09-19/
- Barbier R., & Montginoul M. (2013). Avant-propos. *Sciences Eaux & Territoires, 10,* 2p. Doi: 10.3917/set.010.0002.
- Barone S. (2010). Les conflits d'usage de l'eau et leurs régulations. L'exemple du bassin de Thau et de la basse vallée de l'Ain. *Droit et gestion des collectivités territoriales*, *30*, pp.177-188. DOI : 10.3406/coloc.2010.2144.
- Barnett, T., Malone, R., Pennell, W., Stammer, D., Semtner, B., Washington, W., 2004. The effects of climate

- change on water resources in the West: introduction and overview. Clim. Chang. 62. pp.1-11. DOI: http://dx.doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013695.21726.b8.
- Baude M., Colin A., Duvernoy J., & Foussard A. (2021). *DATALAB Chiffres clés du climat France, Europe & Monde*. Edition 2021. Paris : Auteurs.
- Bellanger F. (2010). Les problèmes de l'eau : rapport suisse. *Annuaire européen d'administration publique, 2010, vol. 33, pp.289-309.*
- Berger E., & Chaussard M. (1959). Etude sur la répartition des précipitations dans le département du Jura, en fonction de l'altitude. *Revue de géographie alpine*, 47, pp.97-102. DOI: 10.3406/rga.1959.1916.
- Bichet V., & Campy M. (2008). Montagne du Jura: Géologie et paysages. Besançon: Néo Editions.
- Bissig G. (2004). Changement climatique et gestion durable de l'approvisionnement en eau potable d'un région karstique : La Vallée de Joux (Vaud, Suisse). (Mémoire de master non publié). Université de Lausanne, Faculté des lettres, institut de géographie. Lausanne, Suisse.
- Blanchon D. (éds) (2013). Atlas Mondial de l'eau: défendre et partager notre bien commun. Paris : Autrement.
- Bochatay D. (2004). *Cycle de l'eau et métabolisme urbain : le cas lausannois*. (Mémoire de master non publié). Université de Lausanne, Faculté des lettres, institut de géographie. Lausanne, Suisse.
- Boé J. (2007). Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France. Toulouse : HAL.
- Bohnenblust, J.-D. (2021, mai 20). *Alerte, pénurie d'eau*. [reportage vidéo]. Genève : RTS. Repéré en avril 2021 à l'adresse : https://pages.rts.ch/emissions/temps-present/12103140-alerte-penurie-deau.html?anchor=12216035#12216035
- Bosset E. (1961). *Le lac de Joux : Etude hydrologique du bassin*. (Thèse de doctorat non publié). Université de Lausanne, Faculté des lettres, institut de géographie. Lausanne, Suisse.
- Bouaicha R., & Benabdelfadel A. (2019). Variabilité et gestion des eaux de surface au Maroc. *Sécheresse*, *21*(4), pp.325-326. DOI: 10.1684/sec.2010.0272.
- Boyer A.L. & Le Lay Y.-F. (2019).« Think of your house as a watershed! » La récupération des eaux de pluie à Tucson, en Arizona: vers la diversification de l'approvisionnement en eau dans le Sud-Ouest étasunien? », Développement durable et territoires, 10, 3, 20p. DOI: 10.4000/developpementdurable.15512.
- Brignoli A. (2020) Le Saut du Doubs de nouveau asséché. *Bleu Besançon*. Repéré en mai 2021 à l'adresse https://www.francebleu.fr/infos/environnement/le-saut-du-doubs-de-nouveau-asseche-1597324496
- Brochet P. (1977). La secheresse 1976 en France: Aspects climatologiques et consequences. *Hydrological Sciences Bulletin*, 22(3), pp.393-411. DOI 10.1080/02626667709491733.
- Buffat F. (2016). Evaluation de la production annuelle des prairies : un déficit qui concerne tous les départements. *Agreste, 1, 4p. Dijon : Auteur.*
- Calianno M., Reynard E., Milano M., & Buchs A. (2017). Quantifier les usages de l'eau : une clarification terminologique et conceptuelle pour lever les confusions. *VertigO*, 17, 28p. DOI : 10.4000/vertigo.18442.
- Campy M. (1982). Le Quaternaire franc-comtois. Essai chronologique et paléoclimatiquee. Besançon: HAL. Repéré à l'URL: https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01638178
- Canton de Vaud. (2003a). Restriction de l'arrosage par pompage en rivière. Lausanne : Auteur.
- Canton de Vaud. (2003b). Pénurie d'eau dans les pâturages du Jura vaudois : l'Etat sollicite le soutien de l'armée. Lausanne : Auteur.

- Canton de Vaud. (2018a). L'approvisionnement en eau des alpages touchés par la sécheresse a débuté. Lausanne : Auteur.
- Canton de Vaud. (2018b). Livraison d'eau dans les alpages touchés par la sécheresse, l'opération se poursuit. Lausanne : Auteur.
- Canton de Vaud. (2020). Ressources en eau souterraine eau potable. Lausanne : Auteur. Repéré à l'adresse : https://www.vd.ch/themes/etat-droit-finances/communes/travaux-publics-amenagement-du-territoire-mobilite/ressources-en-eau-souterraine-eau-potable/
- CESFR. Conseil économique et social de Franche-Comté (2010). Le climat change, la Franche-Comté s'adapte. 36p. Besançon : Auteur.
- CH2018. (2018). Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services. Zurich : C2SM, MétéoSuisse, ETH, NCCRClimate & OccC.
- Chahed J., Hamdane, A., & Besbes, M. (2014). Gérer l'eau en condition de pénurie. Sécurité hydrique de la Tunisie. Paris : L'harmattan.
- Charton C., & Hmamda, N. (2018). Arc jurassien franco-suisse : quatre territoires pour une coopération diversifiée. *INSEE Analyses, (44), Besançon* : INSEE.
- Chataigner J., & Michon J. (2017). Bulletin n°2 : Prélèvements quantitatifs sur la ressource en eau. Paris : EauFrance.
- Chazot S., Terrasson I., & Drocourty A. (2012). *Ressources et besoins en eau en France à l'horizon 2030 rapport final*. Nîmes : Auteurs.
- Chonchol, J. (1989). Les Hommes face aux sécheresses. Paris : Éditions de l'IHEAL.
- Collin V. (2018, 29 juillet). Haut-Doubs Environnement. Le Doubs totalement à sec sans que l'on ne sache pourquoi. *Est Républicain*. Repéré en avril 2021 à l'adresse : https://www.estrepublicain.fr/edition-haut-doubs/2018/07/29/le-doubs-totalement-a-sec
- Commission Européenne. (2012). L'Europe et l'Eau. Bruxelles : Auteurs.
- Commune de Morges. (2003, 18 juillet). Journal Morges n°54. *Journal de Morges Cossonay Venoge*.p.2. Morges, Suisse. Repéré en avril 2021 à l'adresse : https://scriptorium.bcu-lausanne.ch/zoom/357039/view?page=2&p=separate&search=Sécheresse 2003&hlid=313722360&tool=search&view=199,2901,2787,1227
- Commune de Pontarlier (2018). *Cadastre de Pontarlier*. Pontarlier : Auteur. Repéré à l'adresse https://plu-cadastre.fr/pontarlier-25300/
- Commune du Chenit. (2018). *Préavis n°3/2018 : Equipement des Grandes Roches, ainsi que des alpages de la Moësette et de la Commune de Bise*. Le Chenit : Auteur. Repéré à l'adresse : http://www.communeduchenit.ch/PgStd2.php?m=3710
- Commune du Chenit. (2019). *Preavis n°9/2019 : Approvisionnement en eau des alpages des Begnines, de la Petite Chaux et du Chalet à Roch-Dessus*. Le Chenit : Auteur. Repéré à l'adresse : http://www.communeduchenit.ch/Annexes/03Preavis\_2018.pdf
- Cook C., & Bakker K. (2012). Water security: Debating an emerging paradigm. *Global Environmental Change*, 22(1), pp. 94-102. Doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.10.011.
- De Bono A., Peduzzi P., Kluser S., & Giuliani, G. (2003). Impacts de la canicule 2003 en Europe. *Bulletin d'Alert Environnementale*, 3, 4p.
- Derruau M. (2010). Chapitre 8 Roches sédimentaires II : Les calcaires. Dans *Les formes du relief terrestre: Notions de géomorphologie*.pp.72-80. Paris: Armand Colin. DOI : 10.3917/arco.derru.2010.01.0072.

- De Jong, C., Lawler, D., Essery, R., 2009. *Mountain hydroclimatology and snow seasonali- ty perspectives on climate impacts, snow seasonality and hydrological change in mountain environments. Hydrol.* Process. 23. pp.955–961. DOI: http://dx.doi.org/10.1002/ hyp.7193.
- Doerfliger N., & Zwahlen F. (1998). *Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK). Guide pratique*. pp.1-56. Neuchâtel : Auteurs.
- Dorfliger N., & Plagnes V. (2009). *Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques Guide Méthodologique de la méthode PaPRIKa*. Orléan : Brgm.
- DREAL Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (2020). Fiche signalétique plans d'eau Lac de St Point. *Lacs et plans d'eau de Franche-Comté*. Besançon : Auteur. Repéré à l'adresse : http://www.donnees.rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/bassin\_rmc/rdbrmc/lacs/lacs\_frc/lacs\_st-point.htm
- Droz D. (2003, 12 juillet). Pêche interdite sur une partie du Doubs. *L'impartial*.p.5. La Chaux de Fonds : Suisse. Repéré à l'adresse : http://doc.rero.ch/record/115026/files/2003-07-12.pdf
- Dübendorfer C., Tratschin R., Urfer D., Zahner S., & Zysset A. (2015). *Gestion des ressources en eau dans les situations exceptionnelles* : Rapport d'experts. Bern : OFEV.
- Ducos B. (1992). La gestion des ressources en eau et la sécheresse de 1989 dans les Alpes du Nord : l'exemple des montagnes et vallées de l'Isère. *Revue de géographie alpine*, 80(1), pp.65-79. DOI : 10.3406/rga.1992.3642.
- Eaufrance. (2014). Fiche caractéristique des masses d'eau souterraine de l'arlier. EauFrance Le Service public d'information sur l'eau. Repéré en avril 2021 à l'adresse : https://rhone-mediterranee.eaufrance.fr/sites/sierm/files/content/waterbody\_hydrogeological\_documents/MEsoutV2/FRDG348.pdf
- Eaufrance. (2018). L'alimentation en eau potable Systême d'information sur l'eau. EauFrance Le Service public d'information sur l'eau. Repéré en avril 2021 : https://www.eaufrance.fr/lalimentation-en-eau-potable
- EPTB Saône & Doubs. (2011). Projet integre Doubs franco-suisse Etat des lieux / diagnostic du bassin versant.

  Mâcon : Auteur.
- Erhard-Cassegrain A., & Margat J. (1979). Introduction à l'économie générale de l'eau . Orléans : Brgm.
- Est Républicain (2020, 29 mai). *Doubs : un nouveau puits pour alimenter la commune en eau potable.* Edition Pontarlier Haut-Doubs, Pontarlier, France. Repéré en mai 2021: https://www.estrepublicain.fr/edition-pontarlier-haut-doubs/2020/05/29/doubs-un-nouveau-puits-pour-alimenter-la-commune-en-eau-potable
- Fallot J.-M. (2015). *Rétrospective de la sécheresse de l'été et l'automne 2015 (géoblog)*. Université de Lausanne, faculté des géosciences et de l'environnement, institut de géographie durabilité. Lausanne, Suisse.
- Fallot J.-M. (2018a). *Cours en Climatologie de Bachelor (polycopié)*. Université de Lausanne, faculté des géosciences et de l'environnement, institut de géographie durabilité. Lausanne, Suisse.
- Fallot J.-M. (2018b, 15 juin). *Un nouveau record de pluie intense en Suisse à Lausanne ? Géoblog*. Géoblog : Le blog scientifique vulgarisé de la Faculté des géosciences et de l'environnement. Repéré à l'adresse https://wp.unil.ch/geoblog/2018/06/un-nouveau-record-de-pluie-intense-en-suisse-a-lausanne/
- Fallot, J.-M. (2019). Topoclimatologie et risques climatiques, chapitre 1 (*polycopié*). Université de Lausanne, faculté des géosciences et de l'environnement, institut de géographie durabilité, Suisse.
- Felix Gnehm, & WWF Suisse. (2011). Etude de l'empreinte hydrique suisse. Lausanne : WWF Suisse.
- Fouché O. (éds) (2016). Chapitre 16 : Aquifères, nappes et essais d'eau. Dans *Théorie et pratique de la géotechnique, pp.725-848. Editions du Moniteur.*

- GIEC. (2013). Changements climatiques 2013 Rapport de synthèse Résumé à l'intention des décideurs. Genève : Auteurs.
- GIEC. (2015). Changements climatiques 2014 Rapport de synthèse Résumé à l'intention des décideurs. Genève :

  Auteurs.
- GIEC. (2018). Résumé à l'intention des décideurs, Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz. Genève : Auteurs.
- Grand Pontarlier. (2018). *PLUI Diagnostic Environnemental*. Pontarlier : Auteur. Repéré à l'adresse : http://www.grandpontarlier.fr/images/developpement/1.\_Etat\_initial\_de\_lenvironnement\_CCGP-1-2.pdf
- Gretillat P. (1998). Aquifères karstiques et poreux de l'Ajoie (Jura, Suisse)(thèse de doctorat). Université de Neuchâtel, faculté des sciences. Suisse. Repéré à l'adresse : http://doc.rero.ch/record/4855
- Guillaume J. (2019, 19 juin). Après le violent orage de vendredi, le Val-de-Ruz est sous le choc. *RTS info*. Neuchâtel, Suisse. Repéré à l'adresse : https://www.rts.ch/info/regions/neuchatel/10524864-apres-le-violent-orage-de-vendredi-le-val-de-ruz-est-sous-le-choc.html
- Hmamda N., Charton C., & Yohann R. (2020). L'eau dans l'Arc jurassien : des pressions et usages différenciés Édition 2020. Observatoire statistique transfrontalier de l'arc Jurassien. Repéré à l'adresse : https://www.arcjurassien.org/ostaj/publications-et-analyses/leau-dans-larc-jurassien-des-pressions-et-usages-differencies?utm\_source=newsletter&utm\_medium=email&utm\_campaign=juin\_2020\_1ere\_partie
- Hohmann R., Thalmann E., Müller-Ferch G., Neu U., Ritz C., & Christoph K. (2007). Les changements climatiques et la Suisse en 2050. Impacts attendus sur l'environnement, la société et l'économie. Bern : OcCC / ProClim—.
- Hydro-CH2018. (2021). Effets des changements climatiques sur les eaux suisses. Dans *Hydrologie, écologie et gestion des eaux*, pp.24-26. Bern : OFEV.
- Idées EAUX. (2018). Dossier de déclaration pour la réalisation d'un pompage d'essai sur 5 ouvrages de la plaine de l'Arlier et la création de 8 piézomètres. Communauté de Communes du Grand Pontarlier. Saint-Lupicin : Auteurs.
- INSEE Institue national de la statistique et des études économique (2020). Dossier Complet, *commune de Pontarlier. INSEE. Repéré à l'adresse :* https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=COM-25462
- ISSKA. (2012). Sous nos pieds ... le KARST. Connaître et protéger les paysages calcaires.p.13. La Chaux de-Fonds : Institut Suisse de spéléologie et de karstologie (ISSKA).
- Jacob T., & Bayer R. (2009). Apport de la gravimétrie et de l'inclinométrie à l'hydrologie karstique (thèse de doctorat). Université de Montpellier II, Institut des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, France.
- Joly D., & Gillet F. (2017). Interpolation of temperatures under forest cover on a regional scale in the French Jura Mountains. *International Journal of Climatology*, *37*, pp.659-670. DOI: 10.1002/joc.5029.
- L'Hebdo. (2003, 24 juillet). La Suisse a changé, la sécheresse le prouve. p.48. *Société*. Lausanne. Repéré à l'adresse https://scriptorium.bcu-lausanne.ch/zoom/199967/view?page=48&p=separate&search=S%C3%A9cheresse%202003&hlid=510554 2945&tool=search&view=0,0,2682,3402
- Lamy E., & Lassabatere L. (2010). Hydrologie urbaine. La Houille Blanche, 2, pp.86-92. DOI: 10.1051/lhb.
- Lauber S., Herzog F.; Seidl I., Böni R., Bürgi M., Gmür P., Hofer G., Mann S., Raaflaub M., Schick M., Schneider M., Wunderli R. (Eds.) (2014). Avenir de l'économie alpestre suisse. Faits, analyses et pistes de réflexion du programme de recherche AlpFUTUR. pp1-200. Birmensdorf, Institut fédéral de recherche WSL; Zurich-

- Reckenholz, Station de recherche Agroscope.
- Lebeau R. (1948). Les alpages du Jura français. Les Études rhodaniennes, 23(4), pp.185-204. DOI: 10.3406/geoca.1948.5295.
- Leroux A., Bichet V., Magny M., Walter-Simonnet A. V., Simonnet J. P., Baltzer A. (2006). *La séquence sédimentaire du lac Saint-Point (massif du Jura, France) : une analyse multi-paramètres à haute résolution du Tardiglaciaire et de l'Holocène*. 21e Réunion des Sciences de la Terre, 4-8 Decembre 2006, Dijon, France
- Loubier S., Gleyses G., Montginoul M., Garin P., & Christin F. (2008). Entre création de ressource et mesures réglementaires: Quelle place pour la gestion de la demande en eau d'irrigation en Charente. *Houille Blanche*, *3*, pp.88-95. DOI: 10.1051/lhb:2008033.
- Luetscher M., & Perrin J. (2005). The Aubonne karst aquifer (Swiss Jura). Dans *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 98(2), pp.237-248. DOI: 10.1007/s00015-005-1156-7.
- Mangin A. (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques : Première partie : Généralités sur le karst et les lois d'écoulement utilisées (Thèse de Doctorat). Université de Dijon, Dijon. Repéré à l'URL : https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01575806/document
- Margat J. (1989). Sécheresse et eaux souterraines. Houille Blanche, 7(8), pp.517-522. DOI 10.1051/lhb/1989049.
- Massenet J.-Y. (2012). CHAPITRE IV : Propriétés physiques du sol (polycopié). Repéré à l'adresse : http://jymassenet-foret.fr/cours/pedologie/PEDO4-2012.pdf
- Matthey W. (1971). Ecologie des insectes aquatiques d'une tourbière du Haut-Jura. (Thèse de doctorat).

  Université de Neuchâtel. Neuchâtel. Repéré à l'URL:

  https://doc.rero.ch/record/4400/files/2 these MattheyW.pdf
- Mehdaoui R., Mili E.-M., & Seghir A. (2018). Caractérisation à l'aide du SPI de la Sécheresse climatique dans le bassin versant de Ziz (Sud-Est, Maroc). *European Scientific Journal*. 14(21), 177p. DOI: 10.19044/esj.2018.v14n21p177.
- Meisser M., Deléglise C., Mosimann E., Signarbieux C., Mills R., Schlegel P., Buttler A., & Jeangros B. (2013). Effets d'une sécheresse estivale sévère sur une prairie permanente de montagne du Jura. *Recherche Agronomique Suisse*, 4(11-12), pp.476-483.
- MétéoSuisse et al. (2004). Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer, Schriftenreihe Umwelt Nr. 369, 174p.
- MétéoSuisse. (2014). Rapport climatologique 2014. Genève : Auteur.
- MétéoSuisse. (2018). Records et extrêmes. Genève : Auteur.
- MétéoSuisse. (2019). Canicule. Genève : Auteur. Repéré en avril 2021 à l'adresse : https://www.meteosuisse.admin.ch/home/meteo/dangers/explications-aux-degres-dedanger/canicule.html
- MétéoSuisse. (2020a). *Indices de sécheresse. Indicateurs de climat.* Genève : Auteur. Repéré à l'adresse : https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/le-climat-suisse-en-detail/indicateurs-de-climat/indices-de-secheresse.html?param=rainanomaly.
- MétéoSuisse. (2020b). Evolution de la température et des précipitations. Genève : Auteur.
- MeteoSuisse. (2021). Bulletin climatologique, année 2020. 1-13. Genève : Auteur.
- Meylan R. (1964). La vallée de Joux. *Geographica Helvetica*.p.10. Repéré à l'adresse : https://gh.copernicus.org/articles/19/209/1964/gh-19-209-1964.pdf

- Milano M., & Reynard E. (2018). The role of geography in fresh water management. *Research handbook on freshwater law and international relations*, pp. 457-480. DOI: 10.4337/9781785360695.00033.
- Milano M., Reynard E., Köplin N., & Weingartner R. (2015). Climatic and anthropogenic changes in Western Switzerland: Impacts on water stress. *Science of the Total Environment*, *536*, pp.12-24. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.049.
- Milano M., Reynard E., Muniz-Miranda G., & Guerrin J. (2018). Water supply basins of São Paulo metropolitan region: Hydro-climatic characteristics of the 2013-2015 water crisis. *Water (Switzerland), 10*(11), 19p. DOI: 10.3390/w10111517.
- Ministère de la Transition écologique. (2007). Le programme européen LIFE Environnement : bilan de son application en France présentation de 113 projets français. Paris : Auteur.
- Moncorgé S., & Gisbert M. (2016). Plan d'actions en faveur des tourbières de Franche-Comté 2016 2025.

  Conservatoire d'espaces naturels de Franche-Comté. Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse,
  Conseil régional de Bourgogne-Franche-Comté, Direction régionale de l'environnement, de
  l'aménagement et du logement de Bourgogne-Franche-Comté, 153p.
- Montginoul M. (2011). Les eaux alternatives à l'eau du réseau d'eau potable pour les ménages : un état des lieux. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*.n°45. pp.49-62. Repéré en avril 2021 à l'adresse : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00601203
- Muet P., & Vier E. (2011). Stratégies de protection des ressources karstiques utilisées pour l'eau potable Guide pratique. Milieux aquatiques en Adour-Garonne, pp.57-71.
- Muller F., & Darinot F. (2021). Panorama des services écosystémiques des tourbières en France. Quels enjeux pour la préservation et la restauration de ces milieux naturels ? *Pôle-relais Tourbières Fédération des Conservatoires d'espaces naturels*, 47p.
- Musy A., & Higy C. (2004). *Hydrologie: Une science de la nature* (Polycopié). Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Suisse.
- Musy A., Higy C., & Reynard E. (2014). Hydrologie 1 Une science de la nature, une gestion sociétale. *Géocarrefour*, 92(92), 489p. DOI: 10.4000/geocarrefour.9701
- Nettier B., Dobremez L., Coussy J.-L., & Romagny, T. (2010). Attitudes des éleveurs et sensibilité des systèmes d'élevage face aux sécheresses dans les Alpes françaises. *Revue de géographie alpine. 98-4*. DOI : 10.4000/rga.1294
- Nijssen, B., O'Donnell, G., Hamlet, A., Lettenmaier, D. (2001). *Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change*. 50.pp.143–175. Repéré à l'adresse http://dx.doi.org/10.1023/A: 1010616428763.
- Nussbaum R. (2018, 7 Novembre). La saison de la compagnie de navigation sur le Doubs coulée par la sécheresse. *ARCinfo*. Consulté à l'adresse : https://www.arcinfo.ch/articles/regions/montagnes/la-saison-de-la-compagnie-de-navigation-sur-le-doubs-coulee-par-la-secheresse-797459
- Odent & Masson. (2003). *Inventaire départemental des cavités souterraines : Département du Jura Rapport Final*. Dijon : Brgm.
- OFEFP Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (2003). L'eau souterraine. Berne : Auteur.
- OFEV Office fédéral de l'environnement (2020). La Suisse bientôt à court d'eau ? L'impact des changements climatiques sur notre gestion de l'or bleu. L'environnement : Les ressources naturelles en Suisse, 63p.
- OFEV et al. (2019). La canicule et la sécheresse de l'été 2018 : impacts sur l'Homme et l'environnement. Etat de l'environnement. n° 1909, 91p. Berne : Auteur.
- OFS Office fédéral de la statistique (2020).OFS BEVNAT, SCENARIO, STATPOP. *Statistiques de la population*. Neuchâtel : Auteur.

- ONU Environnement. (2018). Progrès en matière de gestion intégrée des ressources en eau. Base de référence mondiale pour l'indicateur 6.5.1 de l'ODD 6 : degré de mise en œuvre de la GIRE. Genève : Auteur.
- OSTAJ Observatoire statistique transfrontalier de l'Arc jurassien (2016). *Rapports et portraits de territoires*. Repéré à l'adresse : https://sitn.ne.ch/geoclip3air/#c=report
- OSTAJ Observatoire statistique transfrontalier de l'Arc jurassien (2020). L'eau dans l'Arc jurassien : des pressions et usages différenciés Édition 2020. Repéré en avril 2021 à l'adresse : https://www.arcjurassien.org/ostaj/publications-et-analyses/leau-dans-larc-jurassien-des-pressions-et-usages-differencies?utm\_source=newsletter&utm\_medium=email&utm\_campaign=juin\_2020\_1ere\_partie
- Ouzeau G., Déqué M., Jouini M., Planton S., & Vautard R. (2014). Le climat de la France au XXI e siècle Volume 4 Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. La Défense : Auteurs.
- Pasto'alpes. (2014). *Past'eau Mobiliser l'eau en alpage*. Réseau Pastor'alpes. Repéré à l'adresse : https://www.echoalp.com/documents/fiche\_cima-eau-mobiliser-leau-en-alpage.pdf
- Perrin J., Jeannin P.-Y., & Lavanchy Y. (2000). Le bassin d'alimentation de la source karstique du Brassus (Jura suisse) : synthèse des essais de traçage. *Eclogae Geologicae Helvetia*, 11p. DOI : 10.5169/seals-168810.
- Perroud M., & Bader S. (2013). Changements climatiques en Suisse. Etat de l'environnement, 1308, 86p.
- Planton S., Déqué M., Douville H., & Spagnoli B. (2005). Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique. *Comptes Rendus Geoscience*, *337*(1-2), pp.193-202. DOI: 10.1016/j.crte.2004.10.003.
- PLU Pontarlier (2017). Révision du Plan local d'urbanisme de Pontarlier. Pontarlier : Auteur.
- Poitou J., Braconnot P., Masson-Delmotte V. (2014). *Le climat: la terre et les hommes. Une introduction à.* Les Ulis : ecosciences.
- ProClim, & OcCC. (2005). Canicule de l'été 2003. Rapport de synthèse. Bern: Auteurs.
- Prométerre, SVEA, & Direction générale de l'agriculture, de la viticulture et des affaires vétérinaires (DGAV). (2019 mai). *Gest'Alpes Bulletin n°44*. Repéré en avril 2021 à l'adresse : http://www.salondesalpages.ch/SalonDesAlpages/img/Revue44 05 19.pdf
- Quantin A. (1958). Le climat du Jura. *Bulletin de la Société Botanique de France, 105*, pp.8-11. DOI : 10.1080/00378941.1958.10835201.
- Rathgeber C. (2002). Impact des changements climatiques et de l'augmentation du taux de CO2 atmosphérique sur la productivité des écosystèmes forestiers : exemple du pin d'Alep (Pinus halepensis Mill) en Provence calcaire (France)(Thèse de doctorat). Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille. Marseille, France.
- Rebetez M. (2005). Le climat Suisse des dernières décénnies. Dans *Blätter Aus Der Walliser Geschichte*, 287, pp.161-169.
- Rebetez M., Mayer H., Dupont O., Schindler D., Gartner K., Kropp J. P., & Menzel A. (2006). Heat and drought 2003. Dans *Europe: a climate synthesis*. *63*. pp.569-577. DOI: 10.1051/forest:2006043
- Reilé, & Doubs. (2012). Alluvion du Drugeon, nappe de l'Arlier. 58p.
- Renard B. (2006). Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France (Thèse de doctorat). INP Grenoble. Grenoble, France. Repéré à l'URL : https://hal.inrae.fr/tel-02588353/document
- Reymond G. (2003, décembre). Ravitaillement en eau des estivages du Jura vaudois par l'armée, l'opération « aqua-concert » a été fort appréciée. *Gest'Alpe*. N°13, 4p.
- Reynard E. (2000). Cadre institutionnel et gestion des ressources en eau dans les Alpes: Deux études de cas dans

- des stations touristiques valaisannes. *Swiss Political Science Review, 6*(1), pp.53-85. DOI: 10.1002/j.1662-6370.2000.tb00286.x
- Reynard E. (2001). Aménagement du territoire et gestion de l'eau dans les stations touristiques alpines. Le cas de Crans-Montana-Aminona (Valais, Suisse). *Revue de géographie alpine, 89*(3), pp.7-19. DOI: 10.3406/rga.2001.3045.
- Reynard E., & Schoeneich P. (2021). Structural and Karstic Landscapes of the Joux Valley (Southwestern Jura).

  Dans Landscapes and Landforms of Switzerland.pp.1-14.
- Rinaudo J.-D. (2013). Prévoir la demande en eau potable : une comparaison des méthodes utilisées en France et en Californie. *Science Eaux & Territoire*, *12*(1), pp.27-40.
- Roussel P. (2017). Introduction. *Annales des Mines Responsabilité et environnement, N° 86*(2), 3p. DOI : 10.3917/re1.086.0003
- SAFEGE. (2018). Schéma départemental d'alimentation en eau potable du Doubs. Schiltigheim : Auteur.
- Sahabi-Abed S., & Kerrouche M. (2018). Canicule et Vague de Chaleur en Algérie : Définition Seuils Caractéristiques. Dans *JAMA*. 1, pp.65-73.
- Salehnia N., Alizadeh A., Sanaeinejad H., Bannayan M., Zarrin A., & Hoogenboom G. (2017). *Estimation of meteorological drought indices based on AgMERRA precipitation data and station-observed precipitation data*. *9*(6), pp.797-809. DOI: 10.1007/s40333-017-0070-y
- Schädler B. (2016). L'eau en Suisse un aperçu. Commission suisse d'hydrologie. Berne, 28p.
- Schmid F., Walter F., Schneider F., & Rist S. (2014). PNR 61-Synthèse thématique 4 dans le cadre du Programme national de recherche PNR 61 «Gestion durable de l'eau» Gouvernance durable de l'eau Enjeux et voies pour l'avenir, Berne.
- SCNAT Académie suisse des sciences naturelles (2016). *Coup de projecteur sur le climat suisse: Etat des lieux et perspectives*. Un rapport de l'Académie suisse des sciences naturelles, 11(5), 218p.
- Serquet G., & Rebetez M. (2013). *Changements climatiques: Quel avenir pour les destinations touristiques des Alps et du Jura Vaudois?- rapport final.* Vaud: Office du tourisme du Canton de Vaud.
- Service de l'observation et des statistiques. (2017). Les prélèvements d'eau douce en France : les grands usages en 2013 et leur évolution depuis 20 ans.
- Service des eaux de la ville de Pontarlier. (2016). *Rapport annuel sur le prix et la qualité de l'eau 2016*. Pontarlier : Auteur.
- Sinreich M., Clavien D., Kozel R., & Zwahlen F. (2005). Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines karstiques et du risque de contamination Adaptation et application des concepts européens en Suisse. Bulletin d'Hydrogéologie. 21. pp59-85.
- Sivelle V. (2020). Couplage d'approches conceptuelles , systémiques et distribuées pour l'interprétation de traçages artificiels en domaine karstique : implications pour la détermination de la strucure interne des aquifères karstiques (Thèse de doctorat). Université Paul Sabatier Toulouse III. Toulouse, France. Repéré à l'URL : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02735904/document
- Sommaruga, A. (2000). Geology of the Central Jura and the Molasse Basin. Dans *Memoire de la Société* neuchateloise des sciences naturelles.12, 176p. Repéré à l'URL: https://doc.rero.ch/record/4381/files/2\_these\_SommarugaA.pdf
- Soubeyroux J.-M., Kitova N., Blanchard M., Vidal J.-P., Martin É., & Dandin P. (2012). Sécheresses des sols en France et changement climatique : Résultats et applications du projet ClimSec. *La Météorologie*, *8*(78), 21p. DOI : 10.4267/2042/47512.

- Terre d'avance. (2020). Réalisation de diagnostics partenariaux territoriaux flash "Emplois compétences" Bassin de Pontarlier, rapport final. Lyon : Auteur. Repéré en avril 2021 à l'adresse : https://www.bourgognefranchecomte.fr/sites/default/files/2021-02/Pontarlier%20Doubs%20Jura%2025%2039.pdf
- Thouvenot T. (2012). L'empreinte eau de la France. Paris : WWF.
- Trinh C. (2017). Diversification des ressources du réseau d'eau non potable parisien : contribution à une gestion durable des ressources en eau (Thèse de doctorat). Université Paris-Est, Paris, France. Repéré à l'URL : https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01682128
- Wahl L., Paul P., Pichard C., Mory N., Grogues G., Pfister L. (2005, 15 janvier). Les canicules de l'été 2003 : un événement météorologique exceptionnel dans le quart nord-est de la France. *Revue géographique de l'Est*. DOI : 10.4000/rge.362.
- Wanko A. (2016). *Gestion des eaux souterraines Définitions et concepts* Types de nappes [cours en ligne].

  Université et École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg. Strasbourg, France.

  Repéré en avril 2020 à l'adresse:

  http://www.unit.eu/cours/engees/GEMEue2module2partie1/co/notion-de-nappe\_2.html
- Yonaba R. (2015). Adduction d'eau potable [Cours publié en ligne]. Ecole Inter-Etats d'ingénieurs de Ouagadougou. Ouagadougou, Burkina Faso. Repéré en avril 2020 à l'adresse : https://www.slideshare.net/rolandyonaba/cours-dadduction-en-eau-potable-47234215
- Zella, L., Smadhi, D. (2010) L'eau : État des lieux des potentialités et des prélèvements. Dans *Larhyss Journal*. N°8.pp.69-80.
- Zoungrana D. (2003). Cours d'approvisionnement en Eau Potable. Dans *Journal of Chemical Information and Modeling*. Ecole Inter-Etats d'ingénieurs de Ouagadougou. Ouagadougou, Burkina Faso. Repéré à l'URL: https://www.pseau.org/outils/ouvrages/2ie\_cours\_d\_approvisionnement\_en\_eau\_potable\_zoungrana\_20\_03.pdf

#### Sources de données

- Association des bergers (2021). Données relatives aux auberges jurassiennes, obtenues à l'adresse : http://www.bergersdujura.org/carte des alpages.php
- Climate-Data.org (2021): Données climatiques des villes obtenus aux adresses suivantes:
- -Besançon: https://fr.climate-data.org/europe/france/franche-comte/besancon-348/
- -Pontarlier: https://fr.climate-data.org/europe/france/franche-comte/pontarlier-8254/
- -Neuchâtel: https://fr.climate-data.org/europe/suisse/neuchatel/neuchatel-15485/
  - Bureau technique communal du Chenit, 2020 : Données obtenues par commande.
  - dataOFEV Office fédéral de l'environnement (2021). Données obtenues par le portail de commandes du site de l'OFEV à l'adresse :
    - https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/eaux/etat/donnees/obtenir-des-donnees-mesurees-sur-le-theme-de-l-eau/commander-des-donnees-hydrologiques-historiques-et-validees.html
  - dataMétéoSuisse (2021a). Données obtenues sur la plateformes Idaweb
  - dataMétéoSuisse (2021b). Données obtenues sur le site internet de météosuisse à l'adresse : <a href="https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/le-climat-suisse-en-detail/tendances-observees-aux-stations.html">https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/le-climat-suisse-en-detail/tendances-observees-aux-stations.html</a>
  - DREAL Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (2021). Données obtenue à travers une commande par mail à l'adresse : <a href="http://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/trouver-et-telecharger-des-donnees-r2529.html">http://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/trouver-et-telecharger-des-donnees-r2529.html</a>
  - <u>MétéoFrance (2021): Données obtenues à l'adresse :</u> https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id produit=129&id rubrique=52
  - Magéoadmin (2020). Fonds de carte obtenus à l'adresse : https://map.geo.admin.ch/
  - Géoportail (2021). Fonds de carte obtenus à l'adresse : https://www.geoportail.gouv.fr/
  - GrandPontarlier (2021). Données obtenues à travers les entretiens .

#### DOCUMENTS JURIDIQUES

#### TEXTES DE LOIS EUROPEENS

- Directive européenne 98/83 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine du 3 novembre 1998, CELEX : 31998L0083.
- Directive-Cadre Européenne sur l'eau 2000/60/CE (DCE) du 23 octobre 2000, CELEX 32000L0060.
- Directive-fille sur les eaux souterraines 2006/118/CE du 12 décembre 2006 (Article 17).

#### TEXTES DE LOIS FRANÇAIS

- Loi n° 92-3 sur l'eau du 3 janvier 1992, NOR : ENVX9100061L.
- Décret n° 2001-1220 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles du 20 décembre 2001, NOR MESX0100156D.
- Loi n°2006-1772 sur l'eau et les milieux aquatiques (Lema) du 30 décembre 2006, NOR DEVX0400302L.
- Loi n° 2006-1772 sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006, NOR DEVX0400302L.
- Décret n° 2007-49 relatif à la sécurité sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine du 11 janvier 2007, NOR : SANX0600145D.
- Loi n° 2009-967 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (1) du 3 août 2009, NOR : DEVX0811607L
- Articles R1321-23 du Code de la santé publique du 1<sup>er</sup> avril 2010.
- Loi n° 2010-788 portant sur l'engagement national pour l'environnement (ENE) (Grenelle de l'environnement 2) du 12 juillet 2010, NOR: DEVX0822225L.
- Article L2224-7-1 du Code général des collectivités territoriales (CGCT) du 12 juillet 2010.
- Circulaire n° 2011-13 relative aux mesures exceptionnelles de limitation ou de suspension des usages de l'eau en période de sécheresse du 25 juillet 2011, NOR : DEVL1112870C.
- Loi n° 2015-991 portant sur la nouvelle organisation territoriale de la République (Notre) du 7 août 2015, NOR : RDFX1412429L.

- Articles L211-1 à L211-14 du Code de l'environnement du 26 janvier 2017.

#### TEXTES DE LOIS DEPARTEMENTAUX

- Arrêté N° 25-2018-07-11-006, portant restriction provisoire des usages de l'eau: niveau alerte sur l'ensemble du département du Doubs 4 (2018).

# TEXTES DE LOIS FEDERAUX

- LOI FEDERALE SUR LA PROTECTION DES EAUX (LEAUX) DU 24 JANVIER 1991, RS 814.20.
- Ordonnance sur la protection des eaux (OEAUX) du 28 octobre 1998 RS 814.201.
- Loi fédérale sur les denrées alimentaires (LDAI) du 20 juin 2014, RS 817.0 : Article 26.
- Ordonnance du département fédéral de l'intérieur (DFI) sur l'eau potable et l'eau des installations de baignade et de douche accessibles au public (OPBD) du 16 décembre 2016 RS 817.022.11.
- Ordonnance sur la signalisation routière (OSR) (2.11) 5 septembre 1979, RS 741.21.
- Ordonnance sur la garantie de l'approvisionnement en eau potable lors d'une pénurie grave (OAP) du 1<sup>er</sup> Octobre 2020 RS 531.32
- Ordonnance sur les denrées alimentaires et les objets usuels (ODAlOUs) du 16 décembre 2016, RS. 817.02.

-

#### TEXTES DE LOIS CANTONAUX

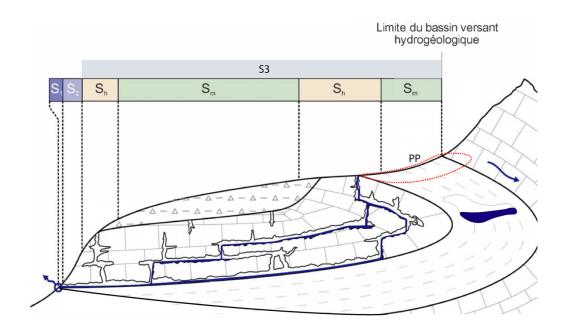
- Loi sur la distribution de l'eau (LDE) du 30 novembre 1964, RS 721.31.
- Loi sur la protection des eaux contre la pollution (LPEP) du 17 septembre 1974, RS 814.31.
- Règlement sur l'approbation des plans directeurs et des installations de distribution d'eau et sur l'approvisionnement en eau potable en temps de crise (RAPD) du 25 février 1998, RS 721.31.1.

# **ANNEXES**

Annexe 1 - Les zones de protection de chaque pays selon le projet ALPEAU (ALPEAU, 2012).

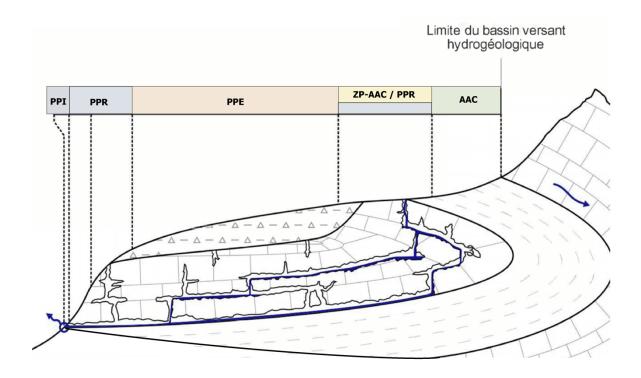
# 1.A PROTECTIONS SUISSES:

Délimitation	Définition
S1	Environs immédiats d'un captage. Elle s'étend sur un rayon d'au moins 10 m autour des captages et des zones de drainages. En milieux karstique, cette zone est également présente autour des zones d'infiltration directes, telles que les pertes.
S2	Espace d'au minimum 100 m de rayon entre la zone S1 et la limite extérieure de S2. Elle a pour objectif de protéger le captage d'éventuels polluants. Elle doit également empêcher que les écoulements vers le captage soit entravés par des installations souterraines.
S3	Zone permettant de laisser assez de temps pour intervenir en cas de pollution accidentelle et permet d'écarter tout danger pour l'eau potable. Par exemple, une station-service ne peut pas se situer dans cette zone.
Périmètre de Protection (PP)	Périmètre qui a pour but de préserver une ressource en eau potable d'intérêt public dans le but d'une exploitation future.
Sm (EPIK)	Zone du bassin versant où la vulnérabilité est moyenne. Elle est définie en fonction de la couche protectrice, du milieu karstique et des conditions d'infiltration.
Sh (EPIK)	Zone du bassin versant où la vulnérabilité est élevée. Elle est définie en fonction de la couche protectrice, du milieu karstique et des conditions d'infiltration.



# 1.B PROTECTIONS FRANÇAISES:

Délimitation	Définition
Périmètre de Protection Immédiate (PPI)	Théoriquement de faible dimension autour du captage, il a pour objet la protection des ouvrages, notamment des drains captants.
Périmètre de Protection Rapprochée (PPR)	L'objectif de ce périmètre est de prévenir les risques de pollutions dans une zone d'infiltration sensible. Sa taille et sa géométrie peuvent varier considérablement en fonction du système aquifère.
Périmètre de Protection Éloignée (PPE)	N'a pas de caractère obligatoire. Sa superficie correspond à la zone d'alimentation du point d'eau. Souvent confondu avec le PPR en zone karstique.
Zone de protection de l'Aire d'alimentation du captage (ZP-AAC).	Zone de protection face aux pollutions diffuses qui s'infiltrent indirectement par le biais de la pluie ou de l'irrigation
Aire d'alimentation du captage (AAC)	Bassin d'alimentation du captage. Zone où la goutte d'eau tombée rejoint le captage.



#### Annexe 2 — Questions envoyees par mail

#### 2.A PERSONNES POLITIQUES:

<u> </u>		
Personne	Fonction	
Cotting Patrick	Syndic du Lieu	
Morand Stives	Syndic du Chenit	
Grosjean Jean-Marc	Adjoint à la mairie de Pontarlier	
Leroux Alexandra	Adjointe à la mairie de Pontarlier	
Reymondin Laurent	Municipal, Dicastère Eau - Épuration - Traitement des déchets - Énergie	
Defrasne Daniel	Président du syndicat des eaux de Joux	
Charrière Sylvain	Directeur Eau et Assainissement du Grand Pontarlier	
Rogenmoser Loic	Responsable technique de la distribution de l'eau de ValRégiEaux	
Nibio Jean-Pierre	Ancien technicien à la ville de Pontarlier	
Lonchampt Frédéric	Responsable technique Eau et de Assainissement du Grand Pontarlier	

- Qui s'occupe de la distribution de l'eau au sein de votre commune ou intercommunalité ?
- Quel organisme s'occupe de la gestion de l'eau sur votre commune ?
- Comment s'organise la structure de votre réseau d'eau ?
- D'où vient l'eau distribuée dans votre commune ou intercommunalité?
- Quelles sont les principales activités consommatrices ?
- Avez-vous déjà connu des difficultés à approvisionner les habitants ?
- Qui décide d'instaurer des mesures spécifiques en cas de périodes de crise ?
- Avez-vous des plans de replis en cas de manque d'eau au niveau de votre ressource principale ?

#### 2.B PROFESSIONNELS DE LA GESTION DE L'EAU:

Personne	Fonction
Resch Jean-Noël	Agent technique des zones humides à l'établissement public d'Aménagement et de gestion de l'Eau du Haut-Doubs et de la Loue (EPAGE)
Sauret Michel	Agent technique des zones humides à l'établissement public d'Aménagement et de gestion de l'Eau du Haut-Doubs et de la Loue (EPAGE)
Schmidt Florence	Project & Energy Manager à Romande Energie SA

#### 2.C PERSONNES DE LA SOCIETE CIVILE :

Personne	Fonction
M. et Mme Rochat	Alpage de la Baronne
M. et Mme Pittet	Alpage des Amburnex
M. et Mme Germain	Alpage Pré de Bière
M. et Mme Fuchs	Alpage de la Petite-Dent
M. et Mme Fuchs	Alpage du Grati

- Quelles sont vos sources d'approvisionnement en eau potable au cours de l'année ?
- Quelles activités vous demandent le plus d'eau au niveau de votre alpage?
- Possédez-vous des animaux d'élevage (vaches, chèvres etc..)?
- Avez-vous déjà été affecté par le manque d'eau par le passé ? Si oui, quelle a été la solution afin de maintenir de l'eau pour vos activités ?
- Ces solutions ont-elles eu un coût important?
- Avez-vous été impacté par la sécheresse de 2018 ? Si oui sur quels points ?
- Aujourd'hui, avez-vous des plans de replis en cas de nouveau manque d'eau ?
- Que pensez-vous des dernières sécheresses sur le massif jurassien ? Pensez-vous qu'il y en ait plus qu'avant ?
- Savez-vous si la municipalité sur laquelle vous vous situez met en place des solutions au niveau de l'approvisionnement en eau de ses alpages pour l'avenir ?

#### Annexe 3 - Questionnaire type utilise lors des entretiens

- 1. Données personnelles :
- Nom, prénom, profession.
- 2. État du réseau de distribution actuel
- Comment s'organise le réseau de distribution d'eau de votre commune actuellement ?
- Quelles sont les sources d'approvisionnement en eau de votre réseau?
- Quels sont les lieux de stockage?
- Quelles sont les principales sources de consommation d'eau ? Comment évoluent-elles ?
- Quels sont les principaux enjeux locaux autour de la gestion de la ressource en eau actuellement ?
- Comment qualifieriez-vous la méthode locale de gestion de la ressource en eau ? (le système actuel est-il bon ?)
- Quels point négatifs pouvez-vous relever sur le système actuel ?
- 3. L'impact des sécheresses de 2003 et 2018
- Quels ont été les impacts des sécheresses de 2003 et 2018 sur la quantité d'eau potable disponible ?
- La qualité de l'eau a-t-elle été impactée ?
- L'accès à l'eau potable a-t-elle été limitée ?
- Certaines localités de votre communes ont-elles été plus vulnérables ?
- Quelles mesures spécifiques ont été mises en place lors de ces sécheresses ?
- Votre stratégie de gestion des eaux a-t-elle dû s'adapter ? Si oui, comment ?
- Pensez-vous que de telles sécheresses vont devenir davantage présents à l'avenir ?

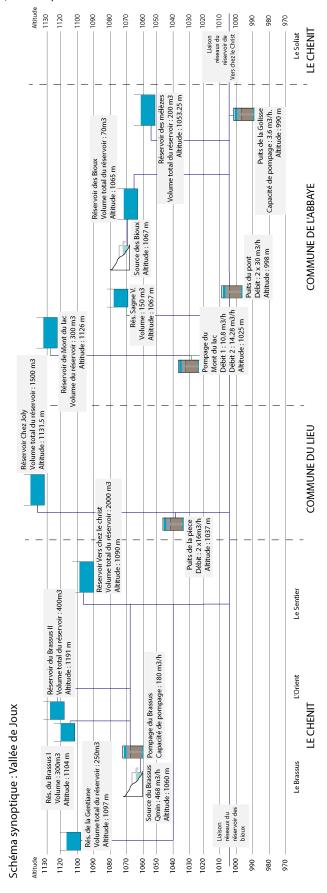
#### 4. Les enjeux pour l'avenir

- Avez-vous modifié votre stratégie de gestion de l'eau depuis l'apparition des différentes sécheresses ?
- Sur quels enjeux les sécheresses passées ont-elles influencé la gestion locale de l'eau ?
- Quelles actions, actuelles ou à venir, pourraient constituer des mesures d'adaptation sur votre commune ?

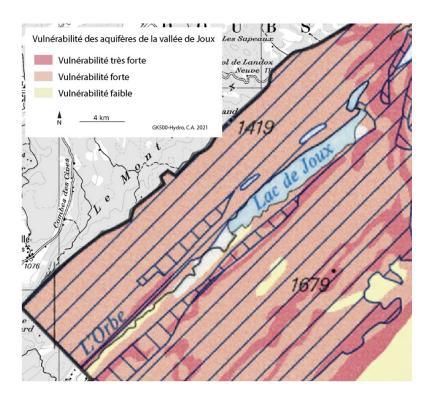
# Annexe 4 - Organisation des communes de la vallee de Joux (Bureau technique communal du Chenit, 2020)

Communes principales	Le Chenit	Le Lieu	L'Abbaye
Villages	Le Sentier (chef-lieu) Le Brassus L'Orient -Le Solliat	Le Séchey Les Charbonnières Le Lieu	Le Pont Les Bioux L'Abbaye
Hameaux	Chez-le-Maître La Golisse Le Campe Le Rocheray Les Piguet- Dessous/Dessus Le Marchairuz	Esserts-de-Rive	

Annexe 5 — Schema synoptique du reseau d'eau de la vallee de Joux (Bureau technique communal du Chenit, 2020)



Annexe 6 — Vulnerabilite des aquiferes de la vallee de Joux (mapgeoadmin.ch)

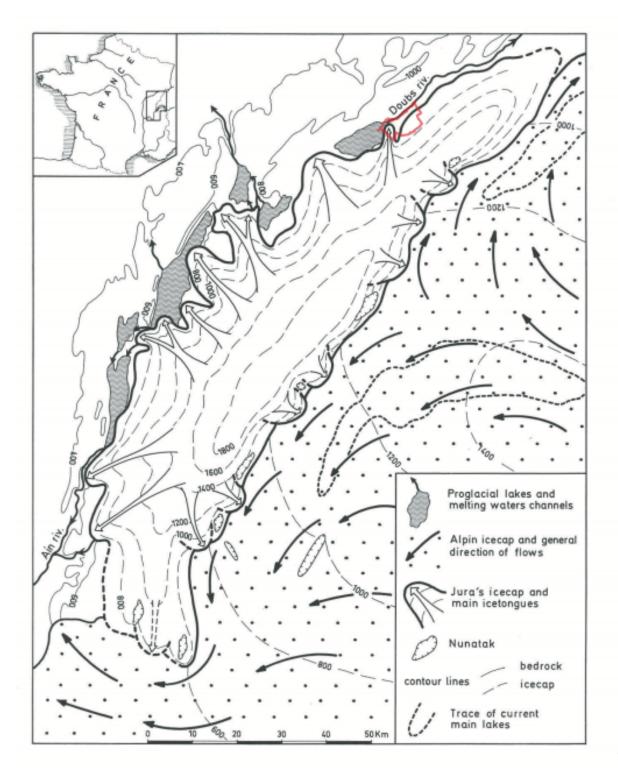


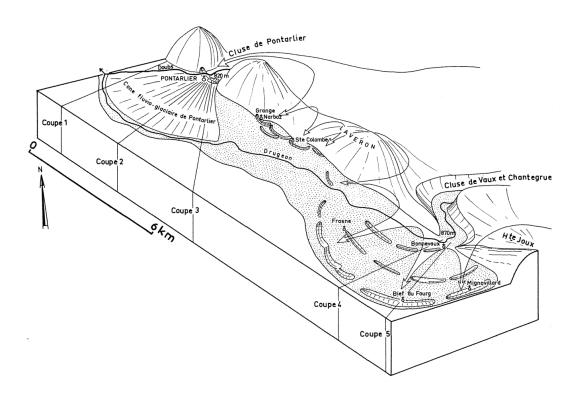
Annexe 7 — Communes du Grand Pontarlier (GrandPontarlier, 2021)

Communes principales
Pontarlier
Chaffois
La Cluse-et-Mijoux
Dommartin
Doubs
Granges-Narboz
Houtaud
Sainte-Colombe
Verrières-de-Joux
Vuillecin

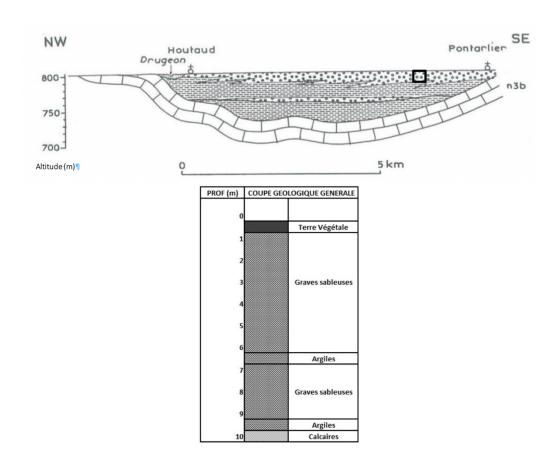
# Annexe 8 – Localisation de Pontarlier lors de la dernière periode glaciaire (Arn & Campy, 1990; Campy, 1982)

# 8.A POSITION DE PONTARLIER DANS LE MASSIF JURASSIEN :

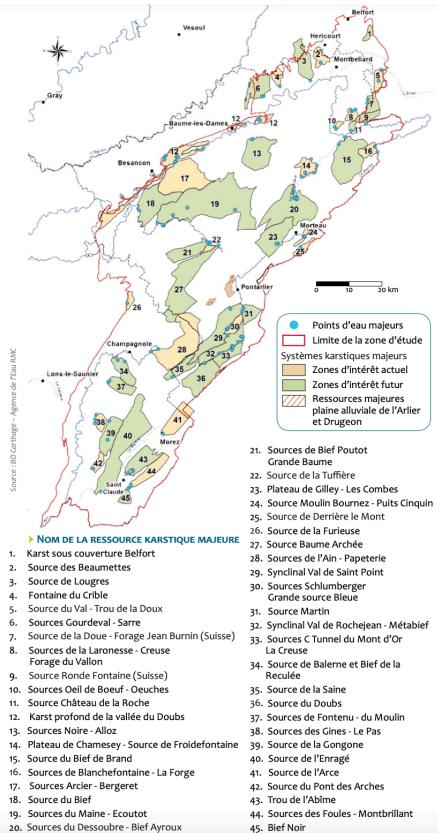




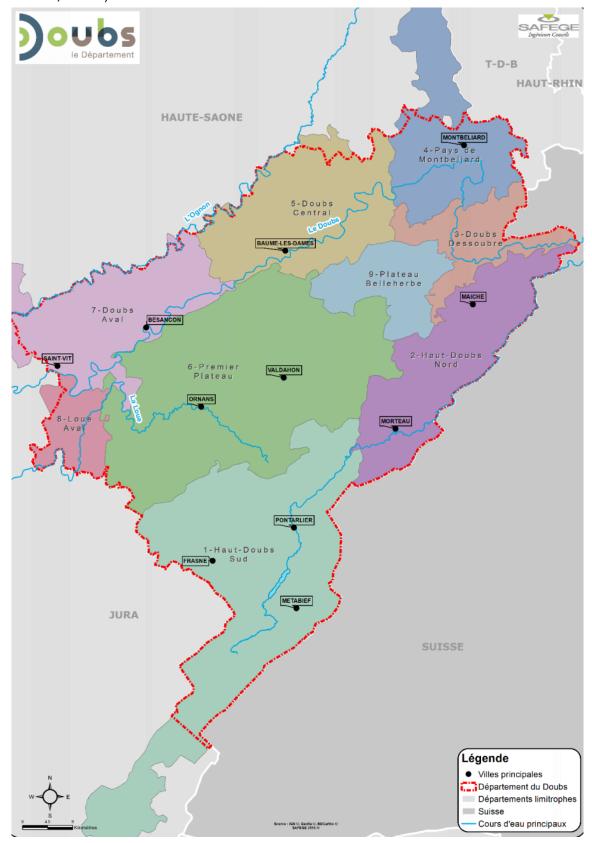
# 8.B COUPE LITHOLOGIQUE DE PONTARLIER ET DE LA PLAINE DE L'ARLIER :



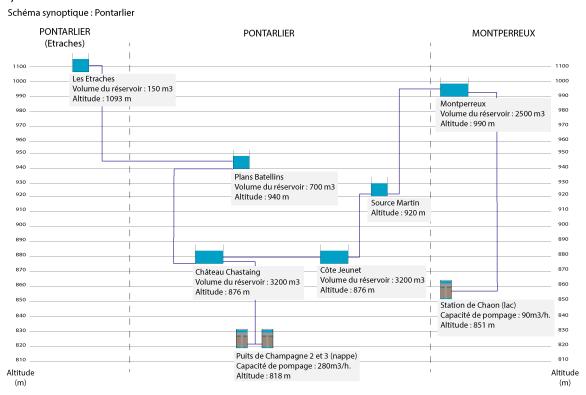
Annexe 9 - Sources karstiques majeures Presentes sur le massif jurassien Français. (Agence de l'eau, 2013)



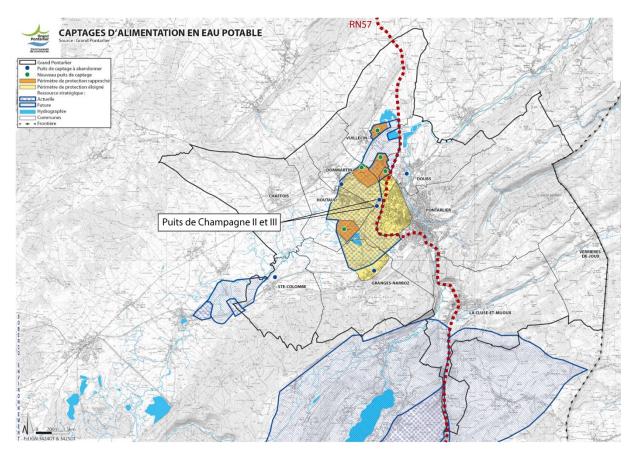
Annexe 10 – Delimitation des zones homogenes pour la gestion de l'eau dans le Doubs (SAFEGE, 2018)



# Annexe 11 — Schema synoptique du reseau d'eau de Pontarlier (GrandPontarlier, 2021)

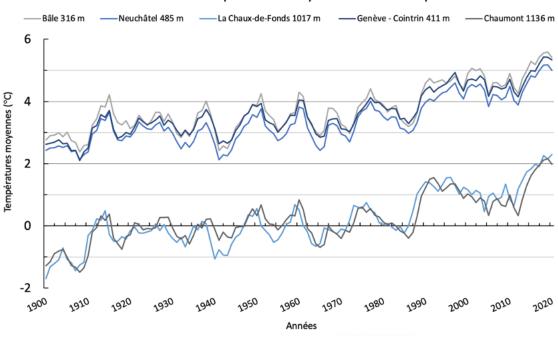


Annexe 12 – Protection des captages de Pontarlier (Grand Pontarlier, 2018)

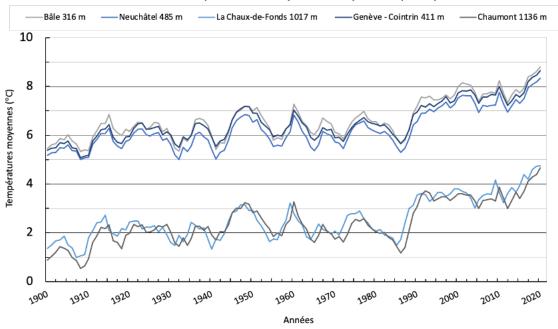


Annexe 13 - Évolution des temperatures moyennes par saison depuis 1901 (DataMeteoSuisse, 2021a)

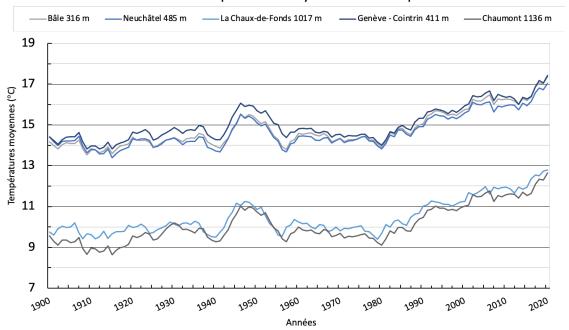
# Evolution des températures moyennes en hiver depuis 1901



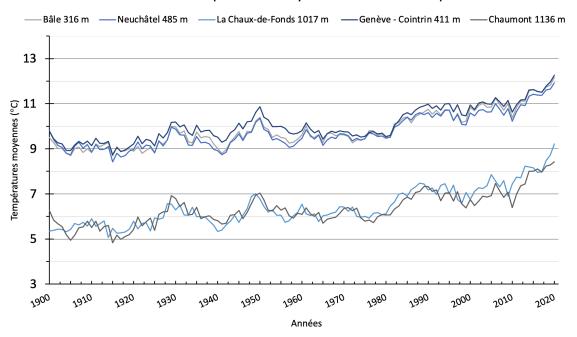
# Evolution des températures moyennes au printemps depuis 1901



# Evolution des températures moyennes en été depuis 1901

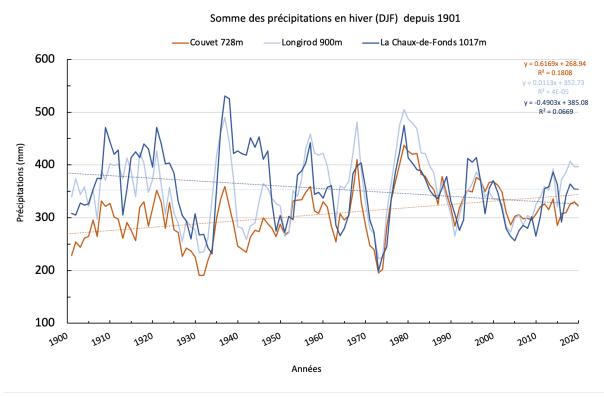


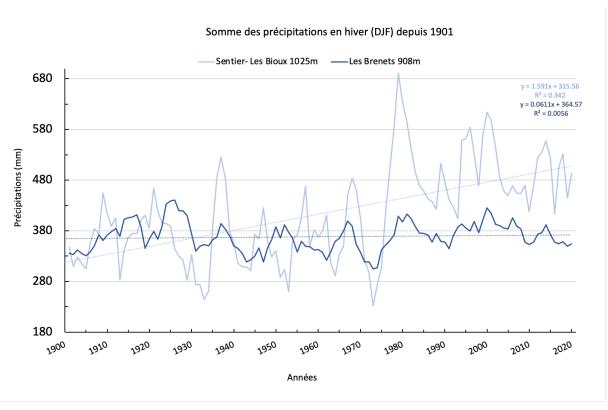
# Evolution des températures moyennes en automne depuis 1901



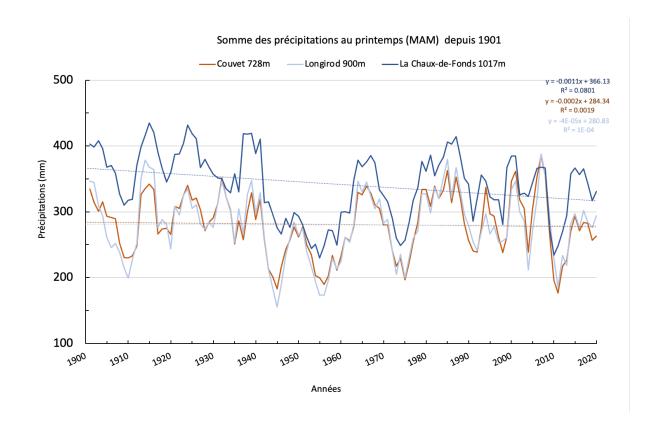
# Annexe 14 - Évolution des precipitations par saison depuis 1901 (DataMeteoSuisse, 2021a):

# 14.A SOMME DES PRECIPITATIONS EN HIVER

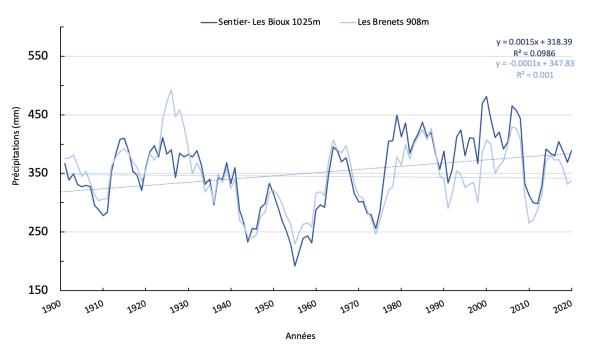




# 14.B SOMME DES PRECIPITATIONS AU PRINTEMPS

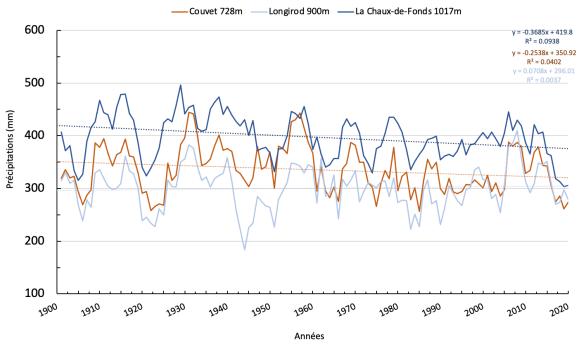


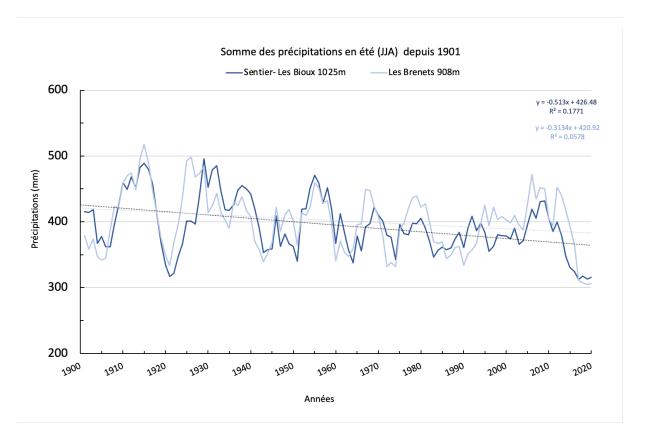
#### Somme des précipitations au printemps (MAM) depuis 1901



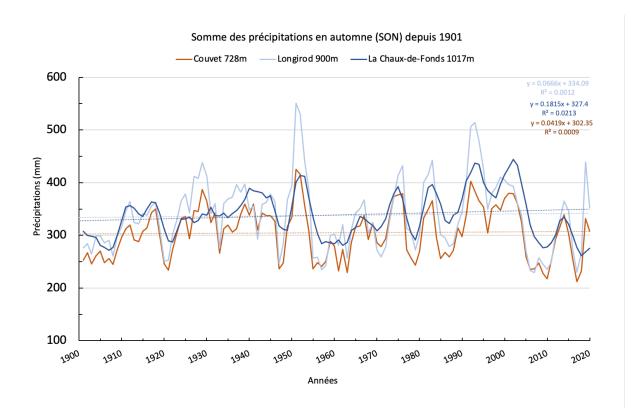
# 14.c Somme des precipitations en ete

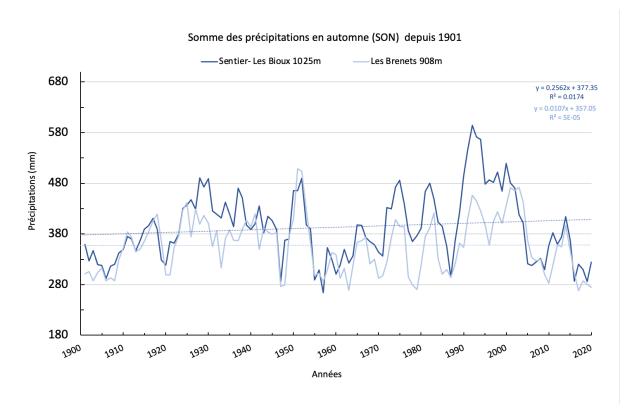






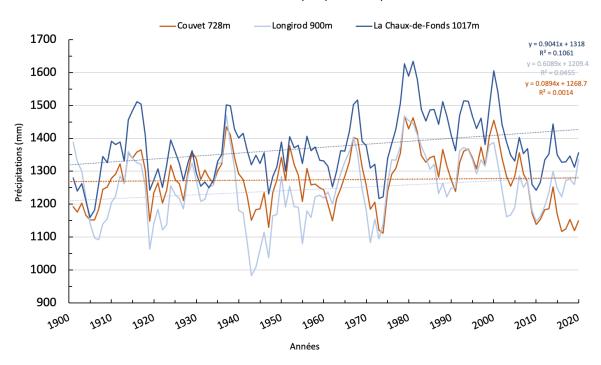
# 14.D SOMME DES PRECIPITATIONS EN AUTOMNE



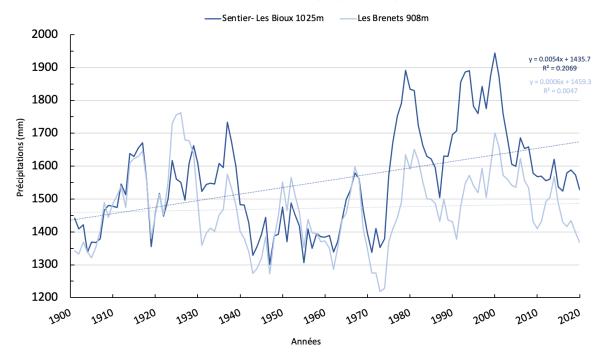


# 14.E SOMME ANNUELLES DES PRECIPITATIONS

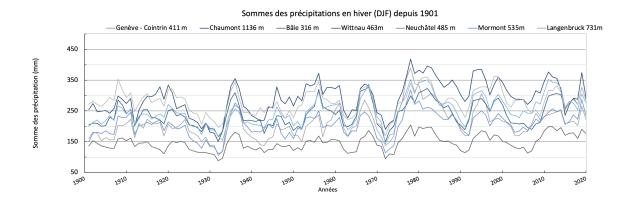
#### Somme annuelle des précipitations depuis 1901



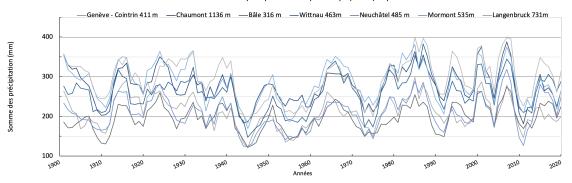
#### Somme annuelle des précipitations depuis 1901

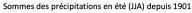


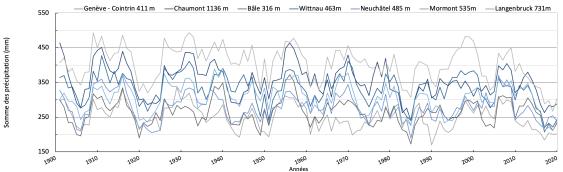
# 14.F SOMME DES PRECIPITATIONS SAISONNIERES SUR LE RESTE DES STATIONS JURASSIENNES

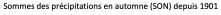


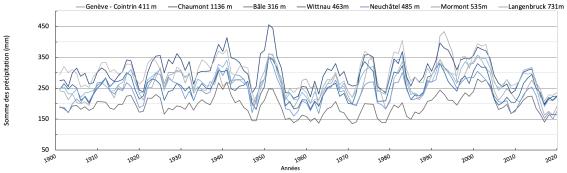
#### Sommes des précipitations au printemps (MAM) depuis 1901



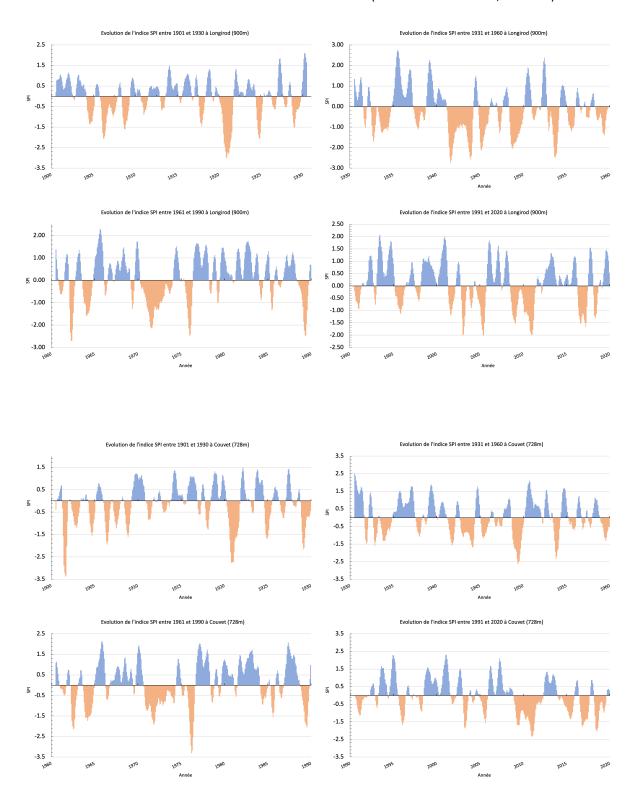


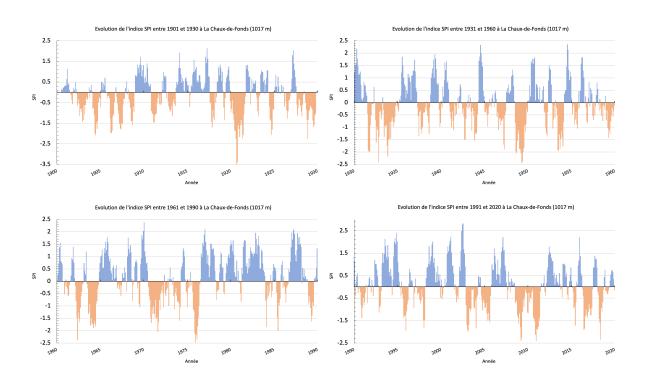


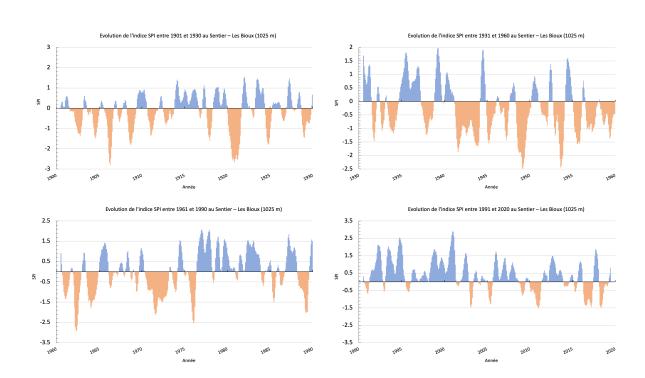


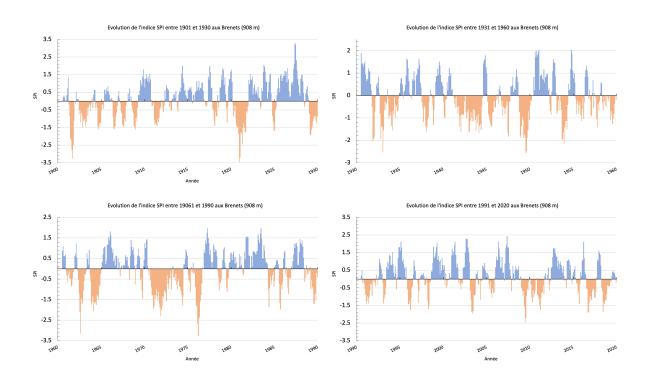


# Annexe 15 - Évolution des indices SPI depuis 1901 (dataMeteoSuisse, 2021a) :









# Annexe 16 - Resume des bulletins meteorologiques du Doubs de l'annee 2003 (MeteoFrance, 2021)

Mois	Résumé	Bulletin météorologique
Janvier	Douceur puis froid, verglas et neige	Précipitations proches de la normale, en excédent de 15 à 20% des plateaux au relief Précipitations sous forme de neige sur les reliefs. De la neige également présente temporairement en plaine.
Février	Froid, peu arrosé, mais enneigé et ensoleillé	Les cumuls mensuels des précipitations sont déficitaires et varient de 20 mm à 100 mm des plaines aux reliefs du Jura. Cela représente entre 30 à 50% de la normale. Les quelques précipitations tombent sous forme de neige sur les reliefs. Près de 3 semaines consécutives sans précipitations significatives.
		La température moyenne est inférieure à la normale d'environ 2°C.
Mars	Très ensoleillé, peu arrosé et	Les cumuls mensuels des précipitations sont déficitaires et ne représentent que 15 à 50% de la normale.
	doux	La neige en début de mois est présente au sol à partir de 600 à 700 m d'altitude. Ce manteau neigeux disparaît graduellement au fil des jours. En fin de mois, il ne reste de la neige que dans les hauts massifs forestiers.
		Les températures moyennes du mois sont supérieures à la normale d'environ 2 degrés. En fin de mois, les températures maximales s'élèvent largement audessus de la normale.
Avril	Ensoleillé, peu arrosé	Les cumuls des précipitations sont déficitaires et varient de 50 à 90% par rapport à la normale. Ce déficit est plus marqué en montagne qu'en plaine.
		Le déficit pluviométrique constaté depuis le début d'année s'est accru. Les réserves hydriques des sols sont d'autant plus basses que l'évapotranspiration est importante.
		Les moyennes mensuelles de températures dépassent les normales de +1 à 2°C. Ce mois est très contrasté avec un début du mois relativement froid et la présence de gelée localement. La fin du mois quant à elle possède des températures presque estivales qui excèdent les normales de 4°C.
Mai	Très doux et peu arrosé	Les cumuls des précipitations varient de 50 mm à 110 mm des plaines aux reliefs. Elles sont encore déficitaires. Les rapports aux normales varient de 50 à 75%.
		Les moyennes mensuelles des températures dépassent les normales d'environ 1,5 °C.
Juin	Mois très chaud, très ensoleillé et peu arrosé.	Les cumuls des précipitations varient de 20 mm à 100 mm et sont fortement déficitaires. Les rapports aux normales varient de 20 à 70%. C'est le cinquième mois consécutif déficitaire.
		La conjugaison du déficit pluviométrique avec l'accélération du développement de la végétation génère une sécheresse estivale précoce et inquiétante.
		Les températures moyennes excèdent la normale de plus de +6°C. Elles constituent pour les minimales comme les maximales de nouvelles valeurs moyennes records. Les précédents records de 1950 ou 1976 sont largement dépassés d'environ 3°C. C'est le second mois le plus chaud après juillet 1983.
Juillet	Très chaud, et ensoleillé. Manque de précipitations.	Les hauteurs d'eau varient de 40 à 115 mm tombés. Les rapports aux normales varient de 50 à 90%. De février à juillet, les cumuls représentent de 48 à 72 % des normales soit l'équivalent de 2 à 3 mois de précipitations normales dans le Doubs.
		Une évapotranspiration encore supérieure à la moyenne associée aux déficits de précipitations génère un état de sécheresse préoccupant.

		Les températures moyennes dépassent la normale d'environ 2 °C.
Aout	Mois caniculaire, très ensoleillé.	Le mois est déficitaire. Les cumuls s'étalent de 40 à 90 mm sur les reliefs. Ces cumuls représentent 40 à 80% de la normale. 7º mois consécutif en déficit pluviométrique.
		La température moyenne dépasse la normale de 4 à 6°C. L'écart est beaucoup plus marqué sur les maximales (5 à 8°C) que sur les minimales (1 à 5°C). Les températures sont caniculaires du 3 au 13 août. 11 jours consécutifs avec plus de $35$ °C.
Septembre	Peu arrosé, bien	Les cumuls vont de 50 à 100 mm et représentent 50 à 70% de la normale.
	ensoleillé et doux.	8° mois consécutif en déficit pluviométrique. La moyenne des maximales dépasse la normale de 1 à 2°C et compense largement la moyenne des minimales légèrement en dessous de la normale.
Octobre	Très arrosé et frais	Les cumuls varient entre 160 à 230 mm. Les rapports aux normales sont compris entre 160% et 200%. La neige refait son apparition sur les hauts reliefs.
		$1^{\rm er}$ mois de l'année avec un excédent pluviométrique. Le déficit pluviométrique depuis le début d'année s'atténue sensiblement. Néanmoins, ce déficit représente encore de 1 à 3 mois de précipitations normales.
		La température moyenne est inférieure à la normale de 2 à 3°C.
Novembre	Peu arrosé et très doux	Cumuls entre 42 et 97 mm. Les rapports aux normales varient de 40% à 80%. Le déficit est plus marqué en montagne qu'en plaine.
		La neige refait son apparition jusqu'aux plateaux et forme une couche de neige au-dessus de 700 m d'altitude. C'est le neuvième mois déficitaire depuis janvier. Le déficit pluviométrique depuis le début d'année s'accentue. Il représente l'équivalent de 2 à 3 mois de précipitations normales.
		La température moyenne dépasse la normale de 2 à 3°C.
		Les quelques nuits froides ne donnent que de faibles gelées en plaine avec en montagne rarement moins de –5°C.
Décembre	Peu arrosé et normalement froid	Les cumuls s'étalent de 40 à 100 mm des plaines aux reliefs du Jura. Les rapports aux normales varient de 40% à 60%. C'est le dixième mois déficitaire de l'année. Le déficit annuel représente entre 2 et 4 mois de précipitations mensuelles normales.
		La température moyenne est proche de la normale.

# Annexe 17 - Resume des bulletins meteorologiques du Doubs de l'annee 2018 (MeteoFrance, 2021)

Mois	Résumé	Bulletin
Janvier	Très doux et pluvieux	Le cumul mensuel représente deux à trois fois les valeurs normales, troisième mois de suite excédentaire après novembre et décembre 2017. Les températures sont restées très élevées pour la saison durant tout le mois avec souvent 4 à 5 degrés de plus que la normale.
Février	Ensoleillé, mais froid glacial	Un déficit pluviométrique compris entre 25 et 40% par rapport à la normale. La longue absence de soleil en début de mois ainsi que l'arrivée d'une masse d'air très froide en dernière décade donnent un caractère hivernal. Le ressenti glacial de la dernière décade est accentué par la bise.
Mars	Bien arrosé, température moyennement fraiche	Excédent pluviométrique qui atteint deux fois la valeur normale d'un mois de mars. Température très proche de la moyenne de saison tout au long du mois.
Avril	Chaud et peu arrosé	Les précipitations sont partout déficitaires. En moyenne le cumul représente 40 à 60 % de la normale. Les températures sont au-dessus des moyennes de 3 à 5 °C.
Mai	Chaud et bien arrosé	Les pluies sont très souvent excédentaires, avec un caractère fréquemment instable dû aux nombreux orages.  Températures nettement plus chaudes que la normale, 2°C de plus en moyenne.
Juin	Orageux, mais estival	Les cumuls des précipitations sont excédentaires sur les reliefs. Les températures sont a peine au-dessus des normales.
Juillet	Chaud et sec	Déficit de précipitations. Températures très chaudes (canicule du 24 au 31)
Aout	Très chaud et très sec	Cumul des précipitations déficitaires, quelques orages. Températures très chaudes, particulièrement au début du mois.
Septembre	Très chaud et sécheresse persistante	La pluviométrie est déficitaire de 20 à 50%. Les cumuls ne dépassent pas les 30 mm (dus aux orages locaux).  Très chaud, les moyennes sont supérieures de 4°C par rapport aux normales.
Octobre	Assez chaud, encore très sec	La sécheresse persiste, mois d'octobre le plus sec depuis 30 ans. Températures douces voir chaudes en milieu de mois.
Novembre	Doux et peu arrosé	Manque de précipitations moins marqué que pour les derniers mois même s'il est encore présent.  Moyenne des températures au-dessus des normales, avec une première quinzaine plus douce.
Décembre	Doux et pluvieux	Cumuls des précipitations excédentaires, notamment en secteur montagneux. On totalise plus de 300mm sur la Haute Joux. La douceur est présente la majeure partie du mois. Nous retrouvons un écart à la moyenne proche de 2°C.

# Annexe 18 — Communique de presse du canton de Vaud lors de la secheresse de 2003 (Source : https://www.vd.ch/toutes-les-actualites/communiques-de-

PRESSE/DETAIL/COMMUNIQUE/RESTRICTION-DE-LARROSAGE-PAR-POMPAGE-EN-RIVIERE-1056473390.PDF)



Bureau d'information et de communication

Rue de la Barre 2 1014 Lausanne

#### **COMMUNIQUÉ DE PRESSE**

#### Restriction de l'arrosage par pompage en rivière

Les conditions météorologiques de ces derniers mois ont conduit à une baisse préoccupante des débits dans les cours d'eau. Pour ces raisons, le recours à l'eau des rivières par l'utilisation des autorisations de pompage accordées devra, si les conditions de sécheresse se maintiennent, être interdit.

Dès ce jour, il est instamment demandé aux utilisateurs de restreindre autant que possible leurs prélèvements.

Tout prélèvement non-autorisé, de même que tout dépassement de capacité de pompage autorisé, seront dénoncés.

Sans changement notoire de la situation, l'interdiction de pompage en rivière pourrait être prononcée à partir du 1er juillet 2003.

Cet avis est coordonné avec le Service des ponts et chaussées, section lacs et cours d'eau du canton de Fribourg en ce qui concerne la région de la Broye.

Bureau d'information et de communication de l'Etat de Vaud

Lausanne, le 24 juin 2003

#### RENSEIGNEMENTS

Philippe Hohl, service des eaux, sols et assainissement, DSE, 021 316 75 56

Bureau d'information et de communication de l'Etat de Vaud www.vd.ch - info.bic@vd.ch

# Annexe 19 – Strategie actuelle et future de l'alimentation en eau de Pontarlier (GrandPontarlier, 2021)

