

Klimawandel am Oberrhein

Changement climatique dans le Rhin supérieur

NILS RIACH, NICOLAS SCHOLZE, RÜDIGER GLASER,
SOPHIE ROY & BORIS STERN



Fonds européen de développement régional
(FEDER)
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
(EFRE)





Klimawandel am Oberrhein

Changement climatique dans le Rhin supérieur

NILS RIACH¹, NICOLAS SCHOLZE¹, RÜDIGER GLASER¹,
SOPHIE ROY² & BORIS STERN³

¹Physische Geographie, Universität Freiburg i. Br.

²Météo-France, Illkirch

³GeoRhena, Département du Haut-Rhin, Colmar

Juli / Juillet 2019

Titelbild: Die Dreisam während der Dürreperiode 2018. Photo: Nils Riach
Photo de couverture: La Dreisam pendant la sécheresse de 2018. Photo: Nils Riach

Zitiervorschlag / Citation suggérée

Riach N, Scholze N, Glaser R, Roy S, Stern B (2019): Klimawandel am Oberrhein: Ein zweisprachiges Dossier mit 24 Karten und 6 Begleittexten // Changement climatique dans le Rhin Supérieur: un dossier bilingue avec 24 cartes et 6 textes d'accompagnement. Publiziert bei www.georhena.eu/de/Kartensammlung // publié sur www.georhena.eu/fr/Carthèque

Inhaltsverzeichnis

Table des matières

1	Frosttage	1
2	Les jours de gel	3
3	Sommerniederschlag, Trockenphasen und Dürrierisiko	9
4	Les précipitations estivales, les périodes sèches et le risque de sécheresse	12
5	Winterniederschlag und Hochwassergefahr	20
6	Les précipitations hivernales et le risque d'inondation	23
7	Starkregen	30
8	Les pluies intenses	33
9	Sommertage	40
10	Les journées estivales	42
11	Tropennächte	48
12	Les nuits tropicales	51

Vorbemerkungen:

1. Das vorliegende Dossier besteht aus 24 Karten zur klimatischen Entwicklung der Trinationalen Metropolregion Oberrhein und jeweiligen Begleittexten. Das mögliche zukünftige Klima wird anhand 6 klimatologischer Indikatoren dargestellt. Diese sind namentlich: Frosttage, sommerlicher und winterlicher Niederschlag, Starkregen, Sommertage und Tropennächte.
2. Jedes Kartenset beinhaltet pro Indikator 2 Karten zur Entwicklung in der nahen Zukunft (2021-2050) und 2 Karten zur fernen Zukunft (2071-2100). Für beide Zeithorizonte liegt zudem je eine Karte für ein moderates (RCP4.5) und ein starkes (RCP8.5) Klimawandel-Szenario vor.
3. Der Begleittext dient als Interpretationshilfe für die Klimakarten. Er enthält Tabellen mit Referenzwerten an verschiedenen Messstationen, mit deren Hilfe die Stärke des klimatischen Änderungssignals besser eingeschätzt werden kann. Außerdem werden die Hauptaussagen der Karten in dem Abschnitt „Zukünftige Entwicklung“ gebündelt dargestellt.
4. Die Auflösung der Gitterzellen in den Klimakarten beträgt ca. 18km. Der angegebene Wert entspricht dem Mittelwert der gesamten Zellenfläche. Gerade bei großen Höhenunterschieden innerhalb einer Zelle kann es daher zu Abweichungen der lokalen Verhältnisse kommen.
5. Die Karten wurden auf Grundlage eines Modellensembles aus 16 Klimamodellen erstellt. Sie entstammen der [EURO-CORDEX-Initiative](#) und wurden dem Projekt Clim'Ability freundlicherweise vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellt. Bearbeitungsstand der Modellsimulationen ist November 2016.

Préambule:

1. Le présent dossier se compose de 24 cartes sur le changement climatique dans la région trinationale du Rhin supérieur, et d'un texte d'accompagnement. Le climat est représenté par 6 indicateurs climatologiques. Il s'agit des jours de gel, des précipitations hivernales et estivales, des pluies intenses, journées estivales et des nuits tropicales.
2. L'ensemble contient 2 cartes par indicateur sur l'évolution dans un avenir proche (2021-2050) et 2 cartes pour un avenir lointain (2071-2100). Pour chacun des deux horizons temporels sont également disponibles deux cartes: une carte pour un scénario de changement climatique modéré (RCP4.5) et une carte pour le scénario fort (RCP8.5).
3. Le texte joint sert d'aide à l'interprétation des cartes climatiques. Il contient un tableau avec des valeurs de référence à différentes stations de mesure, qui peuvent être utilisées pour mieux estimer l'intensité du changement climatique. En outre, les principales caractéristiques des cartes sont résumées dans la section "Évolution en climat futur".
4. Pour ces cartes, la résolution (ou maille) des cellules est d'environ 18 km. La valeur donnée correspond à la valeur moyenne calculée pour toute la surface de la cellule. Il peut y avoir des écarts de valeurs au sein d'une cellule, en particulier lorsque celle-ci comprend de grandes différences d'altitude.
5. Les cartes ont été créées sur la base d'un ensemble de 16 modèles climatiques. Elles sont issues de [l'initiative EURO-CORDEX](#). Les données issues des modèles ont été mises à la disposition du projet Clim'Ability par le Service météorologique allemand (DWD = Deutscher Wetterdienst). La date de réalisation des simulations est novembre 2016.

Kapitel 1

Frosttage

Ein **Frosttag** ist ein Tag, an dem das Minimum der Lufttemperatur unter 0°C liegt, wobei die Temperatur in 2 Metern Höhe gemessen wird. Die Anzahl der Tage mit **Bodenfrost** ist meist höher als die der Frosttage. Liegt auch die Maximaltemperatur eines Tages unter 0°C, so spricht man von einem **Eistag**. Die Anzahl der Frosttage gibt Auskunft über die Strenge des Winters und ist u.a. ausschlaggebend für die Länge der Wintersportsaison und den Energiebedarf der winterlichen Heizperiode.

TABELLE: Langjährige Mittelwerte der Frosttage an verschiedenen Stationen in der Oberrheinregion⁰

Ort	Tage / Jahr**	Periode	Höhe über NN in m
Karlsruhe-Rheinstetten (Umland)	60,6	1971-2000	112
Straßburg-Entzheim (Umland)	68,7	1971-2000	150
Freiburg (Innenstadt)	52,3	1971-2000	236
Basel-Binningen (Stadttrand)	71,0	1961-2009	316
Wangenbourg*	76,8	1991-2010	465
Weinbiet / Pfälzer Wald	88,3	1971-2000	553
Hornisgrinde	135,7	1971-2000	1.119
Feldberg / Schwarzwald	158,9	1971-2000	1.490

* Die Station Wangenbourg wurde erst im Mai 1990 eingerichtet.

** In Frankreich gelten alle Tage mit einer Minimaltemperatur von kleiner *oder gleich* 0° C als Frosttage, in Deutschland hingegen nur die Tage mit einer Minimaltemperatur strikt unter 0° C. Die Messwerte sind also nicht ganz homogen, die französischen Werte können leicht erhöht sein.

Die Tabelle zeigt, dass die **Anzahl der Frosttage** in der Oberrheinregion **mit der Meereshöhe zunimmt**. Kleinräumige Abweichungen sind jedoch möglich, besonders in Kessellagen, in denen sich im Winter Kaltluft sammelt und somit erhöhte Werte erreicht werden. Wie auch bei den Sommertagen und Tropennächten macht sich bei den Frosttagen ein städtischer Wärmeinseleffekt bemerkbar, der dafür sorgt, dass in den Städten weniger Frosttage gezählt werden als im direkten Umland, wie aus dem Vergleich der Messwerte von Freiburg-Stadt und Straßburg-Entzheim deutlich wird. Die Zahl der Frosttage schwankt zudem beträchtlich von Jahr zu Jahr, in Straßburg-Entzheim etwa zwischen 35 und 104 in der Periode 1971-2000. In den letzten Jahrzehnten ist bereits eine deutliche Abnahme feststellbar. So wurde für das Elsass ein Rückgang von 2-5 Frosttagen pro Jahrzehnt im Zeitraum 1961-2010 errechnet¹.

Zukünftige Entwicklung

Die Klimakarten zeigen, dass sich dieser Trend fortsetzen wird und flächendeckend eine **markante Abnahme der Frosttage** zu erwarten ist. Im Allgemeinen wird die Abnahme in den höher gelegenen, kälteren Regionen stärker sein als in den milderen tiefen Lagen.

Für den Großteil der **Tieflagen** wird bis 2021-2050 eine recht moderate Abnahme der Frosttage um weniger als 18 Tage (RCP4.5) bzw. um die 20 Tage (RCP8.5) vorhergesagt. In der fernen Zukunft (2071-2100) sind es je nach Szenario zwischen ca. 28 bis maximal 40 Frosttage weniger, was mehr als eine Halbierung darstellt. Damit würde die Strenge des Winters zum Ende des Jahrhunderts hin mit dem heutigen Klima Mittelitaliens vergleichbar. Dort misst man z. B. in Florenz im Durchschnitt der Periode 1996-2016 26 Frosttage pro Jahr². Während milde Winter einerseits Probleme wie eine Zunahme von Schädlingen oder die Überwinterung neuer Krankheitserreger aus wärmeren Weltregionen mit sich bringen, werden sie andererseits für einige Wirtschaftszweige auch positive Auswirkungen haben, z. B. einen Rückgang von schneebedingten Verzögerungen in der Logistikkette, weniger frostbedingte Unterbrechungen bei Arbeiten im Freien, z. B. im Baugewerbe, oder eine längere Vegetationsperiode in der Landwirtschaft.

In den **Hochlagen** wird der Rückgang der Frosttage deutlich stärker ausfallen: In der nahen Zukunft (2021-2050) wird er zwischen 20 und 24 Tage pro Jahr betragen, je nach Szenario und Höhenlage. In der fernen Zukunft (2071-2100) liegen die Werte hingegen weiter auseinander: im optimistischeren RCP4.5-Szenario wird ein Rückgang von 36 - 40 Frosttagen prognostiziert, im pessimistischen RCP8.5-Szenario ist schon in mittleren Höhen wie dem Pfälzer Wald mit einer Abnahme von mehr als 50 Tagen, in den Hochlagen über 1.000m sogar mit mehr als 60 Tagen zu rechnen. Konkret bedeutet dies, dass die Winter in den Mittelgebirgen der Oberrheinregion deutlich milder werden und die Schneedeckendauer v.a. unterhalb von 1.000m signifikant abnehmen wird. In den Wintersportgebieten des Schwarzwalds und der Vogesen, aber auch im Schweizer Jura oder im Hotzenwald kann sich die kalte Jahreszeit im ungünstigsten Fall bis Ende des 21. Jahrhunderts um bis zu 2 Monate verkürzen.

Einen **regionalen Hot Spot** stellt die **Hochrheinregion** um Waldshut-Tiengen mit dem Hotzenwald dar. Dort werden mit die höchsten Rückgangswerte prognostiziert, trotz der eher mittleren Höhe des Gebiets. Dies kann mit einer Häufung von Westlagen erklärt werden, die in milderen Wintern vorherrschen und milde, feuchte Atlantikluft in die Oberrheinregion bringen. Diese milde Luft kann über die Burgundische Pforte südöstlich von Mulhouse relativ ungehindert in die Hochrheinregion vordringen. Die Bereiche nördlich des Hochrheins liegen hingegen im Lee der Vogesen, an deren Westseite sich diese Luftmassen oftmals abregnen und in der Oberrheinregion somit nicht mehr so wirksam sind.

0. Die Werte wurden aus folgenden Quellen entnommen und z.T. aus Rohdaten berechnet:

- für die französischen Stationen: offizielle Messwerte von Météo France, freundlicherweise zur Verfügung gestellt von S. Roy
- für die deutschen Stationen: offizielle Messwerte des Deutschen Wetterdienstes (DWD), online verfügbar über das Portal server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.p
- für die Station Basel-Binningen: offizielle Daten von MeteoSchweiz, online verfügbar über das Portal www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-indikatoren.html

1. Météo France, Webportal ClimatHD, URL: www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd [18.07.2019]

2. Weather Online, URL: <https://www.weatheronline.de> [18.07.2019]

Chapitre 2

Les jours de gel

Un **jour de gel** est un jour où la température minimale de l'air, mesurée à une hauteur de 1,50 mètres, est inférieure à 0°C. Le nombre de jours avec gelée au sol est généralement plus élevé que le nombre de jours de gel. Si la température maximale d'un jour est également inférieure à 0°C, on parle alors de jour sans dégel. Le nombre de jours de gel fournit des informations sur la rigueur de l'hiver, et est décisif pour la durée de la saison des sports d'hiver ou les besoins énergétiques de la période de chauffage.

TABLEAU: Normales du nombre de jours de gel dans différentes stations de mesure du Rhin supérieur: ⁰

Lieu	Jours / an **	Période	Altitude en m.
Karlsruhe-Rheinstetten (périphérie)	60,6	1971-2000	112
Strasbourg-Entzheim (périphérie)	68,7	1971-2000	150
Freiburg (centre-ville)	52,3	1971-2000	236
Bâle-Binningen (banlieue)	71,0	1961-2009	316
Wangenbourg*	76,8	1991-2010	465
Weinbiet / Pfälzer Wald	88,3	1971-2000	553
Hornisgrinde	135,7	1971-2000	1.119
Feldberg / Schwarzwald	158,9	1971-2000	1.490

* La station de Wangenbourg n'a ouvert qu'en mai 1990.

** En France, tous les jours avec une température minimale inférieure *ou égale* à 0° C sont considérés comme des jours de gel, alors qu'en Allemagne, seuls les jours avec une température minimale inférieure strictement à 0° C sont considérés comme des jours de gel. Donc, les données du tableau ne sont pas totalement homogènes, les valeurs françaises peuvent être légèrement supérieures.

Le tableau montre que dans la région du Rhin supérieur, le **nombre de jours de gel augmente avec l'altitude**. Cependant, des exceptions sont possibles, en particulier dans les cuvettes où l'air froid s'accumule en hiver, où le nombre de jours de gel est plus élevé. Comme pour les jours d'été et les nuits tropicales, l'effet d'îlot de chaleur urbain se fait sentir durant les jours de gel, ce qui permet de compter moins de jours de gel dans les villes que dans leur voisinage immédiat, comme le montre la comparaison des valeurs mesurées pour le centre-ville de Fribourg-en-Brisgau et Strasbourg-Entzheim. Le nombre de jours de gel varie parfois considérablement d'une année à l'autre, ainsi à Strasbourg-Entzheim on observe entre 35 et 104 jours de gel au cours de la période 1971-2000 ; on constate néanmoins déjà une nette baisse au cours des dernières décennies. Ainsi, pour l'Alsace par exemple, une baisse de 2 à 5 jours de gel par décennie a été calculée pour la période 1961-2010.¹

Évolution en climat futur

Les cartes ci-jointes montrent que l'on peut s'attendre à une **diminution marquée du nombre de jours de gel**, partout dans la région. De manière générale, la diminution sera

plus forte dans les régions à plus haute altitude et froides, que dans les régions à plus basse altitude et plus douces.

Dans la plupart des **régions de basse altitude**, une diminution assez modérée des jours de gel, de moins de 18 jours (RCP4.5), ou d'environ 20 jours (RCP8.5), est prévue dans un avenir proche (2021-2050). Dans un avenir plus lointain (2071-2100), selon le scénario, le nombre de jours de gel diminuera d'environ 28 à 40 jours au maximum, ce qui, compte tenu des faibles valeurs initiales d'environ 60 à 70 jours de gel par an, représente plus de la moitié. Vers la fin du siècle, ceci rendrait la rigueur de l'hiver comparable au climat actuel de l'Italie centrale. Ainsi, à Florence par exemple, une moyenne de 26 jours de gel par an est mesurée pour la période 1996-2016.² Tandis que les hivers doux causeront des problèmes comme l'augmentation des nuisibles ou la survie d'agents pathogènes provenant de régions plus chaudes du monde, ils auront également des effets positifs sur certains secteurs de l'économie, comme par exemple une diminution des retards dans la chaîne logistique en raison de la neige ou du verglas, des interruptions moins fréquentes des travaux extérieurs dus au gel, notamment dans la construction, ou une période végétative plus longue dans l'agriculture.

Dans les **régions à plus haute altitude**, la diminution du nombre de jours de gel sera beaucoup plus forte en termes absolus : dans un avenir proche (2021-2050), il se stabilisera entre 20 et 24 jours de gel par an, selon le scénario et l'altitude. Dans un avenir plus lointain en revanche (2071-2100), les valeurs sont plus hétérogènes : dans le scénario RCP4.5, plus optimiste, on prévoit une diminution de 36 à 40 jours de gel, tandis que dans le scénario RCP8.5, plus pessimiste, une diminution de plus de 50 jours de gel à moyenne altitude (forêt palatine), et même de plus de 60 jours à plus haute altitude (au-dessus de 1 000 mètres) sont à prévoir. Concrètement, cela signifie que les hivers dans les moyennes montagnes du Rhin supérieur seront nettement plus doux, et que la durée de l'enneigement diminuera sensiblement, en particulier en dessous de 1 000 mètres. Dans les stations de sports d'hiver de la Forêt-Noire et des Vosges, mais également du Jura Suisse et du « Hotzenwald », la saison froide pourra ainsi être raccourcie de 2 mois dans le pire des cas d'ici la fin du 21^{ème} siècle.

La région autour de Waldshut-Tiengen et du Hotzenwald constitue un **point chaud régional**. On y prévoit les plus fortes baisses du nombre de jours de gel, ceci malgré l'altitude plutôt moyenne de la zone. Cela peut s'expliquer par la fréquence des flux d'ouest, qui prédominent durant les hivers plus doux et apportent un air océanique doux et humide dans cette région. Cet air doux peut pénétrer assez librement dans cette région par la Porte de Bourgogne au sud-est de Mulhouse. Les régions plus au nord sont en revanche situées sous le vent des Vosges, sur le versant ouest desquelles ces masses d'air précipitent, et qui ne sont donc plus aussi efficaces.

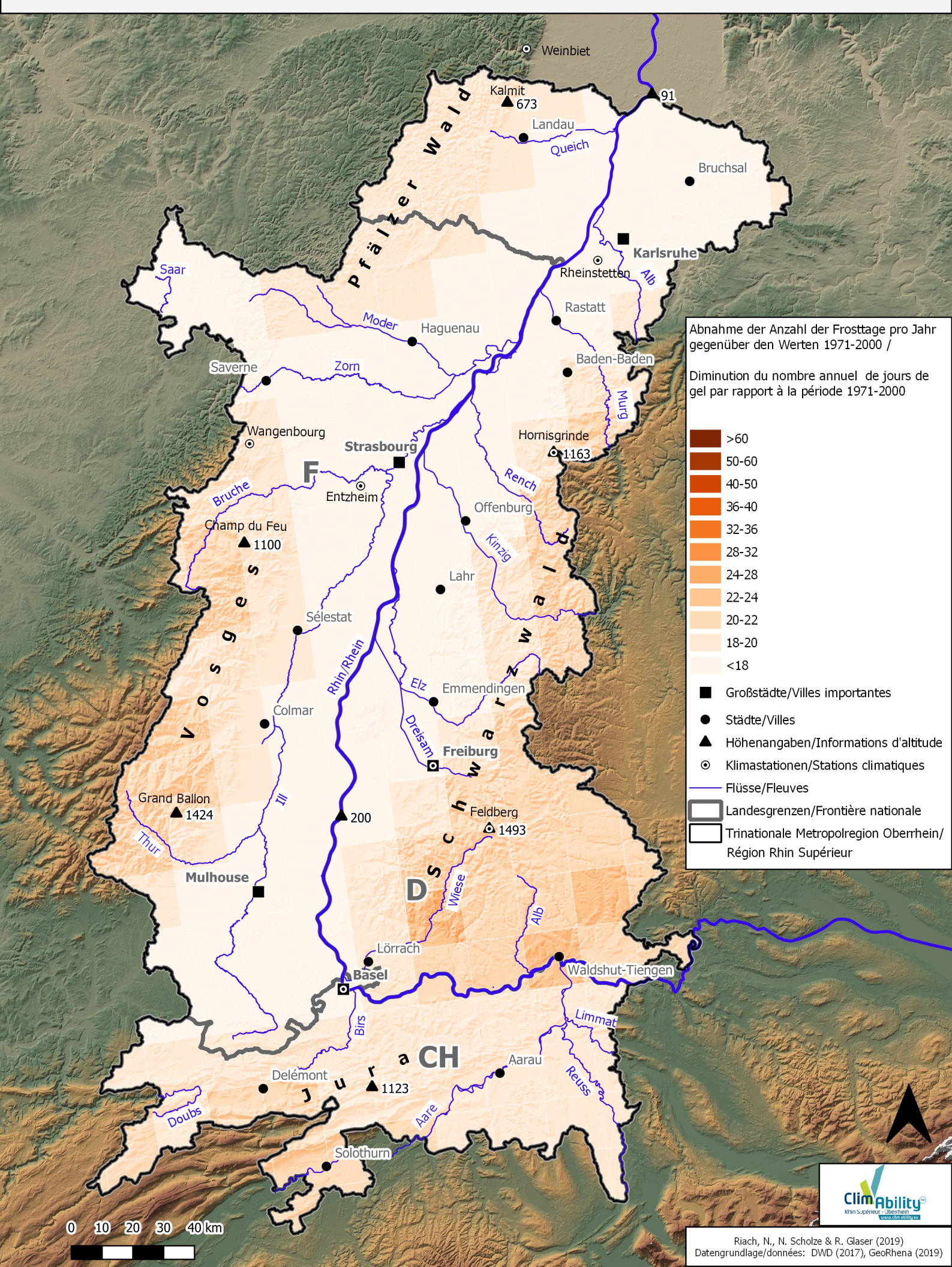
0. Les valeurs indiquées dans le tableau proviennent des sources suivantes et ont été partiellement calculées à partir de données brutes :

- pour les stations françaises : données officielles de Météo France
- pour les stations allemandes : données officielles du Service météorologique allemand (DWD), disponibles en ligne sur le portail server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.pl
- pour la station de Bâle-Binningen : données officielles de MétéoSuisse, disponibles en ligne sur le portail www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-indikatoren.html

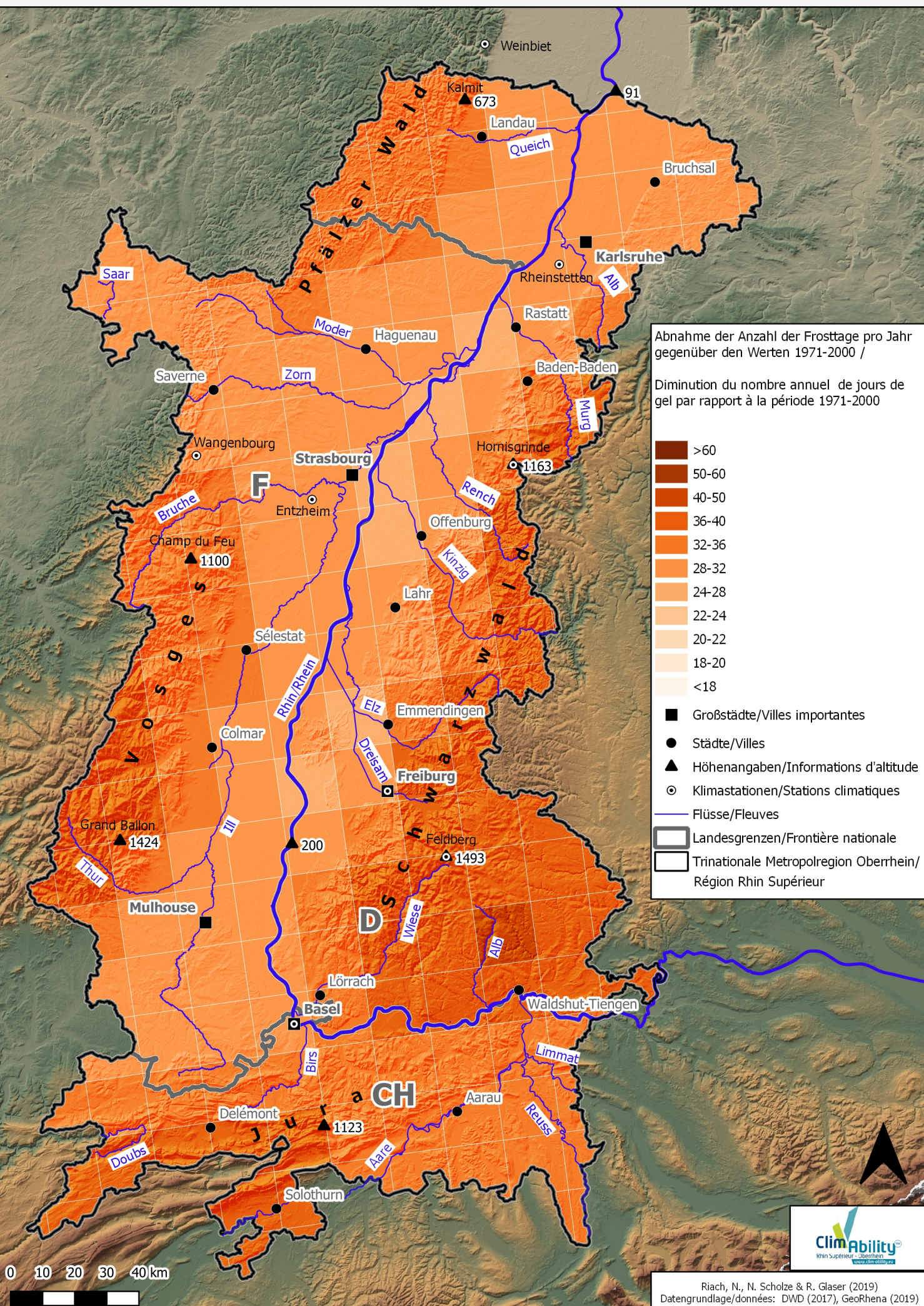
1. Météo France, Portail ClimatHD, URL: www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climat-hd [18.07.2019]

2. Weather Online Ltd. Meteorological Services, URL: <https://www.weatheronline.de/> [18.07.2019]

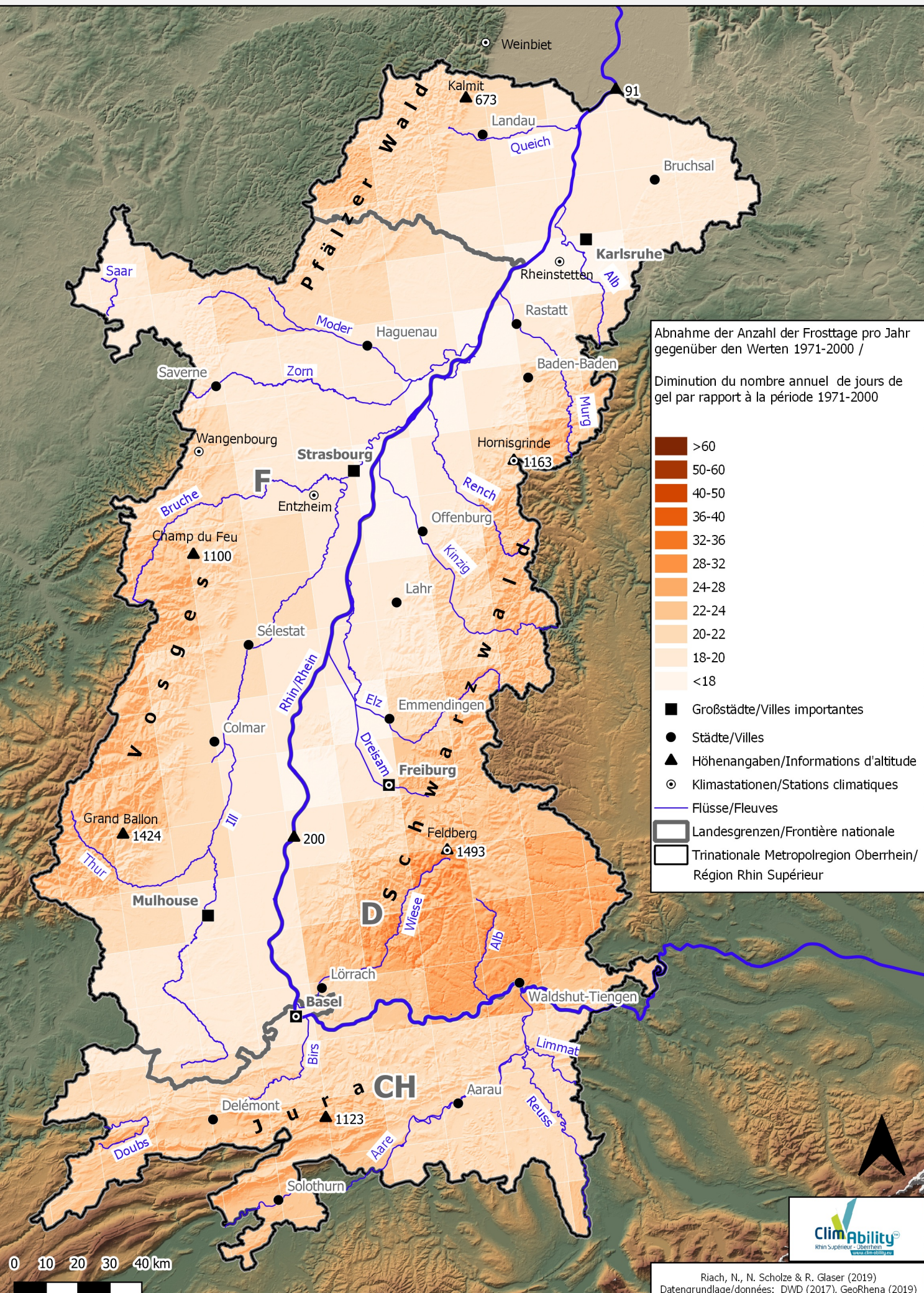
Moderater Klimawandel / Changement climatique modéré (RCP4.5) 2021-2050



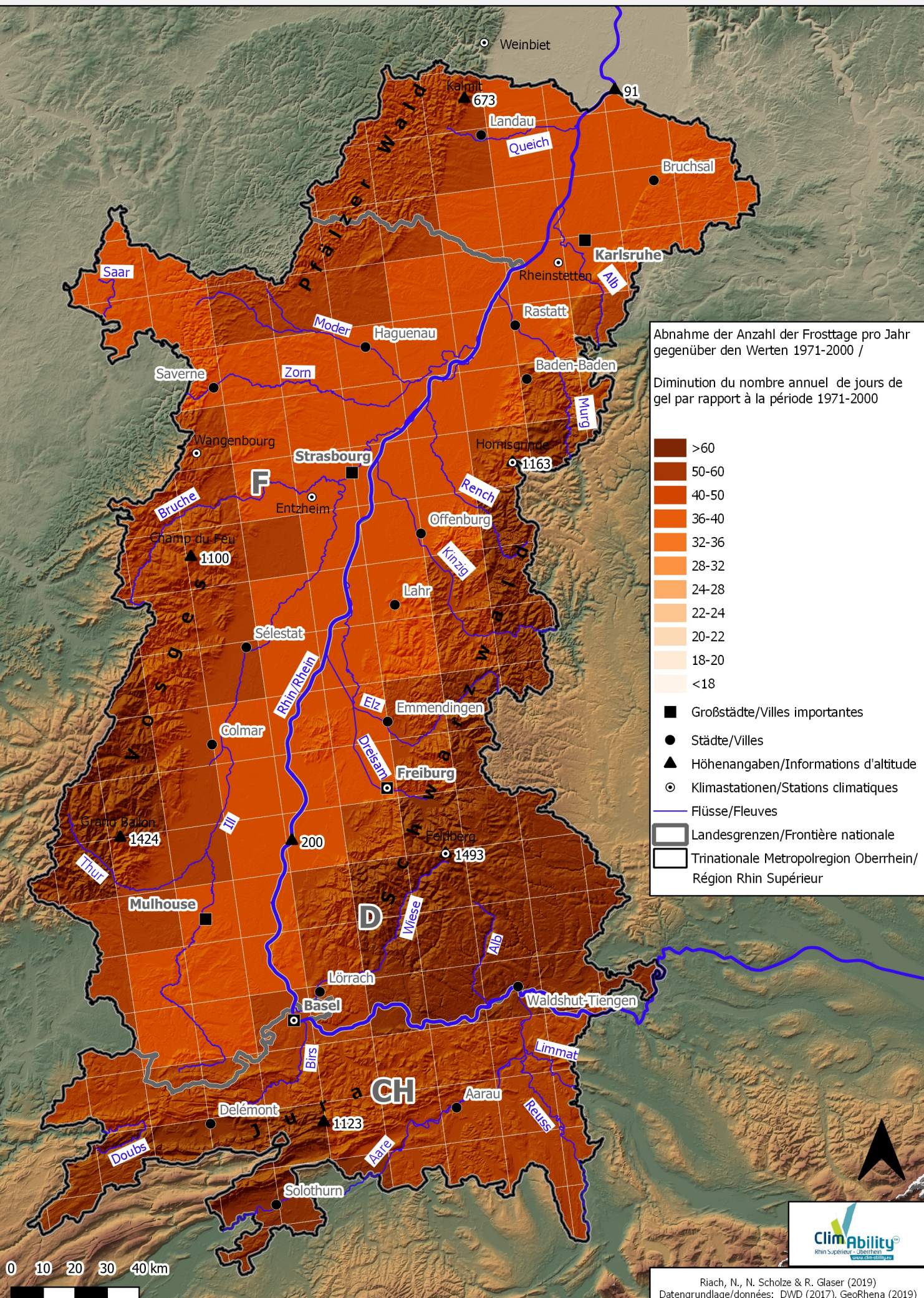
Moderater Klimawandel / Changement climatique modéré (RCP4.5) 2071-2100



Starker Klimawandel / Changement climatique fort (RCP8.5) 2021-2050



Starker Klimawandel / Changement climatique fort (RCP8.5) 2071-2100



Kapitel 3

Sommerniederschlag, Trockenphasen und Dürrerisiko

Unter **Sommerniederschlag** versteht man den gesamten Niederschlag der Monate Juni, Juli und August. In die Summe fließen alle Formen des Niederschlags ein, d.h. Regen, Nebel, Hagel, Graupel, etc.

TABELLE: Langjährige Mittelwerte des Sommerniederschlags an verschiedenen Stationen in der Oberrheinregion⁰

Ort	Niederschlag / mm	Periode	Höhe über NN in m
Karlsruhe-Rheinstetten	249,5	1971-2000	112
Straßburg-Entzheim	201,1	1971-2000	150
Freiburg	292,2	1971-2000	236
Basel-Binningen	253	1961-2009	316
Wangenbourg*	265,2	1990-2010	465
Weinbiet / Pfälzer Wald	159,1	1971-2000	553
Hornisgrinde	491,4	1971-2000	1.119
Feldberg / Schwarzwald	467,8	1971-2000	1.490

* Die Station Wangenbourg wurde erst im Mai 1990 eingerichtet.

Die Tabelle zeigt **erhebliche Unterschiede in der Höhe der Sommerniederschläge** an den einzelnen Stationen. Zunächst fällt auf, dass die höher gelegenen Stationen deutlich mehr Sommerniederschlag verzeichnen als die Stationen in der Rheinebene, zum Teil mehr als doppelt so viel (vgl. Hornisgrinde vs. Straßburg-Entzheim). Allerdings sind die höhenbedingten Unterschiede nicht ganz so markant wie in den Wintermonaten. Außerdem nehmen innerhalb der Rheinebene die Niederschläge von Westen nach Osten zu, was auf Luv-Lee-Effekte an Schwarzwald und Vogesen zurückzuführen ist. So erhält Freiburg auf Grund häufiger Gewitter am Schwarzwaldwestrand deutlich mehr Niederschlag als das noch im Regenschatten der Vogesen liegende Straßburg-Entzheim. Den niedrigsten Wert weist Weinbiet auf, was mit seiner Leelage im Pfälzer Wald erklärt werden kann.

Generell sind die Sommer überall in der Oberrheinregion humid, d.h. der Niederschlag übertrifft die Verdunstung. Trockene Sommer mit negativer Wasserbilanz kommen zwar vor, v.a. in den tieferen Lagen und im Regenschatten der Vogesen, sind aber bislang eher die Ausnahme als die Regel. Dennoch können in Extremjahren wie 2003 oder 2018 die Sommerniederschläge weit unter dem Durchschnitt bleiben. Dies gilt auch für die sehr niederschlagsreichen Höhenlagen, wo es in extremen Trockenjahren immer wieder zum Versiegen von Quellen und lokaler Wasserknappheit kommt.

Trockenphasen und Dürrierisiko

Die Entwicklung des Sommerniederschlags lässt auch Rückschlüsse auf das Auftreten **sommerlicher Trockenphasen** und das damit einhergehende **Dürrierisiko** zu. Tendenziell haben Sommerniederschläge in der Region Oberrhein in den letzten Jahrzehnten leicht abgenommen.¹ Auch hat sich dabei die Struktur der Niederschläge verändert: Niederschläge fallen nunmehr vermehrt in Form von Starkregenereignissen. Trockenphasen und Dürren zeichnen sich je nach Länge und Intensität durch gravierende ökologische und sozio-ökonomische Konsequenzen aus. Dazu zählen u.a.²

- Ernteeinbußen in der Landwirtschaft
- Futtermittelknappheit in der Viehhaltung und daraus resultierend steigende Preise für tierische Produkte
- Waldbrände und Schäden an wenig trockenresistenten Baumarten, v.a. Fichte
- Absinken des Grundwasserspiegels und Austrocknen von Binnengewässern
- Schäden an feuchtigkeitsgebundenen Ökosystemen, Algenblüten und Fischsterben
- Erhöhte Bodenerosion
- Reduzierte Energieproduktion wegen Kühlwasserknappheit
- Engpässe in der Wasserversorgung
- Einschränkung der Binnenschifffahrt durch Niedrigwasser und dadurch Teuerung von Massengütern wie Benzin oder Kohle

Hinzu kommt, dass die Auswirkungen von Dürren meist großflächig sind und lange andauern.

Ausgelöst werden Dürren durch stabile großräumige Hochdrucklagen, die mehrere Wochen bis Monate bestehen. Bei diesen stabilen Hochdrucklagen verdunstet mehr Wasser als dem Boden durch Regen zugeführt wird. Die Bodenaustrocknung wird im Sommer durch hohe Temperaturen beschleunigt, kann aber auch in anderen Jahreszeiten auftreten. Häufig treten in Mitteleuropa sommerliche Dürren nur dann auf, wenn bereits im vorangegangenen Frühjahr zu wenig Niederschlag gefallen ist. Dies war z. B. beim jüngsten, schwerwiegenden Dürreereignis 2018 der Fall, das bereits im Frühjahr begann und bis weit in den Herbst hinein andauerte. Auch nach ausgiebigen Niederschlägen im Winter und Frühjahr 2019 war der Boden in der Oberrheinregion v.a. in den tieferen Schichten noch im Mai 2019 außergewöhnlich trocken, das Wasserdefizit aus dem Vorjahr also noch nicht ausgeglichen.³

Zukünftige Entwicklung

Aus den Klimakarten geht hervor, dass in Zukunft mit einer **Abnahme der Sommerniederschläge von bis zu 25%** gerechnet werden muss. Grundsätzlich ist die erwartete Abnahme in den Mittelgebirgen stärker als in der Rheinebene, dort ist aber auch das Ausgangsniveau höher. Eine Ausnahme bildet die Projektion für die nahe Zukunft (2021-2050) unter dem Szenario RCP8.5: hier wird eine leichte Zunahme v.a. in der Rheinebene und an Oberrhein und Aare um über 4% erwartet, während die Werte in den Mittelgebirgen in etwa gleich bleiben. Insgesamt zeigt also die zukünftige Entwicklung der Sommerniederschläge mit den bisherigen Modellen kein eindeutiges Signal und ist eher vorsichtig zu interpretieren.

Sehr wahrscheinlich wird die Abnahme des sommerlichen Gesamtniederschlags nicht besonders deutlich sein, so dass auch gegen Ende des 21. Jahrhunderts keine wirklich „mediterranen Verhältnisse“ am Oberrhein herrschen werden, in der Zusammenschau mit der Zunahme der Winterniederschläge aber von einer **saisonalen Akzentuierung** und Zuschärfung ausgegangen werden muss. Werte wie etwa in Genua (148mm), Florenz (132mm) oder gar Marseille (69mm) sind im Schnitt nicht zu erwarten. Im Zusammenspiel mit der erwarteten Erhöhung der Lufttemperaturen ist ein Vergleich mit heutigen sub-mediterranen Klimaten wie z. B. in Mailand (209mm) oder Lyon (230mm) eher angemessen.⁴

Ein weiteres Charakteristikum stellt neben der Niederschlagsverteilung die Form des Niederschlagsabkommens dar: einerseits wird es **häufigere und längere Trockenperioden** mit höheren Temperaturen geben, andererseits wird ein größerer Anteil des Sommerniederschlags als Starkregen in weniger Niederschlagstagen fallen.

Als Indikator für ein möglicherweise zunehmendes **Dürreerisiko** ist die Entwicklung des Sommerniederschlags nicht ohne Weiteres geeignet, da Dürre erstens nicht nur im Sommer auftritt und zweitens die prognostizierten Werte nach wie vor recht hohe Niederschläge erwarten lassen. Allerdings lässt sich eine **Tendenz zur Zunahme längerer niederschlagsfreier Trockenperioden** in den Sommermonaten ableiten, die in Kombination mit den steigenden Temperaturen zu einer **Verschlechterung der sommerlichen Wasserbilanz, häufigerer Bodentrockenheit** und einer **potentiell erhöhten Dürregefahr** führt.

Zudem wird die **Variabilität von Jahr zu Jahr** sehr hoch sein, d.h. es wird weiterhin feuchte Sommer geben, aber Trockenphasen bis hin zu extremen Dürresommern wie 2003 und 2018 werden in Zukunft häufiger auftreten und länger dauern. In Vergleichsstudien konnten Anzeichen für die Zunahme blockierender Wetterlagen über Mitteleuropa identifiziert werden, die für stabile Hochdrucklagen mit Sonnenschein, hohen Lufttemperaturen und sehr geringen Niederschlägen sorgen.⁵ Andererseits sorgt diese Tendenz auch für mehr stabile Tiefs mit überdurchschnittlich regenreichen Perioden, sodass sich die Mittelwerte nur geringfügig ändern, die einzelnen Jahre aber durchaus extremer ausfallen können.

Für weitere Informationen:

- Dürremonitor des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) mit aktuellen Karten für die Dürresituation in Deutschland: www.ufz.de/duerremonitor
- Aktuelle Dürresituation in Frankreich, herausgegeben vom Ministerium für nachhaltige Entwicklung: <http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr>
- Aktuelle Dürresituation in der Schweiz, erarbeitet vom Forschungsprojekt Drought-CH: www.trockenheit.ch

0. Die Werte wurden aus folgenden Quellen entnommen und z.T. aus Rohdaten berechnet:

- für die französischen Stationen: offizielle Messwerte von Météo France, freundlicherweise zur Verfügung gestellt von S. Roy
 - für die deutschen Stationen: offizielle Messwerte des Deutschen Wetterdienstes (DWD), online verfügbar über das Portal server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.p
 - für die Station Basel-Binningen: offizielle Daten von MeteoSchweiz, online verfügbar über das Portal www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-indikatoren.html
1. Regionalverband Südlicher Oberrhein (2006): Regionale Klimaanalyse Oberrhein (REKLISO). Bearbeitet von E. Parlow (Universität Basel), D. Scherer und U. Fehrenbach (beide TU Berlin).
 2. Stahl K, Kohn I, Blauhut V, Urquijo J, de Stefano L, Acácio V, Dias S, Stagge JH, Tallaksen LM, Kampragou E, van Loon AF, Barker LJ, Melsen LA, Bifulco C, Musolino D, de Carli A, Massarutto A, Assimacopoulos D, Van Lanen H (2016): Impacts of European drought events - Insights from an international database of text-based report. In: Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 16, 801-819, <https://doi.org/10.5194/nhess-16-801-2016>
 3. Dürremonitor des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ): <https://www.ufz.de/index.php?de=37937> [15.05.2019]
 4. Werte der mediterranen Städte von URL: climate-data.org/ [18.07.2019]
 5. Masato G, Hoskins BJ, Woollings T (2013): Winter and summer Northern Hemisphere blocking in CMIP5 models. J clim 26, S. 7044-7059. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00466.1

Chapitre 4

Les précipitations estivales, les périodes sèches et le risque de sécheresse

Les **précipitations estivales** désignent l'ensemble des précipitations des mois de juin, juillet et août. Toutes les formes de précipitations (pluie, brouillard, grêle, grésil, etc.) entrent dans cette catégorie.

TABLEAU: Normales de précipitations estivales dans différentes stations de mesure du Rhin supérieur:⁰

Lieu	Jours / an	Période	Altitude en m.
Karlsruhe-Rheinstetten	249,5	1971-2000	112
Strasbourg-Entzheim	201,1	1971-2000	150
Freiburg	292,2	1971-2000	236
Bâle-Binningen	253	1961-2009	316
Wangenbourg*	265,2	1990-2010	465
Weinbiet / Pfälzer Wald	159,1	1971-2000	553
Hornisgrinde	491,4	1971-2000	1.119
Feldberg / Schwarzwald	467,8	1971-2000	1.490

* Die Station Wangenbourg wurde erst im Mai 1990 eingerichtet.

Le tableau montre de **nettes différences dans la quantité de précipitations estivales** aux différentes stations. Tout d'abord, on constate que les stations à plus haute altitude enregistrent nettement plus de précipitations estivales que les stations de la plaine du Rhin, parfois plus du double (cf. Hornisgrinde vs Strasbourg-Entzheim). Cependant, les différences dues à l'altitude ne sont pas aussi frappantes qu'en hiver. En outre, les précipitations dans la plaine du Rhin augmentent d'ouest en est, en raison de l'effet de foehn sur les Vosges et la Forêt-Noire: la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense lorsque l'air s'élève, à l'ouest des massifs dans le flux dominant d'ouest. Ces zones sont plus arrosées, tandis que la masse d'air redescend asséchée à l'est des massifs (zones plus sèches). Ainsi, en raison des fréquents orages en bordure de la Forêt Noire, Fribourg-en-Brigau connaît beaucoup plus de précipitations que Strasbourg-Entzheim, qui se trouve à l'abri des Vosges. Weinbiet a la valeur la plus basse, ce qui peut s'expliquer par son emplacement sous le vent dans la forêt du Palatinat.

Dans l'ensemble, les étés sont humides dans le Rhin supérieur, ce qui signifie que les précipitations sont supérieures à l'évaporation. Des mois d'été secs, avec un bilan hydrique négatif, surtout dans les zones de basse altitude et à l'abri des précipitations des Vosges existent, mais constituent à ce jour une exception plutôt que la règle. Néanmoins, lors d'années

extrêmes comme 2003 ou 2018, les précipitations estivales peuvent demeurer bien en deçà de la moyenne. Il en va de même pour les altitudes plus élevées, donc avec des précipitations plus importantes, où l'assèchement des sources et les pénuries d'eau se produisent dans les années très sèches, en particulier dans la Forêt Noire et le massif vosgien.

Périodes sèches et risque de sécheresse

L'évolution des précipitations estivales permet également de présager la survenue de **périodes sèches estivales**, et le **risque de sécheresse** qui y est associé. Elles ont eu tendance à diminuer légèrement au cours des dernières décennies dans le Rhin supérieur,¹ et la structure des précipitations a également changé: elles prennent de plus en plus la forme de pluies intenses. Selon leur durée et leur intensité, les périodes de sécheresse météorologique et hydrologique se caractérisent par de graves conséquences écologiques et socio-économiques. Il s'agit en particulier de :²

- Pertes de récoltes pour l'agriculture
- Pénurie d'aliments pour le bétail, et hausse des prix des produits d'origine animale qui en résulte
- Incendies de forêt, et dommages causés à des essences moins résistantes à la sécheresse, en particulier l'épicéa
- Abaissement du niveau de la nappe phréatique, et assèchement de lacs et étangs
- Dommages aux écosystèmes humides, proliférations d'algues et mortalité des poissons
- Augmentation de l'érosion des sols
- Diminution de la production d'énergie en raison de la pénurie d'eau de refroidissement
- Congestions dans l'approvisionnement en eau
- Restriction du transport fluvial en raison des bas niveaux d'eau, et donc inflation des coûts de marchandises en vrac telles que l'essence ou le charbon.

A cela, il faut ajouter que les effets des sécheresses couvrent généralement des surfaces plus importantes et durent plus longtemps que d'autres événements climatiques.

Les sécheresses sont déclenchées par des situations de haute pression stables, à grande échelle, et qui durent plusieurs semaines, voire plusieurs mois. La quantité d'eau qui s'évapore est alors supérieure à celle apportée par les précipitations. En été, la déshydratation du sol est accélérée par des températures élevées, mais elle peut aussi se produire en d'autres saisons. En Europe centrale, les sécheresses estivales ne surviennent souvent que lorsque les précipitations ont été trop faibles au printemps. Ce fut par exemple le cas avec la récente sécheresse de 2018, qui a débuté au printemps et s'est prolongée jusqu'à l'automne. Même après des précipitations d'hiver et de printemps 2019 importantes, le sol du Rhin supérieur est exceptionnellement sec en mai 2019, surtout dans les couches plus profondes, le déficit en eau de l'année précédente n'étant pas encore compensé.³

Évolution en climat futur

Les cartes climatiques montrent que l'on peut s'attendre à une **réduction des précipitations estivales allant jusqu'à 25 %** dans le futur. La diminution attendue est en principe plus forte en moyenne montagne que dans la plaine du Rhin, mais le niveau de départ y est également plus élevé. Une exception est la projection pour le futur proche (2021-2050) dans le cadre du scénario RCP4.5 : on y attend une légère augmentation de 4%, surtout dans la plaine du Rhin, à l'est de Bâle et en Argovie, tandis que les valeurs en moyenne montagne restent sensiblement identiques. Globalement, l'évolution future des précipitations estivales

avec les modèles précédents ne dégage pas une tendance claire, et doit donc être interprétée avec prudence.

Il est fort probable que la diminution des précipitations estivales totales dans le Rhin supérieur ne soit pas importante au point de pouvoir les comparer, à la fin du 21ème siècle, aux valeurs méditerranéennes actuelles. Toutefois, compte tenu de l'augmentation des précipitations hivernales, il faut s'attendre à une **accentuation des périodes estivales sèches** et une intensification saisonnière. Des valeurs comme à Gênes (148mm), à Florence (132mm) ou même à Marseille (69mm) ne sont pas envisagées. En combinaison avec l'augmentation attendue des températures de l'air, une comparaison avec les climats sub-méditerranéens actuels tels que Milan (209 mm) ou Lyon (230 mm) serait plus appropriée.⁴

Outre la répartition des précipitations, une autre caractéristique présentée est la quantité de précipitations: d'une part il y aura des périodes sèches plus fréquentes et plus longues avec des températures plus élevées, et d'autre part, les épisodes de précipitations estivales seront plus courts et plus intenses.

L'évolution des précipitations estivales n'est pas un indicateur pertinent d'une augmentation possible du risque de sécheresse, car la sécheresse ne se produit pas uniquement en été, et les valeurs prévues laissent encore entrevoir des précipitations assez abondantes. Cependant, on peut déduire une **tendance vers des périodes sèches plus longues, sans précipitation pendant les mois d'été**, ce qui en combinaison avec des températures plus élevées, entraîne une **détérioration du bilan hydrique estival** et un **risque potentiellement accru de sécheresse**.

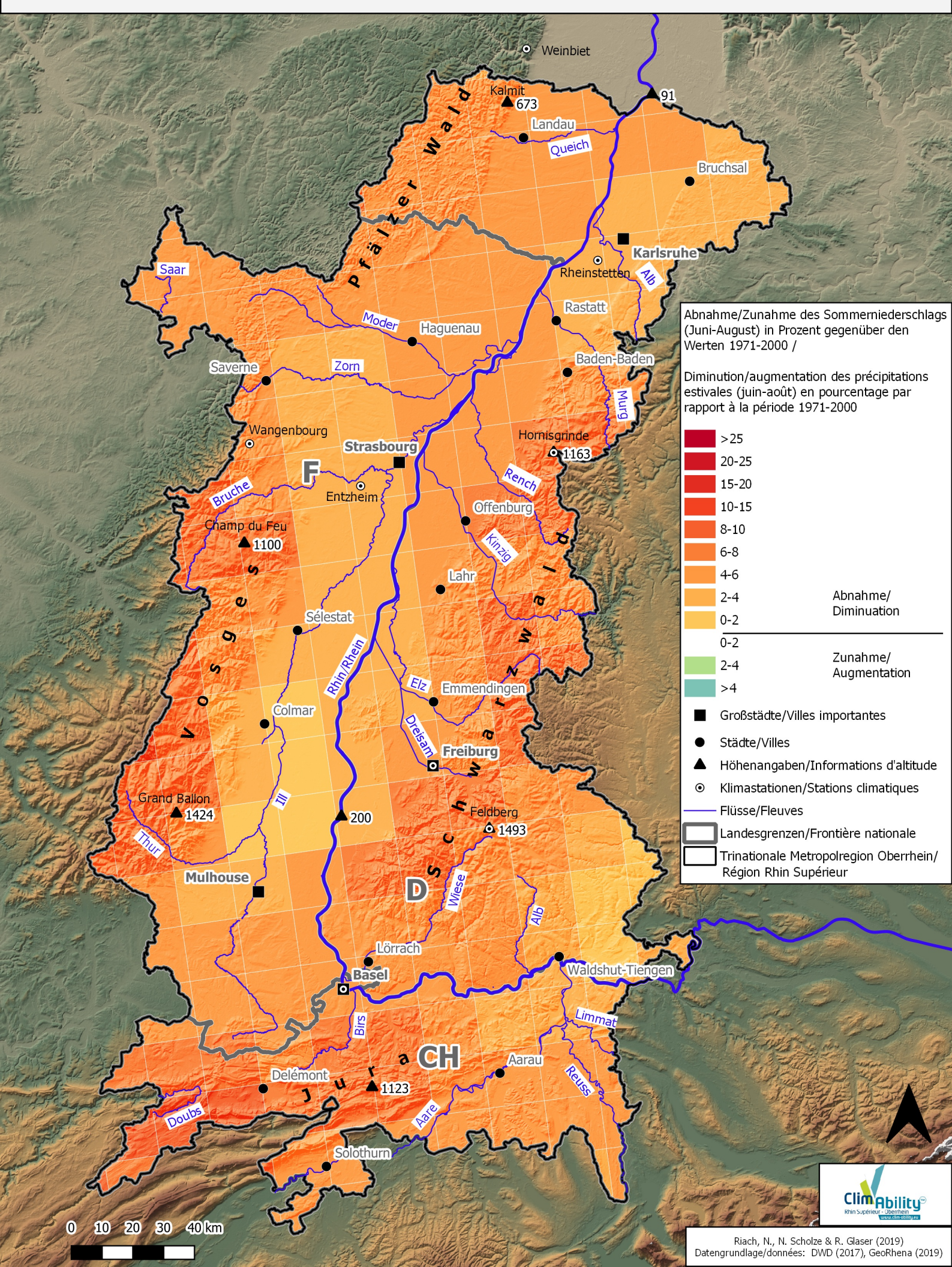
En outre, la **variabilité d'une année à l'autre** sera très élevée : il y aura toujours des étés humides, mais les périodes de sécheresse, voire de sécheresses extrêmes comme celles de 2003 et 2018, seront plus fréquentes, et dureront plus longtemps dans le futur. Des travaux scientifiques ont mis en évidence les signes d'une augmentation des situations de blocage sur l'Europe centrale,⁵ ce qui assure des conditions de haute pression stables avec un ensoleillement, des températures de l'air élevées et de très faibles précipitations. Des périodes estivales avec des situations dépressionnaires et des trajectoires de dépressions stables sur l'Europe occidentale pourront également augmenter, et occasionner des étés plus humides. Les valeurs moyennes de précipitations gommant ces disparités et diminuent faiblement, mais les années prises isolément pourront être plus extrêmes.⁶

Pour plus d'informations:

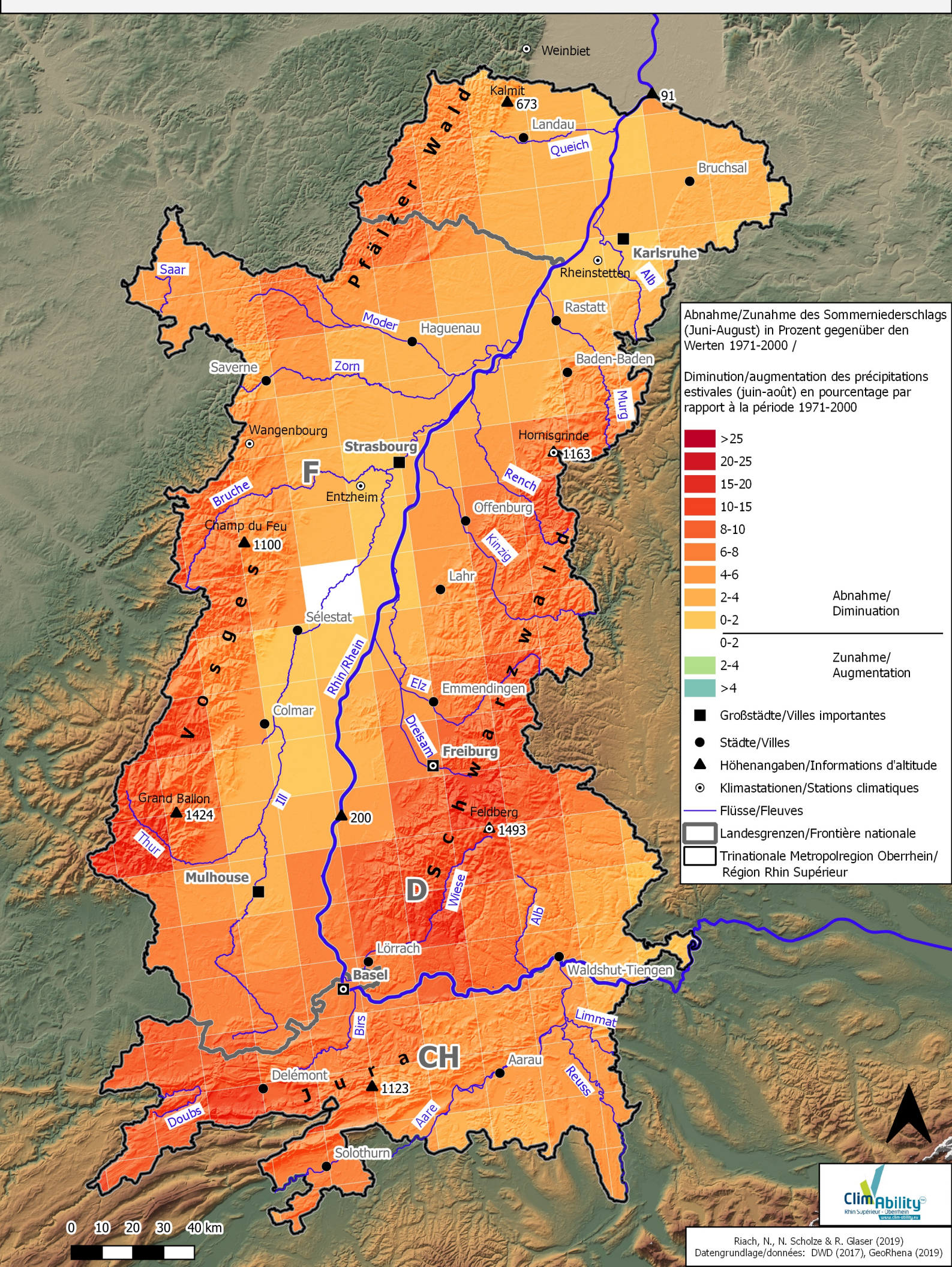
- Surveillance de la sécheresse du Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) avec des cartes actuelles de la situation de sécheresse en Allemagne : www.ufz.de/duerremonitor
- Situation actuelle de la sécheresse en France, publié par le Ministère du Développement Durable: <http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr>
- Situation actuelle de la sécheresse en Suisse, élaborée par le projet de recherche Drought-CH: www.trockenheit.ch

0. Les valeurs indiquées dans le tableau proviennent des sources suivantes et ont été partiellement calculées à partir de données brutes :
- pour les stations françaises : données officielles de Météo France
 - pour les stations allemandes : données officielles du Service météorologique allemand (DWD), disponibles en ligne sur le portail server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.pl
 - pour la station de Bâle-Binningen : données officielles de MétéoSuisse, disponibles en ligne sur le portail www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-indikatoren.html
1. Regionalverband Südlicher Oberrhein (2006): Regionale Klimaanalyse Oberrhein (REKLISO). Edité par E. Parlow (Université de Bale), D. Scherer et U. Fehrenbach (tous les deux TU Berlin).
 2. Très détaillé sur les impacts des sécheresses: Stahl K, Kohn I, Blauhut V, Urquijo J, de Stefano L, Acácio V, Dias S, Stagge JH, Tallaksen LM, Kampragou E, van Loon AF, Barker LJ, Melsen LA, Bifulco C, Musolino D, de Carli A, Massarutto A, Assimacopoulos D, Van Lanen H (2016): Impacts of European drought events - Insights from an international database of text-based report. In: Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 16, 801-819, <https://doi.org/10.5194/nhess-16-801-2016>
 3. Surveillance de la sécheresse du Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) : <https://www.ufz.de/index.php?de=37937> [18.07.2019]
 4. Valeurs des villes méditerranéennes de URL: climate-data.org/ [18.07.2019]
 5. Masato G, Hoskins BJ, Woollings T (2013): Winter and summer Northern Hemisphere blocking in CMIP5 models. J clim 26, S. 7044-7059. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00466.1
 6. Voir le portail Climat HD, <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>, onglets « précipitation » et « impacts »

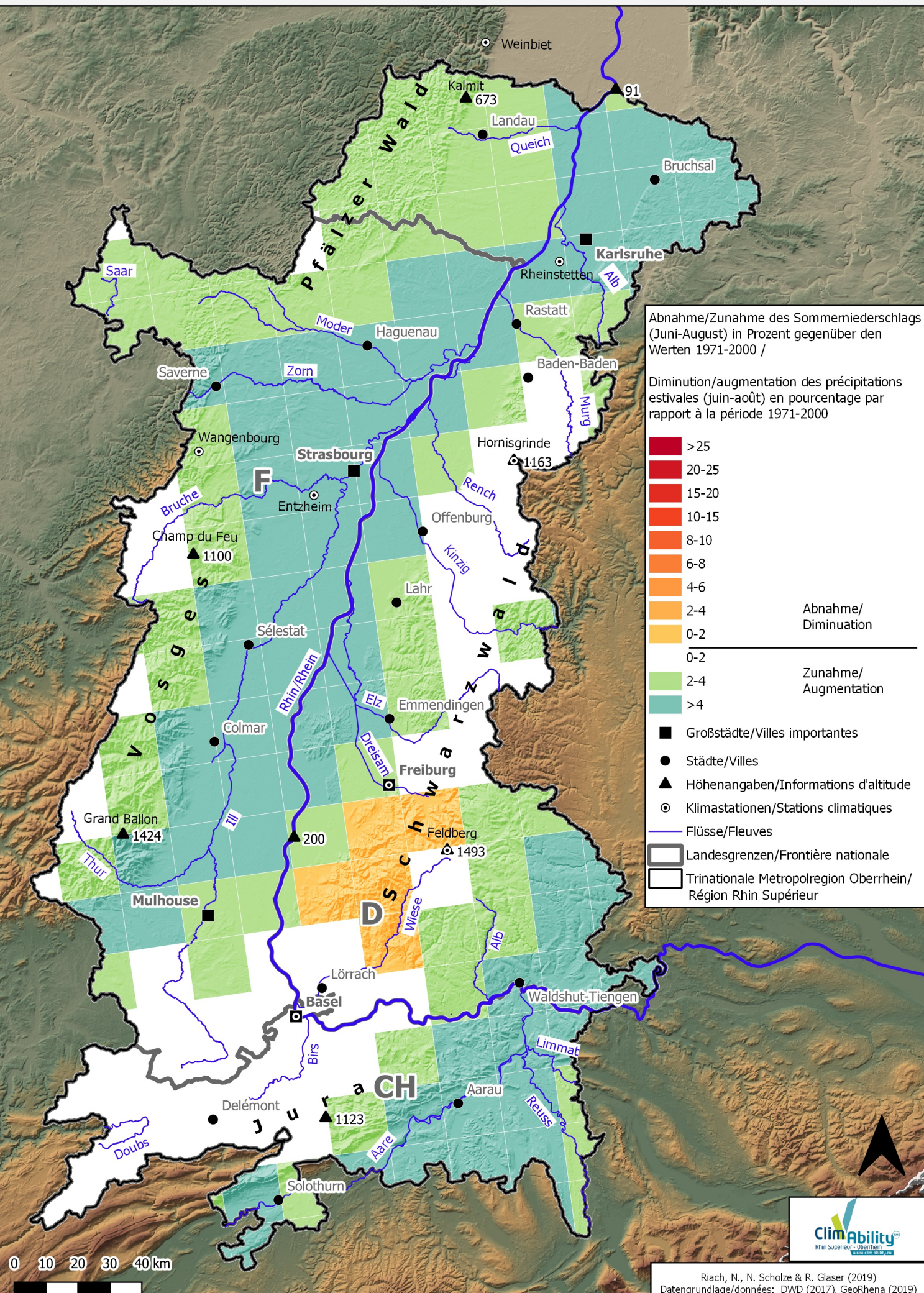
Moderater Klimawandel / Changement climatique modéré (RCP4.5) 2021-2050



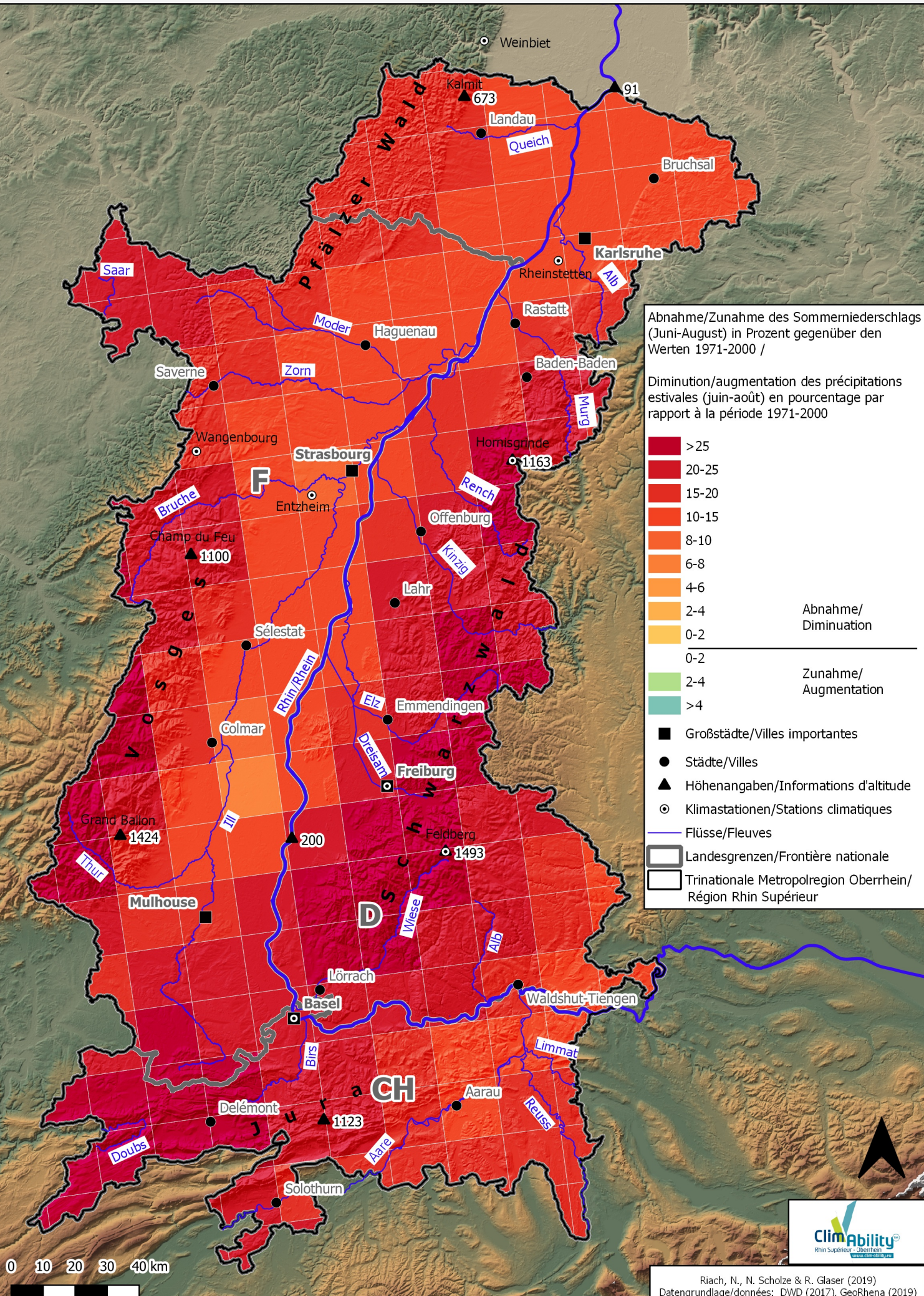
Moderater Klimawandel / Changement climatique modéré (RCP4.5) 2071-2100



Starker Klimawandel / Changement climatique fort (RCP8.5) 2021-2050



Starker Klimawandel / Changement climatique fort (RCP8.5) 2071-2100



Kapitel 5

Winterniederschlag und Hochwassergefahr

Unter **Winterniederschlag** versteht man den gesamten Niederschlag der Monate Dezember, Januar und Februar. In die Summe fließen alle Formen des Niederschlags ein, d.h. Regen, Schnee, Nebel, Hagel, Graupel, etc.

TABELLE: Langjährige Mittelwerte des Winterniederschlags an verschiedenen Stationen in der Oberrheinregion⁰

Ort	Niederschlag / mm	Periode	Höhe über NN in m
Karlsruhe-Rheinstetten	92,9	1971-1985	112
Straßburg-Entzheim	111	1971-2000	150
Freiburg	180,6	1971-2000	236
Basel-Binningen	154	1961-1990	316
Wangenbourg*	321	1990-2010	465
Weinbiet / Pfälzer Wald	133,3	1971-2000	553
Hornisgrinde	501,1	1971-2000	1.119
Feldberg / Schwarzwald	445,3	1971-2000	1.490

* Die Station Wangenbourg wurde erst im Mai 1990 eingerichtet.

Die Tabelle zeigt zunächst die **große Spannweite der Winterniederschläge** in der Region. Generell sind diese in den Mittelgebirgen sehr viel höher als in der Rheinebene. So verzeichnet die Wetterstation auf der Hornisgrinde im Nordschwarzwald mehr als 5 Mal so viel Winterniederschlag wie Karlsruhe-Rheinstetten. Dies liegt an den generell mit der Höhe zunehmenden Niederschlägen. Zudem bestehen jahreszeitliche Unterschiede in Bezug auf die Niederschlagsmaxima. Während das Maximum in der Rheinebene in die Sommermonate fällt, sind die Niederschläge in den Höhenlagen ganzjährig hoch, mit zwei leicht ausgeprägten Spitzen im Frühwinter (November bis Januar) und abgeschwächt im Frühsommer (Mai bis Juli). Die übrigen Monate sind etwas niederschlagsärmer, insbesondere der September.¹

Für die regional unterschiedlichen Niederschlagshöhen sind außerdem Luv-Lee-Effekte bedeutsam. Auf Grund der in unseren Breiten vorherrschenden Westlagen regnen sich Niederschläge meist in Staulagen an der Westseite von Gebirgen ab, während die östlich gelegenen Gebiete trockener bleiben. Das erklärt, warum die Gebiete in der Rheinebene unmittelbar östlich der Vogesen wie z. B. Straßburg-Entzheim geringere Niederschläge aufweisen als etwa Freiburg am Schwarzwaldwestrand, wo es bereits zu Stauniederschlägen kommt. Der niedrige Wert von Weinbiet resultiert ebenfalls aus seiner Leelage innerhalb des Pfälzer Waldes und steht im Kontrast zum hohen Wert von Wangenbourg, welches durch seine Luvlage in den Vogesen hohe Niederschläge erhält. Gleichzeitig führt die geringere Höhe

der Zabener Senke am Übergang von den Vogesen zum Pfälzerwald dazu, dass der Nord-schwarzwald höhere Niederschlagswerte erreicht als der Südschwarzwald.

Winterniederschlag und Hochwassergefahr

Winterniederschläge sind im Oberrheingebiet ein wichtiger Faktor für die Entstehung von **Hochwasser**. Zwar können Hochwasserereignisse das ganze Jahr über auftreten, jedoch liegt insbesondere bei den **Rhein-Nebenflüssen** aus Schwarzwald und Vogesen der Schwerpunkt auf winterlichen Hochwasserereignissen.

Ursache für winterliche Hochwasserereignisse ist meist eine Kombination aus Schneeschmelze infolge eines plötzlichen Temperaturanstiegs und zeitgleich ergiebigen Regenfällen. In den wassergesättigten Boden kann weder Schmelz- noch Niederschlagswasser versickern und es kommt zu stark erhöhten Abflussmengen. Insgesamt werden zwischen 35 und 50% der Hochwasser an den Nebenflüssen des Rheins durch derartige Regen-auf-Schnee-Ereignisse ausgelöst.² Daneben gibt es Hochwasserereignisse, die primär durch winterlichen Dauerregen verursacht werden. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass mehr als die Hälfte aller Hochwasser der Schwarzwald- und Vogesenflüsse in den Wintermonaten auftreten. Durch die prognostizierte Erhöhung der Winterniederschläge wird dieser Anteil in Zukunft noch steigen. Ein Indiz dafür ist, dass kleinere Hochwasser in den Wintermonaten in den südlichen Flussgebieten Baden-Württembergs seit den siebziger Jahren bereits zugenommen haben.³ Eine weitere Hochwasserursache bilden auf den Gewässern treibende Eisschollen, die sich z. B. an Brücken verkeilen und so das Wasser im Fluss aufstauen können. Dieser Eisgang spielt auf Grund zunehmend milderer Winter jedoch eine immer geringere Rolle, da es immer seltener zum Zufrieren von Flüssen kommt.

Der **(Ober-)Rhein** als größter und namensgebender Fluss der Region bildet dagegen einen **Sonderfall** in Bezug auf die Hochwassergefahr. Zum einen liegt sein Maximum der Hochwasserwahrscheinlichkeit nicht im Winter, sondern im **Frühsommer**, wenn die Schneeschmelze in den Alpen mit starken Niederschlägen im Voralpenraum zusammenfällt. Niederschläge in Schwarzwald und Vogesen können die Situation noch weiter verschärfen. Die Hochwassergefahr für den Oberrhein kann also durch den Winterniederschlag allein nicht umfassend abgebildet werden. Zum anderen sind die Rheinanlieger am südlichen Oberrhein zwischen Basel und Iffezheim durch die **Flussregulierung** mittels Staustufen und den Rheinseitenkanal vor Hochwassern bis zu 1.000-jähriger Wiederkehrzeit geschützt. Nördlich von Iffezheim bis Speyer besteht durch die dortigen Dämme heute hingegen nur noch ein Schutz gegen Hochwasser, wie sie sich statistisch ca. alle 120 Jahre auftreten.⁴ Der Schutz für die Anlieger des nördlichen Oberrheins wird sich in den nächsten Jahren durch die Maßnahmen des Integrierten Rheinprogramms schrittweise verbessern.

Insgesamt geht in der Trinationalen Metropolregion Oberrhein also von den kleineren Flüssen eine wesentlich größere Hochwassergefahr aus als vom Rhein selbst. Die nachfolgenden Karten können somit nur als Indikator für die winterliche Hochwassergefahr an den kleineren und mittleren Fließgewässern der Region interpretiert werden.

Zukünftige Entwicklung

Die Klimakarten zeigen, dass die Winterniederschläge in der gesamten Region **zwischen etwa 5 und 20% zunehmen** werden. Dabei gilt, dass der Winterniederschlag umso stärker zunimmt, je mehr der Klimawandel voranschreitet. So ist die prognostizierte Zunahme im starken Klimawandelszenario (RCP8.5) größer als im mittleren Szenario (RCP4.5), das gleiche gilt für die ferne Zukunft im Vergleich zur nahen Zukunft.

Die Prognosekarten zeigen auch eine regionale Differenzierung: in allen vier Karten befinden sich die höchsten Zunahmewerte im Einzugsgebiet von Hochrhein und Aare sowie in der Rheinebene, dort insbesondere westlich des Rheins. Es ist davon auszugehen, dass

in diesen Gebieten die winterlichen Abflüsse steigen werden und auch mit einer **potentiell höheren Hochwassergefahr** gerechnet werden muss. Weniger stark ansteigen werden die Niederschläge in den höheren Lagen des Schwarzwalds, der Vogesen und des Schweizer Jura, wobei zu beachten ist, dass dort die Winterniederschläge bereits sehr hohe Werte erreichen (vgl. Stationen Feldberg und Hornisgrinde). Die in den Hochlagen bereits recht häufig auftretenden winterlichen Hochwasserereignisse wie zuletzt etwa in Sankt Blasien / Mönchsband im Januar 2018 werden in Zukunft eher noch leicht zunehmen.

Höhere Niederschlagswerte in den Hochlagen bedeuten jedoch nicht, dass die Hochwassergefahr in den Tieflagen wesentlich geringer ist: Gerade während der Schneeschmelze oder niederschlagsreichen Perioden fließt ein Großteil des Wassers in den Flüssen bergab und kann somit in der Rheinebene oder den Talböden der Seitentäler für große Überschwemmungen sorgen, wie z. B. im Kinzigtal im Februar 1990 oder im Dreisamtal im Dezember 1991. Damit ist auch zukünftig zu rechnen.

Weitere Informationen:

Die für ein standortbezogenes Risikomanagement wichtigen Hochwassergefahrenkarten der Oberrheinregion sind abrufbar im Clim'Ability-Mapserver (gis.clim-ability.eu) und werden vorgehalten von:

- Baden-Württemberg: www.hochwasser.baden-wuerttemberg.de/hochwassergefahrenkarten
- Rheinland-Pfalz: <https://hochwassermanagement.rlp-umwelt.de/servlet/is/8662/>
- Elsass: <http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/le-risque-inondation-r6745.html> oder www.georisques.gouv.fr/cartes-interactives/
- Schweiz: Hochwasserrisiko allgemein www.hochwasserrisiko.ch/de
- Linksammlung zu den Schweizer Kantonen: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/fachinformationen/naturgefahrensituation-und-raumnutzung/gefahrengrundlagen/gefahrenkarten--intensitaetskarten-und-gefahrenhinweiskarten.html>

0. Die Werte wurden aus folgenden Quellen entnommen und z.T. aus Rohdaten berechnet:

- für die französischen Stationen: offizielle Messwerte von Météo France, freundlicherweise zur Verfügung gestellt von S. Roy
 - für die deutschen Stationen: offizielle Messwerte des Deutschen Wetterdienstes (DWD), online verfügbar über das Portal server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.p
 - für die Station Basel-Binningen: offizielle Daten von MeteoSchweiz, online verfügbar über das Portal www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-indikatoren.html
1. Regionalverband Südlicher Oberrhein (2006) (Hg.): Regionale Klimaanalyse Oberrhein (REKLISO). Bearbeitet von E Parlow (Universität Basel), D Scherer und U Fehrenbach (beide TU Berlin).
 2. Himmelsbach I, Glaser R, Schönbein J, Riemann D, Martin B (2015): Flood risk along the upper Rhine since AD 1480, in: Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 12, 177–211. doi: 10.5194/hessd-12-177-2015.
 3. Umweltbundesamt (2011): Hochwasser. Verstehen, erkennen, handeln! Erarbeitet von C Baumgarten, E Christiansen, S Naumann, G Penn-Bressel, J Rechenberg, AB Walter; Dessau-Roßlau, 80 Seiten URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba_hochwasser_barrierefrei_new.pdf [18.07.2019]
 4. Regierungspräsidien Baden-Württemberg (o. Jahresangabe): Themenportal Wasser und Boden – Integriertes Rheinprogramm, URL: <https://rp.baden-wuerttemberg.de/Themen/WasserBoden/IRP/Seiten/FuA-IRP-WeitereFragen2.aspx> [18.07.2019]

Chapitre 6

Les précipitations hivernales et le risque d'inondation

Les **précipitations hivernales** désignent l'ensemble des précipitations des mois de décembre, janvier et février. Toutes les formes de précipitations (pluie, brouillard, grêle, grésil, etc.) entrent dans ce cumul.

TABLEAU: Normales de précipitations estivales dans différentes stations de mesure du Rhin supérieur: ⁰

Lieu	Précipitation en mm	Période	Altitude en m
Karlsruhe-Rheinstetten	92,9	1971-2000	112
Strasbourg-Entzheim	111	1971-2000	150
Freiburg	180,6	1971-2000	236
Bâle-Binningen	154	1961-2009	316
Wangenbourg*	321	1991-2010	465
Weinbiet / Pfälzer Wald	133,3	1971-2000	553
Hornisgrinde	501,1	1971-2000	1.119
Feldberg / Schwarzwald	445,3	1971-2000	1.490

* La station de Wangenbourg n'a ouvert qu'en mai 1990.

Le tableau montre d'abord une **grande variété de précipitations hivernales** dans le Rhin supérieur. De manière générale, elles sont beaucoup plus importantes en altitude qu'en plaine. La station météorologique de Hornisgrinde, dans le nord de la Forêt-Noire, enregistre ainsi 5 fois plus de précipitations hivernales que Karlsruhe-Rheinstetten. Ceci est dû, d'une part à l'augmentation générale des précipitations avec l'altitude, et d'autre part aux différences saisonnières. Alors que dans la vallée rhénane, les précipitations maximales tombent majoritairement pendant les mois d'été, en altitude elles sont importantes toute l'année, avec deux pics un peu plus prononcés durant les périodes de novembre à janvier et de mai à juillet. Le reste de l'année est légèrement moins pluvieux.¹

La position au vent et sous le vent est également significative dans la compréhension des différences de hauteurs de précipitations. Avec la prédominance des flux d'ouest, les précipitations tombent essentiellement sur les versants ouest des reliefs en raison du soulèvement orographique, tandis que les régions orientales restent plus sèches. C'est l'effet de foehn. C'est pourquoi la plaine du Rhin située immédiatement à l'est du massif vosgien, comme Strasbourg-Entzheim, enregistre des précipitations plus faibles que par exemple, Fribourg-en-Brigau, en bordure de la Forêt Noire, où les précipitations sont déjà orographiques. La faible valeur de Weinbiet (553m) s'explique aussi par son emplacement sous le vent de la forêt Palatine. La faible hauteur du col de Saverne, à la transition entre massif vosgien et massif palatin, explique pourquoi le nord de la Forêt Noire a des précipitations

plus importantes que le sud de la Forêt Noire.

Précipitations hivernales et risques d'inondation

Dans la région du Rhin Supérieur, les précipitations hivernales sont un facteur important pour les **inondations**. Bien que des inondations puissent se produire tout au long de l'année, les inondations hivernales touchent particulièrement les **affluents du Rhin** venant de la Forêt-Noire et des Vosges. Les inondations hivernales sont souvent causées par une fonte nivale due à une hausse soudaine de température, généralement accompagnée de fortes pluies. L'eau issue de la fonte et des précipitations ne peut s'infiltrer dans les sols saturés, ce qui entraîne une augmentation considérable du ruissellement. Au total, entre 35 et 50 % des inondations des affluents du Rhin sont dues à ces pluies sur sol gelé.² Mais, il existe également des inondations qui sont causées par des pluies hivernales continues. Dans l'ensemble, on peut considérer que plus de la moitié des inondations des rivières de Forêt-Noire et des Vosges se produisent durant les mois d'hiver. Avec l'augmentation prévue des précipitations hivernales cette proportion augmentera encore à l'avenir. En témoigne déjà le fait que depuis les années 70, les petites inondations des bassins versants méridionaux du Bade-Wurtemberg se soient déjà multipliées durant les mois d'hiver.³

Une autre cause d'inondation est la présence de blocs de glaces flottants, qui peuvent s'accumuler au niveau des ponts, et ainsi faire monter le niveau d'eau des rivières. Cependant, en raison d'hivers de plus en plus doux, les rivières gèlent plus rarement et ce phénomène de débâcle de glace joue donc un rôle de plus en plus mineur.

Le **Rhin (supérieur)**, fleuve le plus grand et éponyme de la région, est un cas particulier pour le risque d'inondation. D'une part, sa probabilité maximale d'inondation n'est pas en hiver, mais au début de l'été, lorsque la fonte des neiges dans les Alpes coïncide avec de fortes précipitations sur les contreforts des Alpes. Des précipitations en Forêt-Noire et dans les Vosges peuvent encore aggraver la situation. Le risque d'inondation pour le Rhin supérieur ne peut donc être représenté par le seul indicateur des précipitations hivernales. D'autre part, les zones voisines du Rhin entre Bâle et Iffezheim sont protégées des crues millénaires par des **éléments de régulation** tels des barrages, ou le canal du Rhin. Au nord d'Iffezheim jusqu'à Spire, les barrages ne protègent aujourd'hui que contre les crues avec une période de retour de 120 ans.⁴ Le Programme Intégré Rhin (PIR) du Bade-Wurtemberg vise à améliorer progressivement la protection de ces zones voisines du Rhin supérieur au nord.

Dans l'ensemble, les petits cours d'eau de la région du Rhin supérieur présentent un risque d'inondation beaucoup plus élevé que le Rhin lui-même. Les cartes suivantes ne peuvent donc être interprétées que comme un indicateur du risque d'inondation hivernal sur les petits et moyens cours d'eau de la région.

Évolution en climat futur

Les cartes climatiques montrent que les **précipitations hivernales augmenteront de 5 à 20%** dans l'ensemble de la région. On peut en effet considérer qu'elles augmentent proportionnellement au changement climatique. Ainsi, l'augmentation prévue dans le scénario de changement climatique fort (RCP8.5) est plus importante que dans le scénario moyen (RCP4.5), et il en va de même dans un avenir lointain par rapport à un avenir proche.

Les cartes des projections climatiques présentent également une différenciation régionale : les quatre cartes montrent les plus fortes augmentations dans le bassin-versant du Rhin en amont de Bâle et de l'Aar, ainsi que dans la plaine du Rhin, en particulier à l'ouest. On peut supposer que l'écoulement hivernal augmentera dans ces zones, dans lesquelles il faut également s'attendre à un **risque d'inondation potentiellement plus élevé**. Les précipitations augmenteront moins fortement sur les sommets de la Forêt Noire, des Vosges et du Jura

suisse, même s'il faut noter que les précipitations hivernales y atteignent déjà des niveaux très élevés (cf. stations du Feldberg et du Hornisgrinde). Les inondations hivernales qui se produisent déjà assez fréquemment en altitude, comme récemment à Sankt Blasien / Menezschwand en janvier 2018, auront donc tendance à augmenter légèrement dans le futur.

Cependant, des précipitations plus élevées en altitude ne signifient pas que le risque d'inondation est plus faible à une altitude moindre : lors de la fonte des neiges, ou lors des périodes de fortes précipitations, une grande partie de l'eau s'écoule en aval des rivières, et peut donc provoquer des inondations importantes dans la plaine du Rhin ou au fond des vallées latérales, comme c'était le cas dans le Kinzigtal en février 1990 ou dans le Dreisamtal en décembre 1991. Il faut également se préparer à ce phénomène à l'avenir.

Plus d'informations:

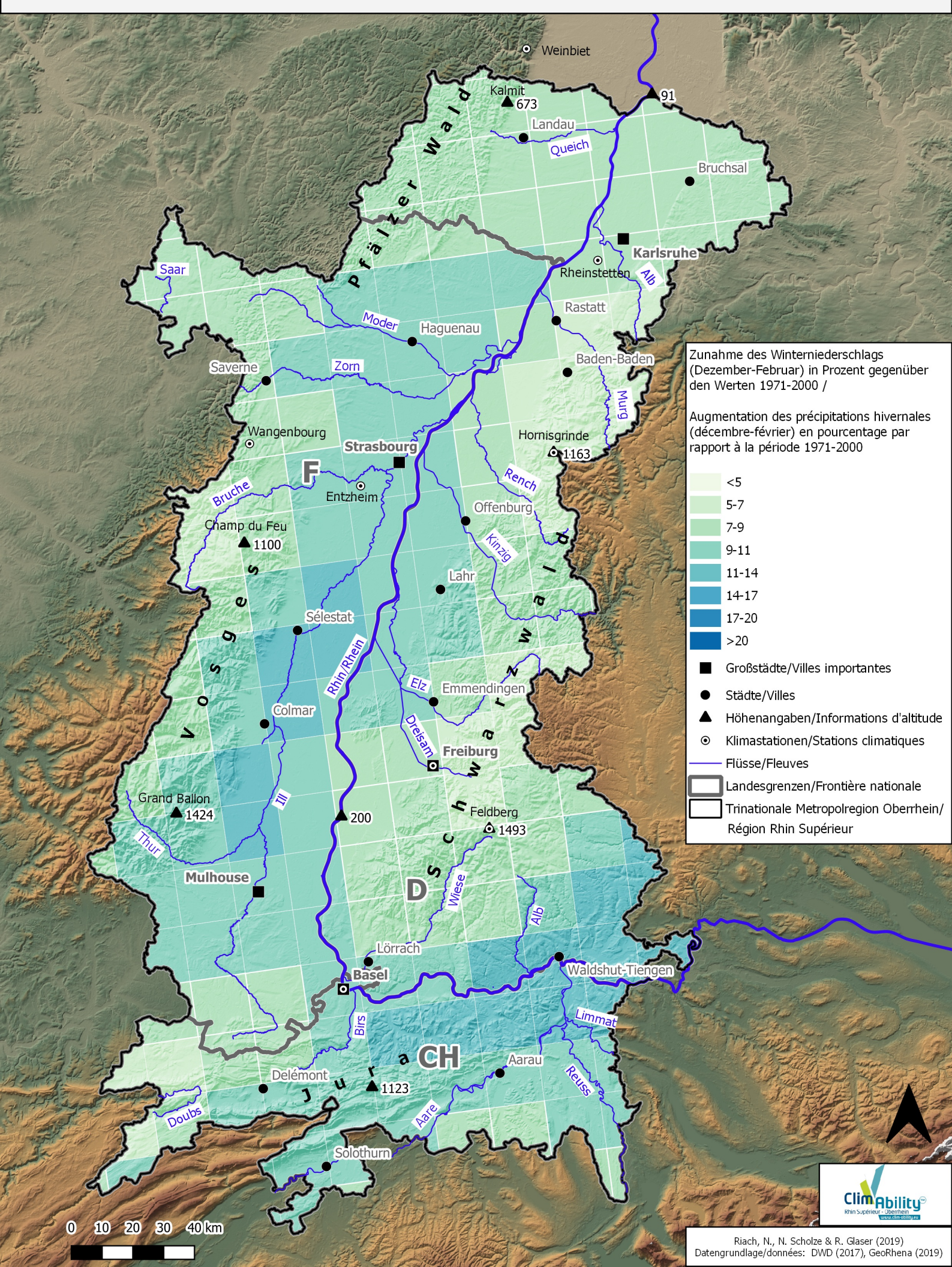
Les cartes des risques d'inondation du Rhin supérieur, qui sont importantes pour la gestion des risques spécifiques aux sites, peuvent être téléchargées sur le serveur de cartes Clim'Ability (gis.clim-ability.eu) et sont maintenues par :

- Bade-Württemberg: www.hochwasser.baden-wuerttemberg.de/hochwassergefahrenkarten
- Rhénanie-Palatinat: <https://hochwassermanagement.rlp-umwelt.de/servlet/is/8662/>
- Alsace: <http://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/le-risque-inondation-r6745.html>. oder www.georisques.gouv.fr/cartes-interactives/
- Suisse : Risque d'inondation général www.hochwasserrisiko.ch/de
- Liens vers les cantons suisses: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/fachinformationen/naturgefahrensituation-und-raumnutzung/gefahrengrundlagen/gefahrenkarten--intensitaetskarten-und-gefahrenhinweiskarten.html>

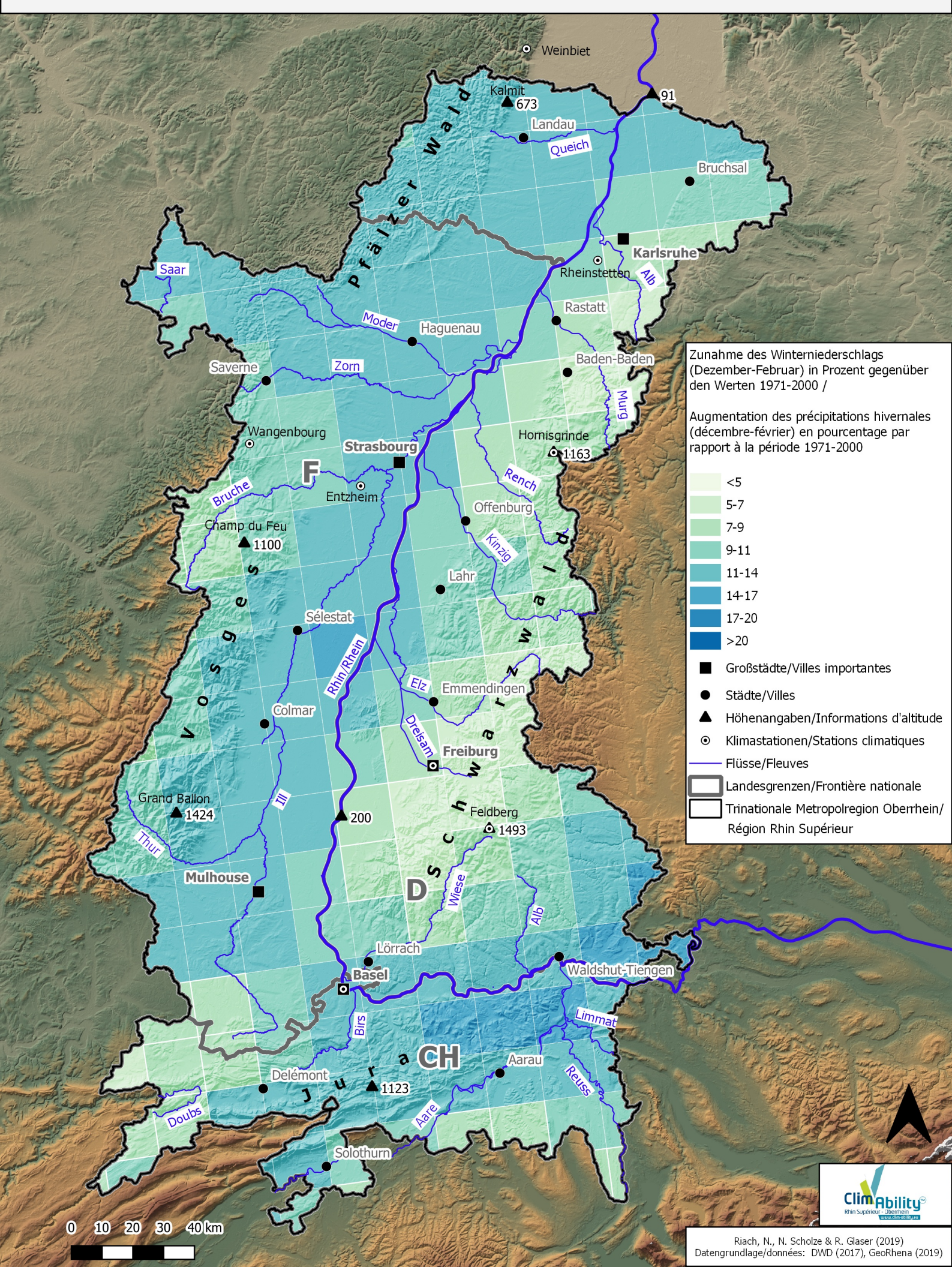
0. Les valeurs indiquées dans le tableau proviennent des sources suivantes et ont été partiellement calculées à partir de données brutes :

- pour les stations françaises : données officielles de Météo France
 - pour les stations allemandes : données officielles du Service météorologique allemand (DWD), disponibles en ligne sur le portail server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.pl
 - pour la station de Bâle-Binningen : données officielles de MétéoSuisse, disponibles en ligne sur le portail www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-indikatoren.html
1. Regionalverband Südlicher Oberrhein (2006): Regionale Klimaanalyse Oberrhein (REKLISO). Edité par E. Parlow (Université de Bale), D. Scherer et U. Fehrenbach (tous les deux TU Berlin).
 2. Himmelsbach I, Glaser R, Schönbein J, Riemann D, Martin B (2015): Flood risk along the upper Rhine since AD 1480, dans: Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 12, 177–211. doi: 10.5194/hessd-12-177-2015
 3. Ministère fédéral de l'environnement (=Umweltbundesamt) (2011): Hochwasser. Verstehen, erkennen, handeln! Edité par C Baumgarten, E Christiansen, S Naumann, G Penn-Bressel, J Rechenberg, AB Walter, Dessau-Roßlau, 80 pages. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/uba_hochwasser_barrierefrei_new.pdf [18.07.2019]
 4. Conseil régional du Bade-Wurttemberg (sans année): Portail thématique eau et sol – Le Programme Intégré Rhin, URL: <https://rp.baden-wuerttemberg.de/Themen/WasserBoden/IRP/Rueckhalteraum/irp-fr.pdf> [18.07.2019]

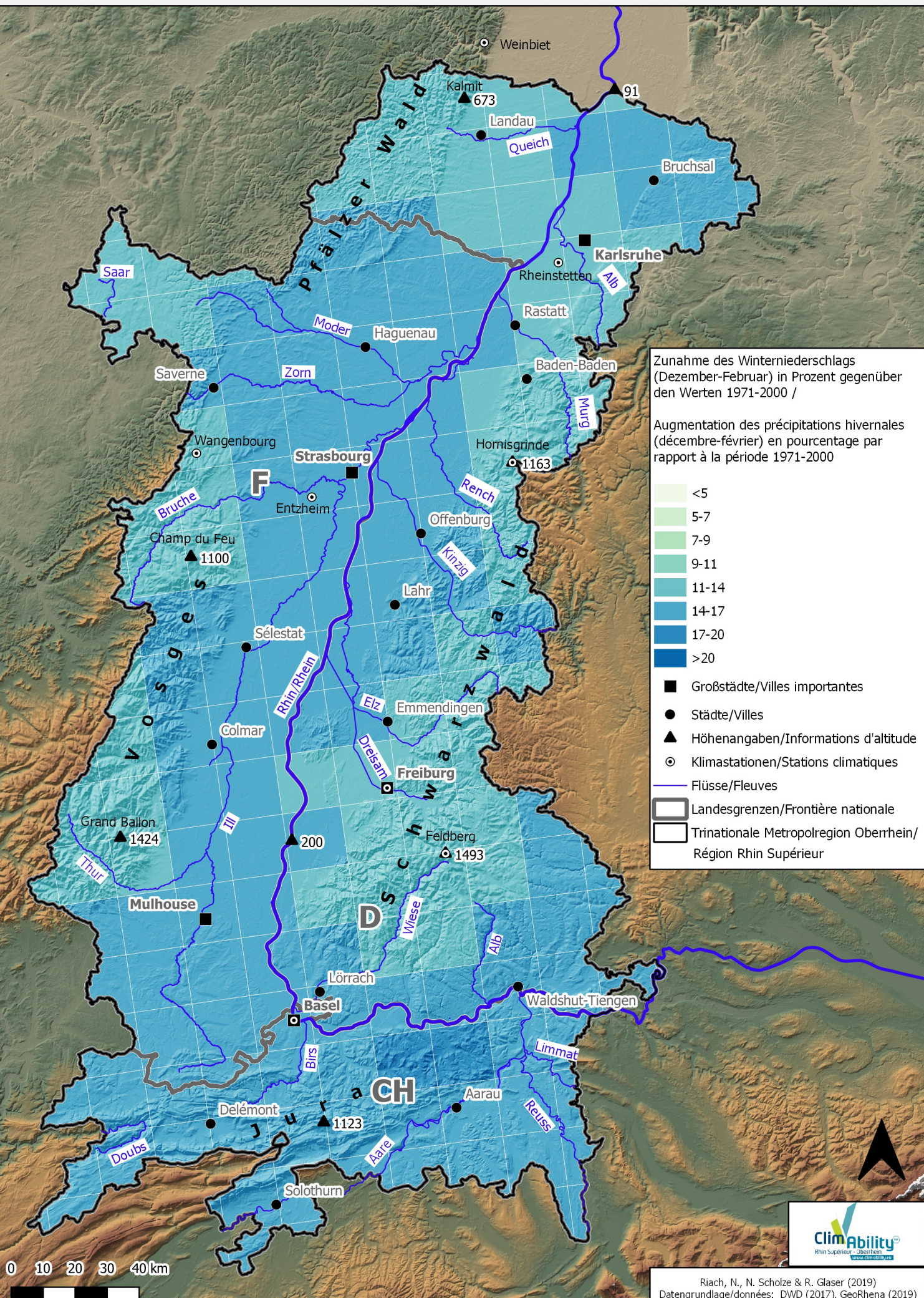
Moderater Klimawandel / Changement climatique modéré (RCP4.5) 2021-2050



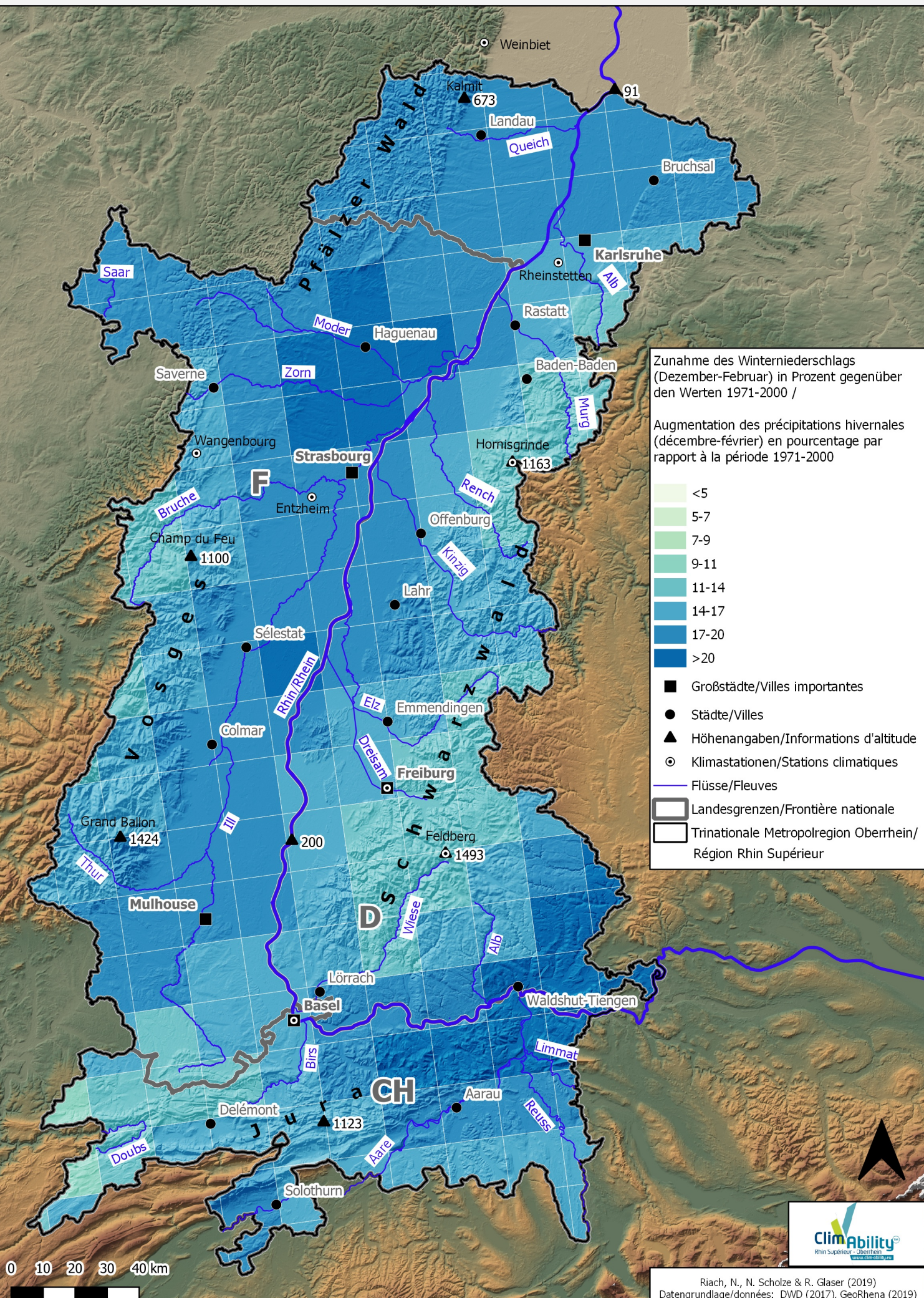
Moderater Klimawandel / Changement climatique modéré (RCP4.5) 2071-2100



Starker Klimawandel / Changement climatique fort (RCP8.5) 2021-2050



Starker Klimawandel / Changement climatique fort (RCP8.5) 2071-2100



Kapitel 7

Starkregen

Grundsätzlich versteht man unter **Starkregen** eine außergewöhnlich hohe Niederschlagsmenge innerhalb kurzer Zeit, wobei es sowohl für die Niederschlagsmenge als auch die Zeitspanne unterschiedliche Festlegungen gibt. Im vorliegenden Fall bezeichnet Starkregen ein Ereignis, bei dem an einem Tag eine Niederschlagsmenge von mehr als 20 mm pro m² fällt, was einer Wassersäule von 20 mm entspricht.

Starkregen kann lokal begrenzt und mit sehr kurzer Vorwarnzeit zu **verheerenden Überschwemmungen** führen. Wenn eine hohe Niederschlagsmenge von den Böden nicht aufgenommen werden kann, verwandeln sich selbst harmlose Bäche innerhalb kürzester Zeit in reißende Ströme, treten über die Ufer und führen zu verheerenden Zerstörungen, wie z. B. infolge eines Sommergewitters im baden-württembergischen Braunsbach 2016. Da bei Starkregenereignissen das Wasser häufig gar nicht bis in die Vorfluter gelangt, sind auch nicht an Fließgewässern gelegene Gebiete von den Gefahren betroffen. In Städten und Dörfern führt Starkregen zu Überschwemmungen, z. B. von Straßen, Unterführungen, Tiefgaragen, Kellern, etc.. Durch das schnell strömende Wasser besteht hier in Extremfällen Gefahr für Leib und Leben. In hügeligem Terrain kann wild abfließendes Hangwasser eine weitere Gefahr darstellen. Auch Bodenerosion, Hangrutschungen und Schlammlawinen treten häufig bei Starkregen auf und gefährden hangabwärts gelegene Gebiete. Insgesamt ist das reißend abfließende Wasser durch ein hohes Zerstörungspotential gekennzeichnet, da es auch schwere Gegenstände wie Autos, Baumaschinen, etc. mit sich führt sowie große Mengen an Geröll erodiert und verlagert.

TABELLE: Langjährige Mittelwerte der Tage mit Starkregen an verschiedenen Stationen in der Oberrheinregion⁰

Ort	Tage / Jahr	Periode	Höhe über NN in m
Karlsruhe Rheinstetten	6,8	1971-2000	112
Straßburg-Entzheim	3,4	1971-2000	150
Freiburg	7,2	1971-2000	236
Basel-Binningen	5,7	1961-2009	316
Wangenbourg*	11	1991-2010	465
Weinbiet / Pfälzer Wald	2,2	1971-2000	553
Hornisgrinde	28,8	1971-2000	1.119
Feldberg / Schwarzwald	22,7	1971-2000	1.490

* Die Station Wangenbourg wurde erst im Mai 1990 eingerichtet.

Die Tabelle zeigt, dass sich die **Anzahl der Tage mit Starkregen regional stark unterscheidet**. Werden in der Rheinebene durchschnittlich etwa 3 bis 7 Ereignisse registriert, sind es auf den Schwarzwaldgipfeln rund 3 bis 10 mal so viele. Ähnliches gilt auch für die Vogesen und den Schweizer Jura. In Leelagen wie z. B. Weinbiet im Pfälzer Wald liegt der Wert

nochmals deutlich niedriger als in der Rheinebene, weil sich die meist von Westen kommenden Niederschlagsfronten an der Westseite der Mittelgebirge abregnen und die Ostseiten durch diesen Föhn-Effekt wesentlich trockener bleiben. Ähnlich niedrige Werte treten auch am Ostrand der Vogesen auf, z. B. rund um Colmar. Zudem schwankt die jährliche Anzahl der Tage mit Starkregen stark, etwa an der Station Straßburg-Entzheim zwischen 1 und 7 Tagen pro Jahr oder in Basel-Binningen zwischen 2 und 12 Tagen pro Jahr (je 1971-2000).

Zukünftige Entwicklung

Grundsätzlich gilt, dass die Wasseraufnahmekapazität der Atmosphäre bei höheren Temperaturen zunimmt, je 1 Grad Temperaturzunahme um ca. 7% (Clausius-Clapeyron-Gleichung). Dieser physikalische Zusammenhang macht einen **Anstieg von Extremniederschlägen bei fortschreitender Erwärmung** wahrscheinlich. Der Effekt ist bereits für die jüngste Vergangenheit nachweisbar. So gibt der Deutsche Wetterdienst an, dass die Zahl der Tage mit hohen Niederschlägen in Deutschland im Zeitraum 1951-2006 insgesamt zugenommen hat, und zwar in allen Regionen. Am stärksten fällt die Zunahme im Winter mit 25% aus. Frühling und Herbst weisen einen leicht ansteigenden Trend auf, für die Sommermonate ist ein Anstieg hingegen nicht nachweisbar.¹

Aus den hier vorliegenden Klimakarten geht hervor, dass auch in der Oberrheinregion das Risiko von Extremniederschlägen in Zukunft steigen wird, wobei es regionale Unterschiede gibt. So muss vor allem in den Höhenlagen des Schwarzwaldes und der Vogesen sowie an Hochrhein und Aare **in Zukunft mit mehr Starkregentagen** gerechnet werden. In weiten Teilen der Rheinebene, besonders östlich des Rheins, fällt die Zunahme wesentlich geringer aus. Insgesamt ist der erwartete Anstieg zwar nicht besonders hoch (1 – max. 5 Tage pro Jahr, je nach Szenario und Zeithorizont), jedoch ist zu bedenken, dass bereits ein einziges Starkregenereignis katastrophale Folgen haben kann. Ebenso gilt, dass Starkregen am Oberlauf kleinerer Bäche auch tiefer gelegene Orte am Unterlauf gefährden kann. Eine solche Disposition ist z. B. am Schwarzwaldwestrand oder am Vogesenoststrand gegeben. Außerdem fällt auf, dass die Zunahme im starken Klimawandelszenario (RCP8.5) stärker ist als im moderaten Szenario (RCP4.5) und dass in keiner der 4 Karten ein Rückgang der Starkregenereignisse prognostiziert wird. Die Zunahme der Starkregentage wird v.a. in den Herbst-, Winter- und Frühjahrsmonaten stattfinden, die bislang wenig davon betroffen sind.

Alles in allem ist davon auszugehen, dass Starkregenereignisse und die damit verbundenen Gefahren in der Oberrheinregion in Zukunft zunehmen werden, sodass es sinnvoll erscheint, vorhandene **Anpassungsmaßnahmen** auszubauen und neue zu entwickeln.

0. Die Werte wurden aus folgenden Quellen entnommen und z.T. aus Rohdaten berechnet:

- für die französischen Stationen: offizielle Messwerte von Météo France, freundlicherweise zur Verfügung gestellt von S. Roy
- für die deutschen Stationen: offizielle Messwerte des Deutschen Wetterdienstes (DWD), online verfügbar über das Portal server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.p
- für die Station Basel-Binningen: offizielle Daten von MeteoSchweiz, online verfügbar über das Portal www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-indikatoren.html

1. Zur Entwicklung von Starkregen im Klimawandel:

- Becker, P., A. Becker, C. Dalelane, Th. Deutschländer, Th. Junghänel und A. Walter (2016): Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland. Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20160719_entwicklung_starkniederschlag_deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [18.07.2019]
- Berg, P., C. Moseley und J.O. Haerter (2013): Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. Nature Geoscience, 6(3), <http://www.nature.com/ngeo/journal/v6/n3/full/ngeo1731.html>. [18.07.2019]
- DWD (2016): Nationaler Klimareport 2016. 2. korrigierte Auflage, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 44 Seiten.
- Kunz, M., Mohr, S. und Werner, P. (2017): Niederschlag. In: Guy Brasseur, Daniela Jacob, Susanne Schuck-Zöller (Hrsg.), Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin Heidelberg, S. 57-66. DOI 10.1007/978-3-662-50397-3_7

Chapitre 8

Les pluies intenses

Par **pluies intenses**, on désigne une quantité inhabituellement élevée de précipitations sur une courte période de temps. Dans le cas présent, une pluie intense est un événement durant lequel plus de 20 litres de précipitations par m² tombent en une journée, ce qui correspond à une colonne d'eau de 20 mm.

Les pluies intenses peuvent provoquer localement des **inondations dévastatrices**, et cela avec des délais d'alerte très courts. En effet, si une part importante des précipitations ne peut pas être absorbée par le sol, même des cours d'eau inoffensifs peuvent très rapidement se transformer en de véritables torrents, débordant de leurs berges, et provoquant des destructions importantes, comme par exemple lors de l'orage estival de Braunsbach en 2016 dans le Bade-Wurtemberg. Comme l'eau n'atteint pas immédiatement les cours d'eau récepteurs lors de ces pluies intenses, les zones situées hors des cours d'eau peuvent également être mises en danger. Dans les villes et les villages, les pluies intenses provoquent donc des inondations sur les routes, les passages souterrains, les parkings souterrains, les caves, etc. Dans des cas extrêmes, l'écoulement rapide de l'eau dû à des pluies intenses peut être un danger mortel. En terrain vallonné, dans les zones en pente, d'autres dangers menacent : érosion des sols, glissements de terrain, coulées de boue. Dans l'ensemble, l'écoulement rapide de l'eau se caractérise par un potentiel de destruction élevé, car elle transporte également des objets lourds tels que des voitures, des engins de construction, etc. et érode et déplace de grandes quantités de débris.

TABLEAU: Normales du nombre de jours de pluies intenses dans différentes stations de mesure du Rhin supérieur: ⁰

Lieu	Jours / an	Période	Altitude en m.
Karlsruhe-Rheinstetten	6,8	1971-2000	112
Strasbourg-Entzheim	3,4	1971-2000	150
Freiburg	7,2	1971-2000	236
Bâle-Binningen	5,7	1961-2009	316
Wangenbourg*	11	1991-2010	465
Weinbiet / Pfälzer Wald	2,2	1971-2000	553
Hornisgrinde	28,8	1971-2000	1.119
Feldberg / Schwarzwald	22,7	1971-2000	1.490

* La station de Wangenbourg n'a ouvert qu'en mai 1990.

Le tableau montre que le nombre de **jours de pluies intenses varie considérablement** d'une région à l'autre. Si en moyenne 3 à 7 événements sont enregistrés dans la vallée du Rhin, le nombre d'événements sur les sommets de la Forêt-Noire ou dans le massif vosgien est 3 à 10 fois plus élevé. Dans les zones sous le vent, comme par exemple à Weinbiet dans le Palatinat, la valeur est nettement inférieure à celle de la vallée du Rhin, car les fronts pluvieux viennent principalement de l'ouest, donc à l'ouest des reliefs, et subissent l'effet

de foehn en s'asséchant au passage du relief. On mesure également des valeurs aussi basses pour les zones situées à l'est des Vosges, comme par exemple autour de Colmar. Le nombre de jours de pluies intenses par an peut fortement varier d'une année à l'autre. A Strasbourg-Entzheim par exemple, il varie de 1 à 7 jours par an sur la période 1971-2000, à Bâle-Binningen il se situe entre 2 et 12 jours par an.

Évolution en climat futur

La capacité d'absorption en vapeur d'eau de l'atmosphère augmente d'environ 7 % par degré d'augmentation de la température (loi de Clausius-Clapeyron). Cette loi physique rend très probable une **augmentation des précipitations extrêmes** à mesure que le réchauffement progresse. Ceci a notamment été prouvé récemment par le Service météorologique allemand qui a signalé que le nombre de jours avec de fortes précipitations en Allemagne a augmenté globalement sur la période 1951-2006, et ce dans toutes les régions. La plus forte augmentation a été enregistrée en hiver, avec + 25 %. Le printemps et l'automne montrent une plus légère tendance à la hausse, alors qu'il n'y a aucun signe d'augmentation durant les mois d'été.¹

Les cartes climatiques disponibles ici montrent que le risque de précipitations extrêmes augmentera également à l'avenir dans le Rhin supérieur, bien qu'il existe des différences régionales. On peut s'attendre à **plus de jours de pluies intenses** sur les sommets de la Forêt-Noire et des Vosges, ainsi que sur la zone Constance-Bâle, et l'Aar. Dans une grande partie de la vallée du Rhin, en particulier à l'est du Rhin, l'augmentation est beaucoup plus faible. Dans l'ensemble, l'augmentation attendue n'est pas particulièrement élevée (1 à 5 jours par an selon le scénario et l'horizon temporel), mais il faut garder à l'esprit qu'une seule pluie intense peut avoir des conséquences catastrophiques. Des pluies intenses dans la partie supérieure des petits cours d'eau peuvent également mettre en danger les tronçons inférieurs. Une telle situation existe par exemple dans la partie occidentale de la Forêt Noire, et orientale des Vosges. Il est également à noter que l'augmentation des précipitations pour le scénario de changement climatique fort (RCP8.5) est supérieure à celle prévue pour le scénario modéré (RCP4.5), et qu'aucune des quatre cartes ne prévoit une diminution des pluies intenses. L'augmentation des jours de pluies intenses se produira principalement en automne, en hiver et au printemps, qui ont été jusqu'à présent peu touchés.

Dans l'ensemble, on peut supposer que les événements de pluies intenses, et les dangers qui en découlent dans le Rhin supérieur augmenteront dans le futur. Il serait donc raisonnable d'étendre les **dispositifs d'adaptation** existants, et d'en développer de nouveaux.

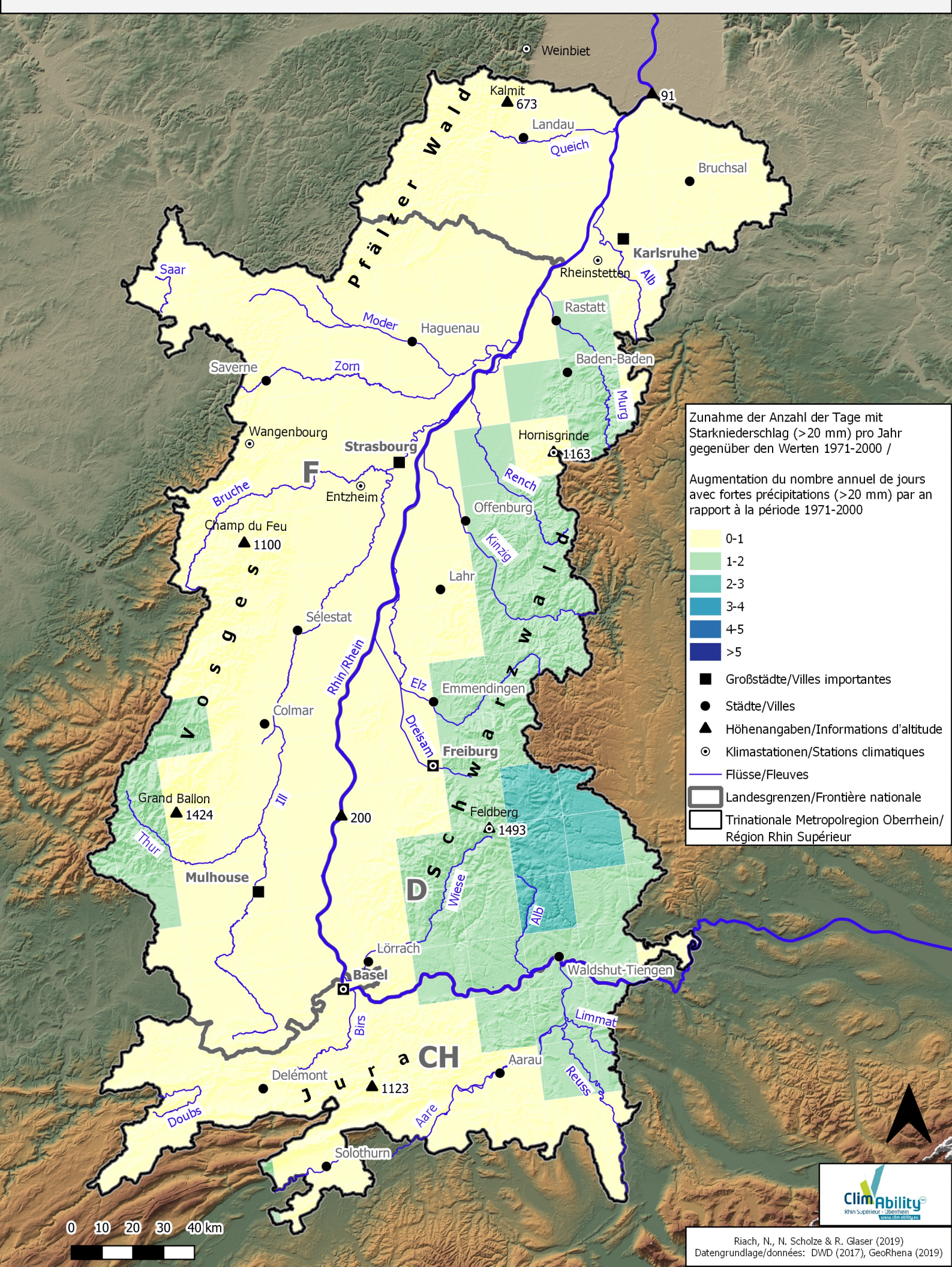
0. Les valeurs indiquées dans le tableau proviennent des sources suivantes et ont été partiellement calculées à partir de données brutes :

- pour les stations françaises : données officielles de Météo France
- pour les stations allemandes : données officielles du Service météorologique allemand (DWD), disponibles en ligne sur le portail server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.pl
- pour la station de Bâle-Binningen : données officielles de MétéoSuisse, disponibles en ligne sur le portail www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-indikatoren.html

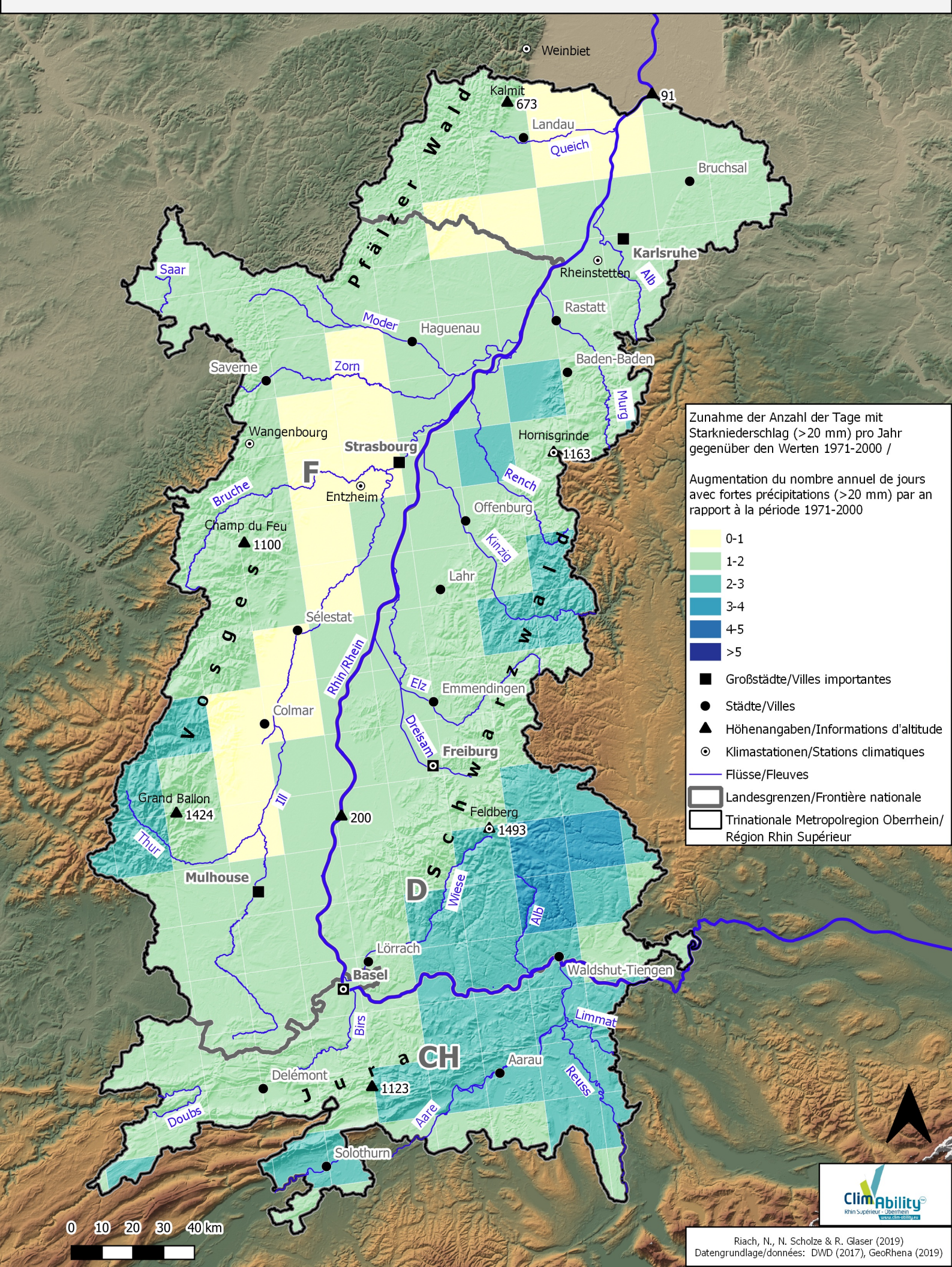
1. Sur l'évolution des pluies intenses:

- le site de Météo France sur les pluies extrêmes en France métropolitaine et en outre-mer : <http://pluiesextrêmes.meteo.fr/> [18.07.2019]
- le site du projet EXTREMOSCOPE : <https://cse.ipsl.fr/projets/83-extremoscope> [22.07.2019] (rapport final, fiches)
- Le portail DRIAS, avec ses cartes de simulations pluviométriques pour différents scénarios : <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/213> [18.07.2019]
- Berg, P., C. Moseley und J.O. Haerter (2013): Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. Nature Geoscience, 6(3), <http://www.nature.com/ngeo/journal/v6/n3/full/ngeo1731.html>. [18.07.2019]

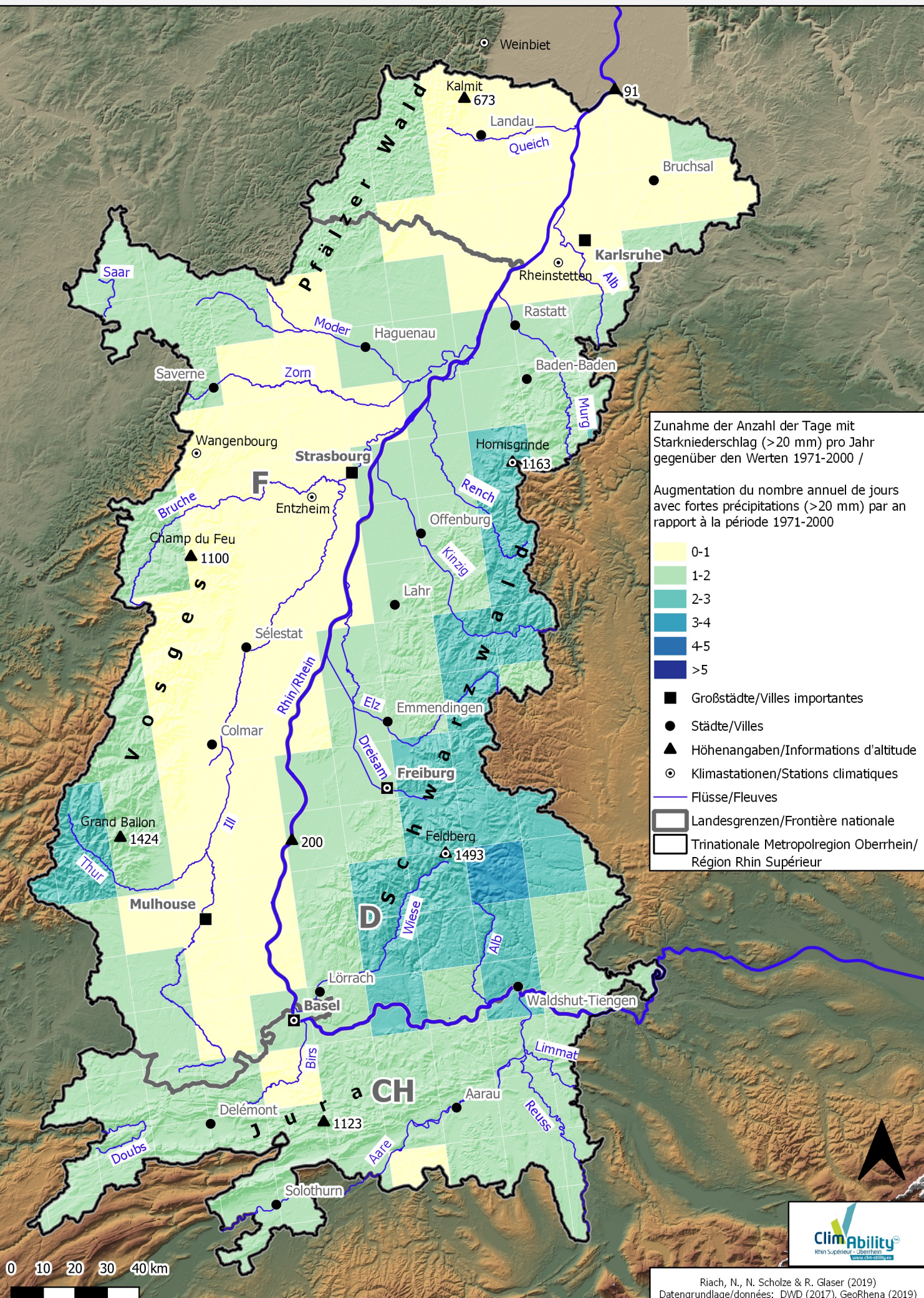
Moderater Klimawandel / Changement climatique modéré (RCP4.5) 2021-2050



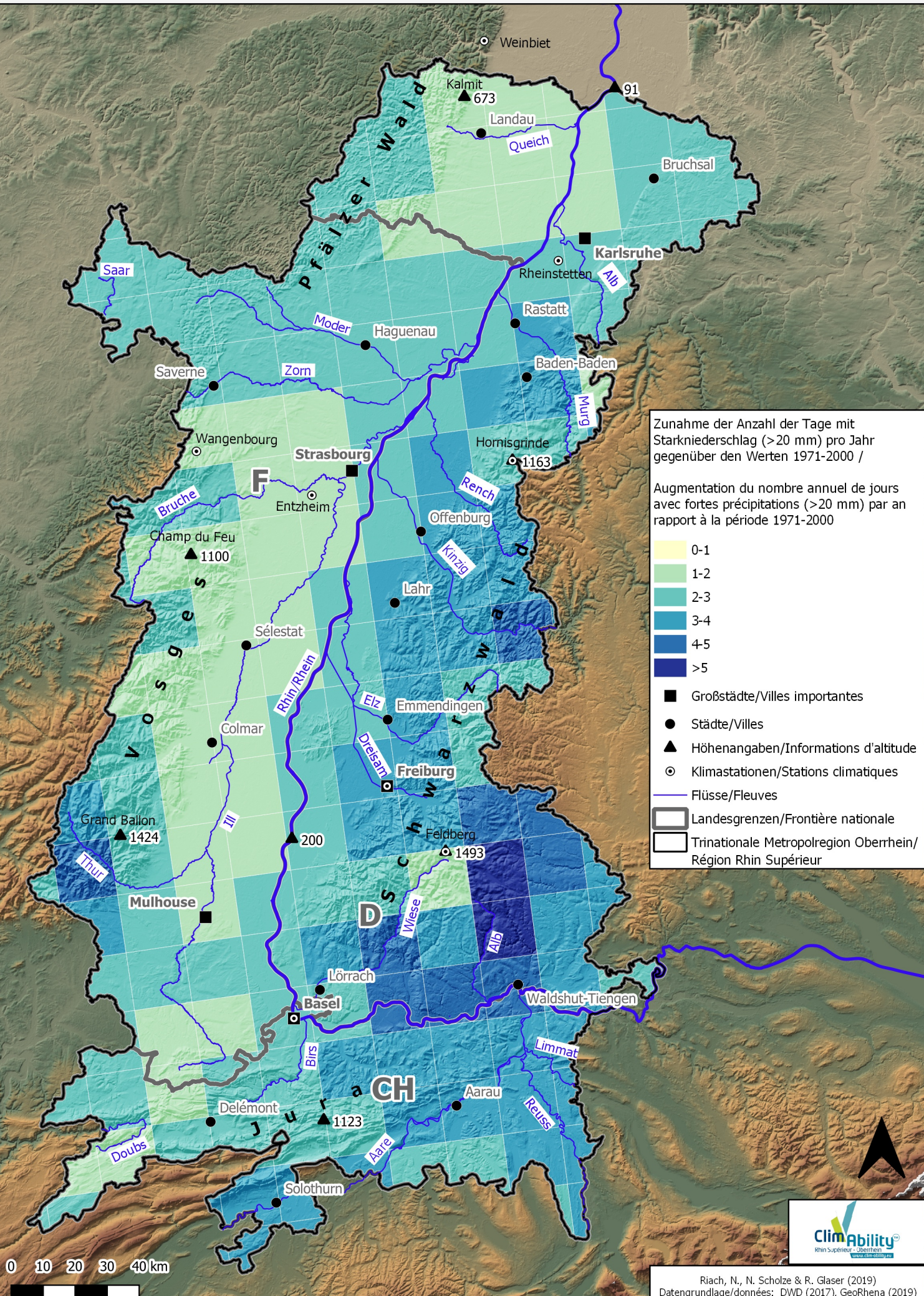
Moderater Klimawandel / Changement climatique modéré (RCP4.5) 2071-2100



Starker Klimawandel / Changement climatique fort (RCP8.5) 2021-2050



Starker Klimawandel / Changement climatique fort (RCP8.5) 2071-2100



Kapitel 9

Sommertage

Ein **Sommertag** ist ein Tag mit einer Maximaltemperatur von über 25°C, die in einer Wetterhütte in 2 Metern Höhe gemessen wird. Sommertage werden besonders in den Mittags- und Nachmittagsstunden als warm empfunden und können bei hitzeempfindlichen Personen oder an sonnenexponierten Standorten zu hoher **thermischer Belastung und Hitzestress** führen, wodurch die Leistungsfähigkeit eingeschränkt wird. Um die Wärmebelastung zu reduzieren werden zunehmend Innenräume gekühlt, statistisch gesehen ab einem Tagesmittelwert der Außentemperatur über 18,3°C. Bei einer steigenden Anzahl von Sommertagen nimmt also auch der Klimatisierungsbedarf von Wohn- und Arbeitsgebäuden zu, was wiederum zu einem erhöhten Kühlenergiebedarf führt.

Die Tabelle zeigt, dass die **Anzahl der Sommertage im Allgemeinen mit der Meereshöhe abnimmt**. Während lange Sommer und die damit verbundene Wärmebelastung in der Oberrheinebene schon früher bekannt waren, sind bereits mittelhohe Lagen wie z. B. der Pfälzer Wald deutlich weniger davon betroffen. In den Gipfellagen von Schwarzwald, Vogesen und Schweizer Jura spielen sie bislang kaum eine Rolle. Darüber hinaus führt der städtische Wärmeinseleffekt zu einer stärkeren thermischen Belastung in urbanen Räumen als in ländlichen Gebieten, insbesondere in den Abendstunden. Dies liegt daran, dass versiegelte Flächen wie Straßen, Dächer, etc. an einem Sommertag mehr Strahlung absorbieren als Vegetation oder Wasserflächen. Die gespeicherte Wärme wird in den Abendstunden an die Umgebung abgeben, dadurch fällt die Abkühlung deutlich geringer aus als in unversiegelten Gebieten. Der Unterschied zwischen Sommertagen in der Stadt und auf dem Land besteht also vor allem in der Länge der thermischen Belastungssituation und weniger in den maximalen Temperaturspitzen.

TABELLE: Langjährige Mittelwerte der Sommertage an verschiedenen Stationen in der Oberrheinregion⁰

Ort	Tage / Jahr	Periode	Höhe über NN in m
Karlsruhe-Rheinstetten	58,9	1971-2000	112
Straßburg-Entzheim	50,7	1971-2000	150
Freiburg	54,2	1971-2000	236
Basel-Binningen	41,6	1961-2009	316
Wangenbourg*	33,4	1990-2010	465
Weinbiet / Pfälzer Wald	20,7	1971-2000	553
Hornisgrinde	4,7	1971-2000	1.119
Feldberg / Schwarzwald	0,3	1971-2000	1.490

* Die Station Wangenbourg wurde erst im Mai 1990 eingerichtet.

Typisch ist außerdem die hohe jährliche Schwankung der Sommertage, z. B. in Straßburg-Entzheim im Referenzzeitraum 1971-2000 zwischen 30 und 65 Tagen pro Jahr. Seit der Jahrtausendwende hat die Zahl der Sommertage bereits messbar zugenommen, in mehreren

Jahren (2006, 2011, 2012, 2016 und 2017) wurden in Straßburg über 70 Sommertage gezählt, in den Rekordsommern 2003 und 2018 sogar knapp über 100 ¹.

Zukünftige Entwicklung

Die Klimakarten zeigen nun, dass sich dieser Trend fortsetzen wird und von einem weiteren **Anstieg der Sommertage** auszugehen ist. In der nahen Zukunft (2021-2050) liegen die Werte der beiden Szenarien noch relativ nahe beieinander und lassen für die Oberrheinebene im Durchschnitt ca. 11-15 Sommertage mehr pro Jahr erwarten, in höheren Lagen wird mit einem geringeren Anstieg gerechnet. In der fernen Zukunft (2071-2100) zeigt sich hingegen ein großer Unterschied zwischen moderatem und starkem Szenario: während im moderaten Szenario (RCP 4.5) der Anstieg in der Oberrheinebene ca. 24-30 Tage pro Jahr beträgt, liegt er im pessimistischen Szenario (RCP 8.5) bei über 40 Tagen pro Jahr. Das bedeutet, dass in Städten wie Straßburg oder Karlsruhe bisher als Jahrhundertereignis bezeichnete Hitzesommer zum Ende des 21. Jahrhunderts der Normalfall werden könnten! Es scheint daher geboten, weitreichende Hitzeanpassungsmaßnahmen bereits jetzt umzusetzen, insbesondere in den städtischen Verdichtungsräumen.

In den Höhenlagen ist die Zunahme der Sommertage in beiden Szenarien schwächer ausgeprägt. Jedoch kommt es auch hier zu einer Zunahme der Sommertage, die auf Grund des niedrigen Ausgangsniveaus prozentual noch stärker ausfällt. Im Klartext bedeutet dies, dass **Wärmebelastung** auch in den höher gelegenen Gemeinden des Schwarzwalds und der Vogesen im Laufe des 21. Jahrhunderts zu einem relevanten Thema wird.

0. Die Werte wurden aus folgenden Quellen entnommen und z.T. aus Rohdaten berechnet:

- für die französischen Stationen: offizielle Messwerte von Météo France, freundlicherweise zur Verfügung gestellt von S. Roy
- für die deutschen Stationen: offizielle Messwerte des Deutschen Wetterdienstes (DWD), online verfügbar über das Portal server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.p
- für die Station Basel-Binningen: offizielle Daten von MeteoSchweiz, online verfügbar über das Portal www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-indikatoren.html

1. Die Werte für Straßburg-Entzheim sind abrufbar unter: www.infoclimat.fr/climatologie

Chapitre 10

Les journées estivales

Une **journée chaude, ou estivale**, est un jour avec une température maximale supérieure à 25 °C, mesurée sous abri météorologique à une hauteur de 1,50 mètres. Les journées chaudes sont particulièrement éprouvants aux heures de midi et de l'après-midi, et peuvent entraîner des niveaux élevés de **stress thermique** chez les personnes sensibles à la chaleur, ou dans des zones exposées au soleil, ce qui limite les capacités productives. Dès que la température dépasse 18,3°C, on climatise les bâtiments résidentiels et industriels pour diminuer ce stress thermique. Ces besoins augmentent avec le nombre de journées chaudes, ce qui entraîne une plus grande consommation énergétique.

TABLEAU: Normales du nombre de journées chaudes dans différentes stations de mesure du Rhin supérieur: ⁰

Lieu	Jours / an	Période	Altitude en m.
Karlsruhe-Rheinstetten	58,9	1971-2000	112
Strasbourg-Entzheim	50,7	1971-2000	150
Freiburg	54,2	1971-2000	236
Bâle-Binningen	41,6	1961-2009	316
Wangenbourg*	33,4	1990-2010	465
Weinbiet / Pfälzer Wald	20,7	1971-2000	553
Hornisgrinde	4,7	1971-2000	1.119
Feldberg / Schwarzwald	0,3	1971-2000	1.490

* La station de Wangenbourg n'a ouvert qu'en mai 1990.

Le tableau montre que le **nombre de journées chaudes diminue généralement avec l'altitude**. Ainsi, alors que les longs étés et leur stress thermique associé sont bien présents dans la vallée du Rhin supérieur, des sites situés à une altitude moyenne, comme le «Pfälzer-Wald» sont bien moins affectés. Actuellement, ces journées chaudes n'ont quasiment pas d'impact sur les sommets de la Forêt-Noire, des Vosges et du Jura Suisse. En outre, l'effet d'îlot de chaleur urbain entraîne un stress thermique plus élevé dans les zones urbaines que dans les zones rurales, surtout la nuit. Ceci est dû au fait que les surfaces imperméables comme les rues, les toits, etc. se réchauffent plus les journées chaudes avec le rayonnement solaire que les espaces verts ou les plans d'eau. La chaleur emmagasinée par les matériaux d'aménagements urbains est ensuite libérée la nuit, ce qui ralentit considérablement le processus de refroidissement.

Le nombre de journées chaudes fluctue fortement : de 30 à 65 jours par an à Strasbourg-Entzheim au cours de la période de référence 1971-2000. Depuis le tournant du millénaire, le nombre de journées chaudes a déjà considérablement augmenté : à Strasbourg on comptait sur plusieurs années (2006, 2011, 2012, 2016 et 2017) plus de 70 jours de chaleurs, les records des étés 2003 et 2018 dépassant même les 100 jours.¹

Évolution en climat futur

Les cartes climatiques montrent que cette tendance se poursuivra, avec une **augmentation du nombre de jours de chaleur**. Dans un futur proche (2021-2050), les valeurs des deux scénarios sont relativement proches l’une de l’autre, et projettent une moyenne d’environ 11 à 15 journées chaudes supplémentaires par an pour la vallée du Rhin supérieur, tandis que l’augmentation sera plus faible en altitude. Dans un futur plus lointain (2071-2100), il existe par contre de grandes différences entre le scénario modéré et le scénario fort : alors que dans le scénario modéré (RCP 4.5) l’augmentation au niveau de la vallée du Rhin supérieur est d’environ 24 à 30 journées chaudes en plus par an, le scénario fort et pessimiste (RCP 8.5) prévoit plus de 40 journées estivales en plus par an. Ceci signifie que dans des villes comme Strasbourg ou Karlsruhe, les étés très chauds avec une durée de retour centennale pourraient devenir la norme à la fin du 21ème siècle. Il semble dès lors nécessaire de mettre en œuvre dès à présent des mesures d’ajustement thermique, notamment dans les agglomérations urbaines.

En altitude, l’augmentation du nombre de journées chaudes est plus faible qu’en plaine dans les deux scénarios. Cependant, le nombre de journées estivales augmente également en altitude, ce qui se remarque encore plus en raison du faible niveau de départ. En termes simples, cela signifie que **l’exposition à la chaleur** deviendra d’actualité au cours du 21ème siècle dans de nombreuses communes en altitude, de la Forêt-Noire et des Vosges.²

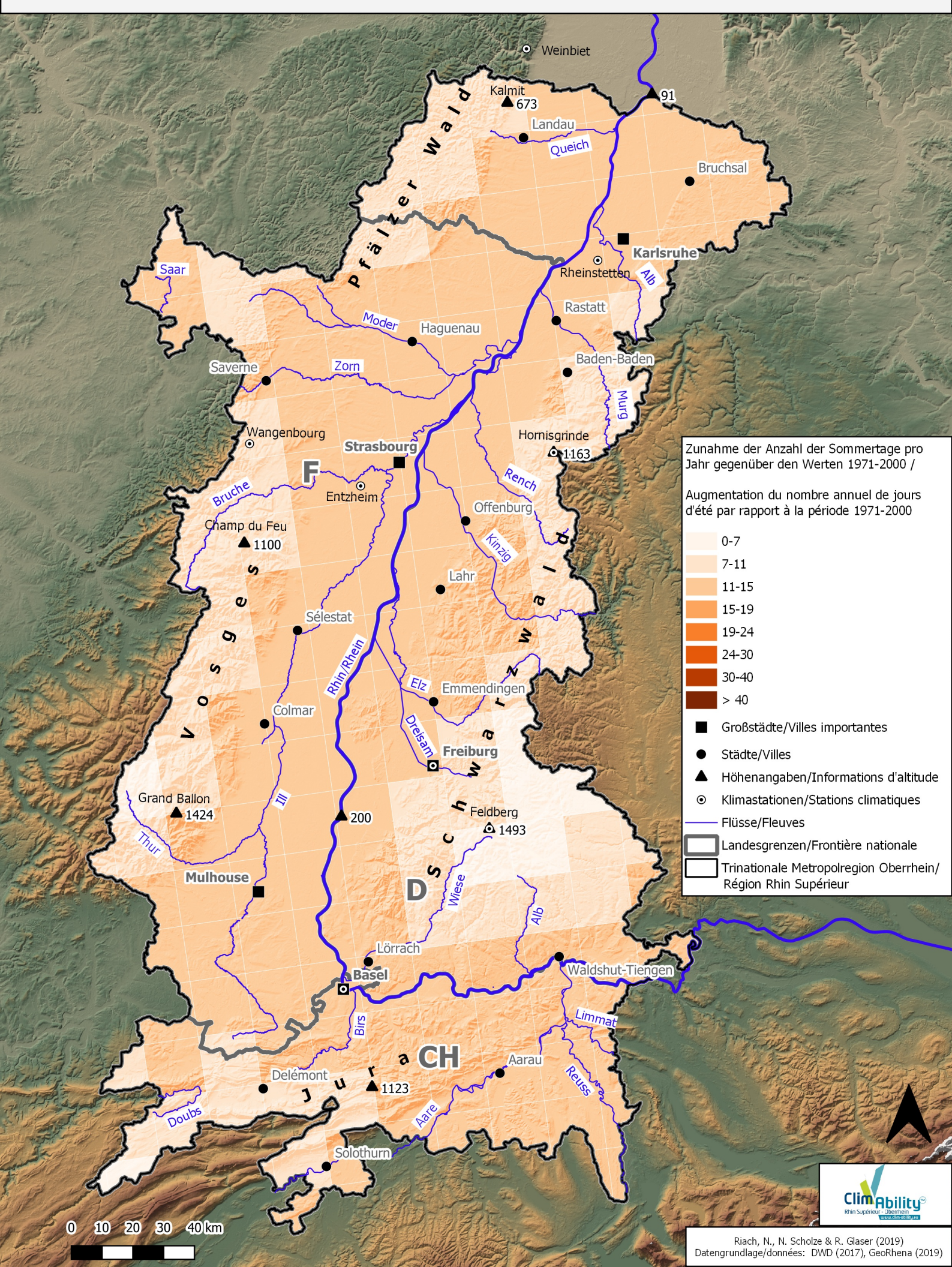
0. Les valeurs indiquées dans le tableau proviennent des sources suivantes et ont été partiellement calculées à partir de données brutes :

- pour les stations françaises : mesures officielles de Météo France
- pour les stations allemandes : mesures officielles du Service météorologique allemand (DWD), disponibles en ligne sur le portail server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.pl
- pour la station de Bâle-Binningen : données officielles de MétéoSuisse, disponibles en ligne sur le portail www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-indikatoren.html

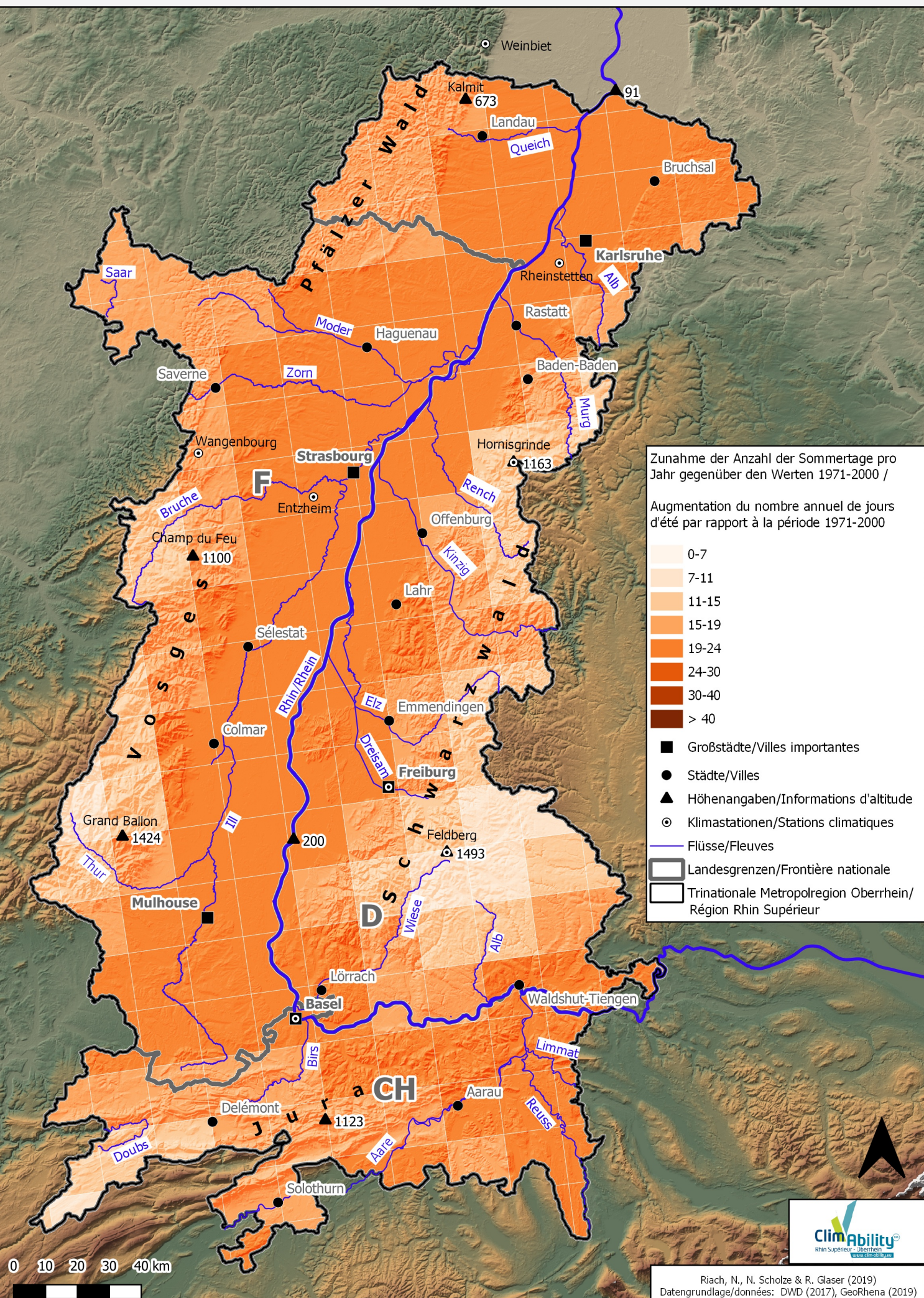
1. Les données de Strasbourg-Entzheim se trouvent en ligne: www.infoclimat.fr/climatologie

2. Pour en savoir plus sur l’évolution du nombre de journées chaudes sur la France, voir le portail Climat HD, <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd> [02.08.2019], onglet « climat futur » et « phénomènes / Journées chaudes »

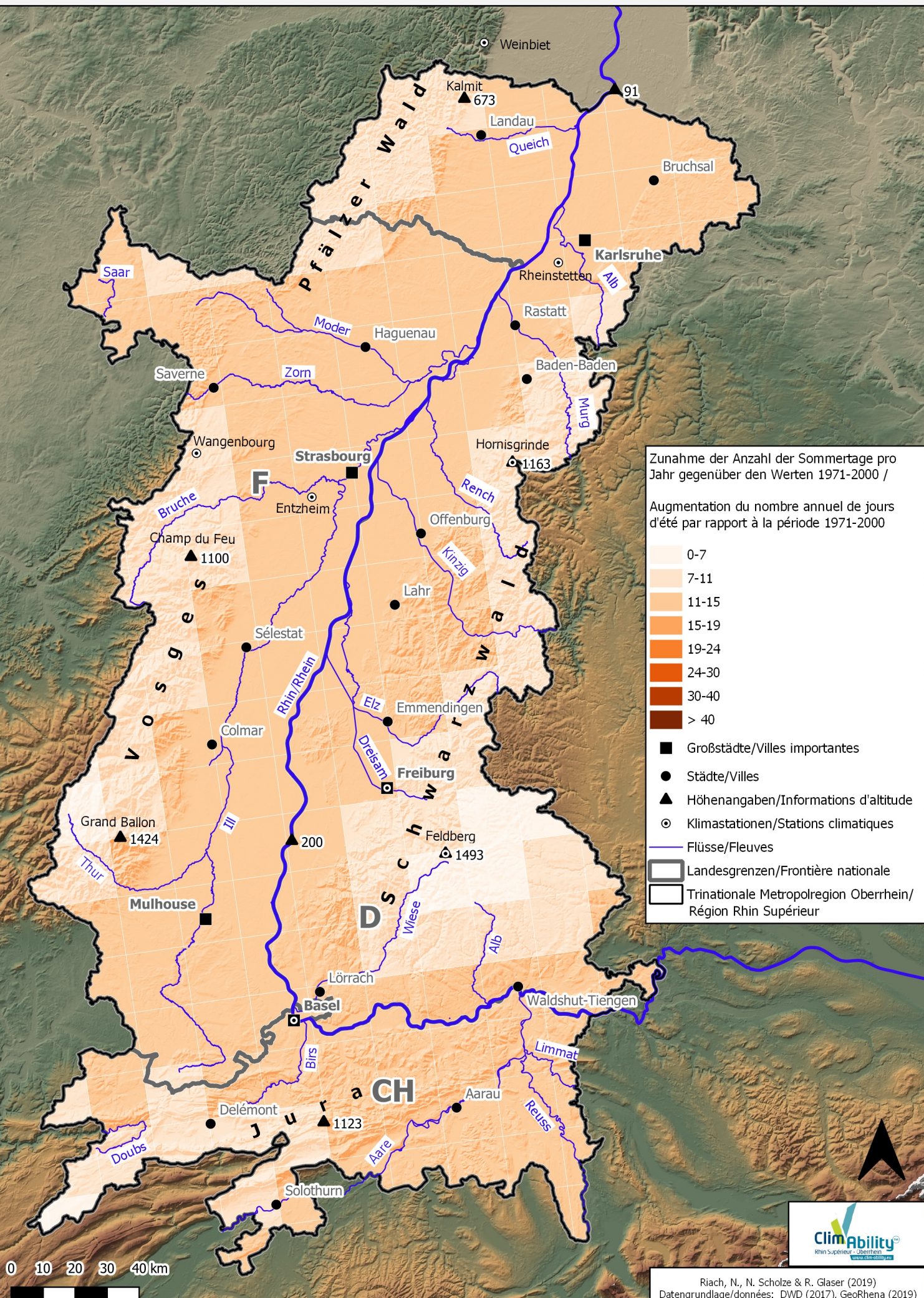
Moderater Klimawandel / Changement climatique modéré (RCP4.5) 2021-2050



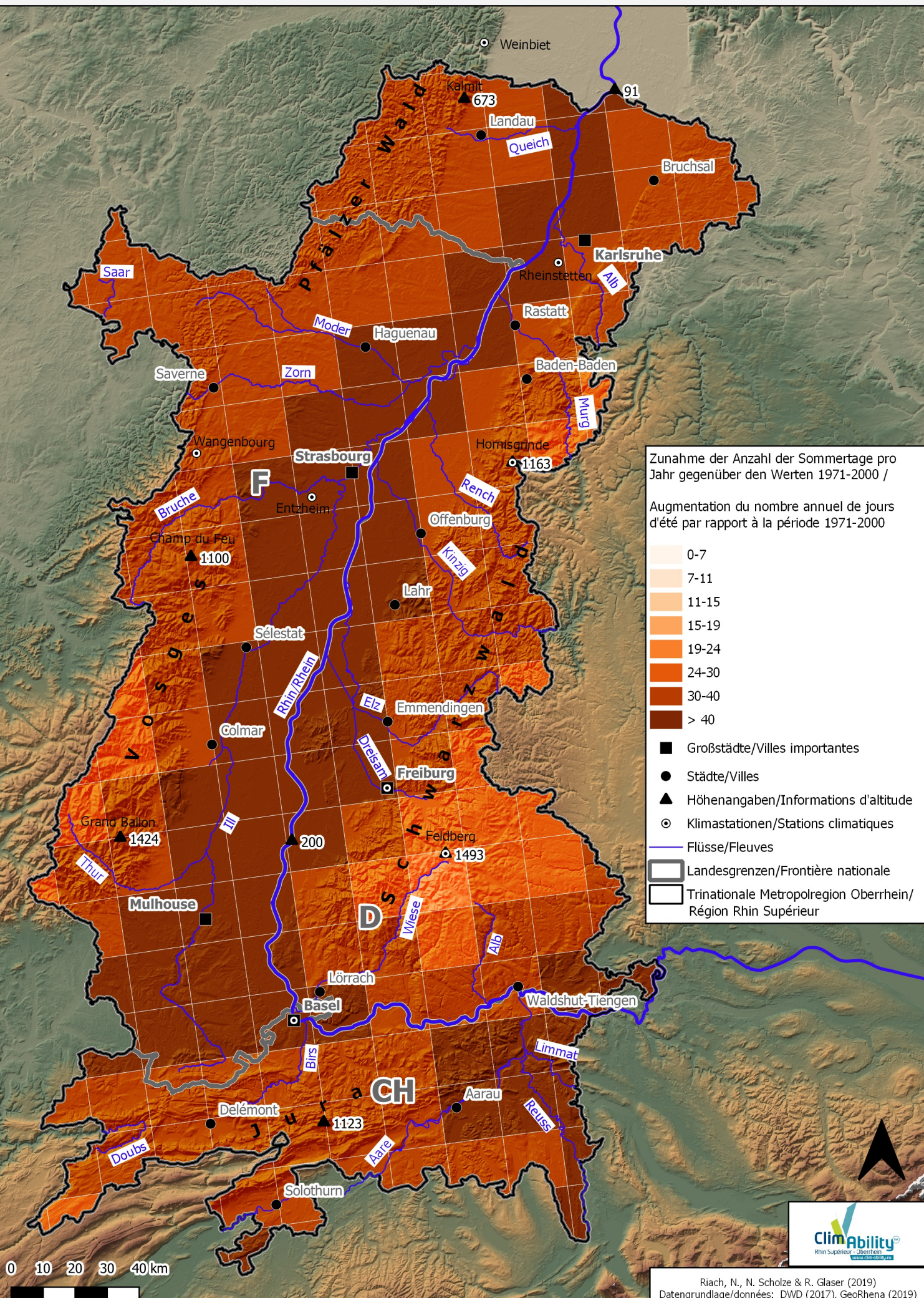
Moderater Klimawandel / Changement climatique modéré (RCP4.5) 2071-2100



Starker Klimawandel / Changement climatique fort (RCP8.5) 2021-2050



Starker Klimawandel / Changement climatique fort (RCP8.5) 2071-2100



Kapitel 11

Tropennächte

Eine **Tropennacht** ist eine Nacht, in der das Thermometer nicht unter 20°C fällt. Gemessen wird die Temperatur in einer Wetterhütte zwei Meter über dem Boden. Tropennächte sind in Mitteleuropa bisher zwar relativ selten, nehmen aber im Zuge der globalen Erwärmung zu. Sie treten meist im Zusammenhang mit Hitzewellen auf und gehen oft mit feuchtwarmer, schwüler Witterung einher.

Auf Grund der geringen nächtlichen Abkühlung haben Tropennächte einen negativen Einfluss auf den Schlaf und damit auf das allgemeine Wohlbefinden sowie die Konzentrations- und Leistungsfähigkeit vieler Menschen. Besonders während längerer Hitzewellen verschärfen Tropennächte die ohnehin vorhandene **Wärmebelastung**, da der Körper auch nachts nicht mehr regenerieren kann, wodurch das Risiko von Herz-Kreislauf-Erkrankungen steigt. Als Risikogruppen gelten v.a. ältere Personen, Schwangere, Kinder und Menschen mit körperlichen Beeinträchtigungen.¹ Zu beachten ist auch, dass die Temperatur häufig erst in den Morgenstunden kurz vor Sonnenaufgang unter 20° fällt. Während der Schlafphase herrschen also deutlich häufiger „tropische“ Bedingungen als durch die strenge Definition der Tropennächte wiedergegeben wird.

Um die Wärmebelastung von Tropennächten und Hitzewellen zu reduzieren werden zunehmend Innenräume gekühlt. Bei einer steigenden Anzahl von Tropennächten nimmt somit auch der Klimatisierungsbedarf vieler Gebäude zu, was wiederum zu einem erhöhten Kühlenergiebedarf führt.

TABELLE: Langjährige Mittelwerte der Tropennächte an verschiedenen Stationen in der Oberrheinregion⁰

Ort	Tage / Jahr	Periode	Höhe über NN in m
Karlsruhe-Rheinstetten (Umland)	1,2	1971-2000	112
Straßburg-Entzheim (Umland)	0,3	1971-2000	150
Freiburg-Stadt	3,7	1971-2000	236
Basel-Binningen (Stadttrand)	ca. 2	1961-2009	316
Wangenbourg*	1,4	1990-2010	465
Weinbiet / Pfälzer Wald	2,7	1971-2000	553
Hornisgrinde	ca. alle 10-15 Jahre	1971-2000	1.119
Feldberg / Schwarzwald	ca. alle 15 Jahre	1971-2000	1.490

* Die Station Wangenbourg wurde erst im Mai 1990 eingerichtet.

Die Tabelle zeigt, dass **Tropennächte** in der Oberrheinregion **bislang nur selten** auftreten. In den Hochlagen des Schwarzwalds und der Vogesen werden sie nur alle 10-15 Jahre während außergewöhnlicher Hitzewellen registriert. In den Tieflagen der Rheinebene sowie in den mittelhohen Lagen sind sie gängiger, hier schwanken die Werte etwa zwischen 0,3 und 3 Tropennächten pro Jahr. Aufgrund des nächtlichen Abflusses von Kaltluft von den Hängen in die Tieflagen treten sie in mittelhohen Lagen mitunter häufiger auf als in der Rheinebene, was aus dem Vergleich der Werte von Weinbiet im Pfälzer Wald und Straßburg-Entzheim ersichtlich wird. Darüber hinaus führt der **städtische Wärmeinseleffekt** zu einem markanten Unterschied zwischen Städten und Umland, wodurch in den Städten mehr Tropennächte gemessen werden als im nahen Umland.² Auch wenn sich die Stationswerte in der Tabelle nur graduell unterscheiden, macht sich dieser Stadt-Land-Gegensatz vor allem in Extremjahren bemerkbar.

Die **jährliche Anzahl der Tropennächte schwankt stark**, an der Wetterstation Karlsruhe-Rheinstetten im Referenzzeitraum 1971-2000 etwa zwischen 0 und 7 Nächten pro Jahr³. In den letzten Jahrzehnten hat die Zahl der Tropennächte bereits messbar zugenommen, in einzelnen Jahren wie 2003, 2006 oder 2015 wurden dort bis zu 10 Tropennächte gezählt. Im Rekordsommer 2003 verzeichnete die Station Kehl 21, die Station Freiburg-Stadt sogar bis zu 26 Tropennächte.⁴ Allerdings gibt es auch innerhalb von Städten große Unterschiede in Bezug auf die Tropennächte. Die höchsten Werte treten in dicht bebauten, stark versiegelten und schlecht durchlüfteten Quartieren auf, in den übrigen Quartieren sind sie oft erheblich niedriger.

Zukünftige Entwicklung

Die nachfolgenden Karten zeigen nun, dass sich dieser Trend fortsetzen wird und ein weiterer **Anstieg der Tropennächte** zu erwarten ist. In der nahen Zukunft (2021-2050) liegen die Werte der beiden Klimawandel-Szenarien noch relativ nahe beieinander und lassen für weite Teile der Oberrheinebene ca. 3-5 Tropennächte mehr pro Jahr erwarten, was mehr als einer Verdopplung der Vergleichswerte entspricht. In der fernen Zukunft (2071-2100) zeigt sich hingegen ein großer Unterschied zwischen moderatem und starkem Szenario: während im moderaten Szenario (RCP 4.5) der Anstieg in der Oberrheinebene meist 5-8 Nächte pro Jahr beträgt, liegt er im pessimistischen Szenario (RCP 8.5) in weiten Teilen der Oberrheinebene bei über 17 Nächten pro Jahr. Das bedeutet, dass bisher als Jahrhundertereignis bezeichnete Sommer zum Ende des 21. Jahrhunderts der Normalfall werden könnten. Die Zunahme der Tropennächte in städtischen Wärmeinseln wird noch höher liegen, was **gravierende gesundheitliche Risiken** für die dort lebende Bevölkerung mit sich bringt. Es ist daher geboten, umfassende Anstrengungen zur Umsetzung und Kommunikation von Hitzeanpassungsmaßnahmen zu unternehmen, insbesondere in den städtischen Verdichtungsräumen.

In den Höhenlagen ist die Zunahme der Tropennächte in beiden Szenarien schwächer ausgeprägt. Jedoch kommt es auch hier insbesondere im starken Klimawandel-Szenario der fernen Zukunft (RCP 8.5, 2071-2100) zu einer Zunahme der Tropennächte, die auf Grund des niedrigen Ausgangsniveaus prozentual noch stärker ausfällt. Konkret bedeutet dies, dass die mit den Tropennächten einhergehende Wärmebelastung in vielen höher gelegenen Gemeinden des Schwarzwalds und der Vogesen im Laufe des 21. Jahrhunderts überhaupt erst zu einem relevanten Thema wird.

Für weitere Informationen:

- Gesundheitsrisiken: www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheit-srisiken-durch-hitze
- Klimatische Informationen: Thomas Deutschländer, Hermann Mächel: Temperatur inklusive Hitzewellen, in: Guy Brasseur, Daniela Jacob, Susanne Schuck-Zöller (Hrsg.)(2017), Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin Heidelberg, S. 47-56.

-
1. Brasseur G, Jacob D, Schuck-Zöller S (Hrsg.)(2017): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin Heidelberg, Kap. 14 Gesundheit, S. 137-149.
 0. Die Werte wurden aus folgenden Quellen entnommen und z.T. aus Rohdaten berechnet:
 - für die französischen Stationen: offizielle Messwerte von Météo France, freundlicherweise zur Verfügung gestellt von S. Roy
 - für die deutschen Stationen: offizielle Messwerte des Deutschen Wetterdienstes (DWD), online verfügbar über das Portal server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.p
 - für die Station Basel-Binningen: offizielle Daten von MeteoSchweiz, online verfügbar über das Portal www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-indikatoren.html
 2. zum städtischen Wärmeinseleffekt:
 - Krug A, Mücke HG (2018): Auswertung Hitze-bezogener Indikatoren als Orientierung der gesundheitlichen Belastung. In: UMID: Umwelt und Mensch - Informationsdienst Nr. 2/2018, S. 67-79. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/publikationen/uba_krug_muecke.pdf [19.07.2019]
 - Kuttler W (2004): Stadtklima. Teil 1: Grundzüge und Ursachen, in: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 16 (3): 187-199. <https://doi.org/10.1065/uwsf2004.03.078>; Teil 2: Phänomene und Wirkungen, in: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 16 (4): 263-274. <https://doi.org/10.1065/uwsf2004.08.083> [19.07.2019]
 3. Andrian-Werbung S & Plegnière S (2016): Wärmebelastung in Städten. Indikatorenbasiertes Klimafolgenmonitoring für Baden-Württemberg. URL: https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/documents/10184/539907/I-SR-3_Indikator_Waermebelastung.pdf/a07eeddb-87c5-485d-83fb-16cb5534e913 [19.07.2019]
 4. offizielle Messwerte des Deutschen Wetterdienstes (DWD), online verfügbar über das Portal server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.pl [19.07.2019]

Chapitre 12

Les nuits tropicales

Une **nuît tropicale** est une nuit durant laquelle le thermomètre ne descend pas en dessous de 20°C. La température est mesurée sous abri météorologique à 1,50 mètre du sol. Bien que le nombre de nuits tropicales soit jusqu'à présent relativement faible en Europe centrale, il augmente avec le réchauffement climatique. Elles surviennent généralement avec les vagues de chaleur et sont souvent accompagnées d'un temps chaud et humide.

En raison du faible refroidissement nocturne, les nuits tropicales ont une influence négative sur le sommeil, sur le bien-être général, et donc sur la concentration et les performances de nombreuses personnes. Les nuits tropicales intensifient le **stress thermique**, en particulier pendant les longues vagues de chaleur, car le corps ne peut plus se régénérer, même de nuit, ce qui augmente le risque de maladies cardiovasculaires. Les personnes âgées, les femmes enceintes, les enfants et les personnes souffrant de handicaps physiques sont les principaux groupes à risque.¹ Il convient de noter que la température ne descend souvent en dessous de 20°C que peu de temps avant le lever du soleil. La nuit, le cumul des durées où les températures excèdent 20°C, est donc supérieur au cumul des nuits tropicales. Afin de réduire le stress thermique des nuits tropicales et des vagues de chaleur, l'intérieur des bâtiments est de plus en plus refroidi. Plus le nombre de nuits tropicales augmente, plus les besoins en climatisation augmentent dans de nombreux bâtiments, ce qui entraîne à nouveau une augmentation des besoins en énergie de refroidissement.

TABLEAU: Normales du nombre de nuits tropicales dans différentes stations de mesure du Rhin supérieur:⁰

Lieu	Jours / an	Période	Altitude en m.
Karlsruhe-Rheinstetten (périphérie)	1,2	1971-2000	112
Strasbourg-Entzheim (périphérie)	0,3	1971-2000	150
Freiburg (centre-ville)	3,7	1971-2000	236
Bâle-Binningen	env. 2	1961-2009	316
Wangenbourg*	1,4	1990-2010	465
Weinbiet / Pfälzer Wald	2,7	1971-2000	553
Hornisgrinde	Tous les 10-15 ans environ	1971-2000	1.119
Feldberg / Schwarzwald	Tous les 15 ans environ	1971-2000	1.490

* La station de Wangenbourg n'a ouvert qu'en mai 1990.

Le tableau montre que les **nuits tropicales** dans la région du Rhin supérieur n'ont jusqu'à présent été qu'**assez rares**. Sur les hauteurs de la Forêt Noire et des Vosges, elles ne sont enregistrées que tous les 10-15 ans, lors de vagues de chaleur exceptionnelles. En revanche, elles sont plus fréquentes dans la vallée du Rhin, ainsi que dans les régions de moyenne altitude, où les valeurs varient entre 0,3 à 3,7 nuits tropicales par an. En raison de l'écoulement nocturne de l'air froid des pentes vers les vallées, les nuits tropicales sont parfois plus fréquentes dans les zones de moyenne altitude, que dans la plaine du Rhin,

comme le montre la comparaison des valeurs entre Weinbiet et Strasbourg-Entzheim. De plus, **l'effet d'îlot de chaleur urbain** entraîne une différence marquée entre les villes et la campagne environnante. Les nuits tropicales sont donc nettement plus nombreuses dans les villes que dans les campagnes environnantes.² Même si les valeurs des stations dans le tableau ne diffèrent que graduellement, ce contraste urbain-rural est particulièrement marqué dans les années extrêmes.

Le **nombre annuel de nuits tropicales varie fortement** à la station météorologique de Karlsruhe-Rheinstetten au cours de la période de référence 1971-2000 : entre 0 et 7 nuits par an.³ En l'espace des dernières décennies, le nombre de nuits tropicales a augmenté de manière quantifiable, certaines années comme 2003, 2006 ou 2015, jusqu'à 10 nuits tropicales ont été recensées. Au cours de l'été 2003, la station de Kehl a enregistré 21 nuits tropicales, celle de Freiburg-centreville jusqu'à 26 nuits tropicales.⁴ Cependant, il existe également de grandes différences à l'intérieur des villes en termes de nuits tropicales. Les valeurs les plus élevées se situent dans les quartiers densément bâtis, très imperméabilisés et mal ventilés, alors qu'elles sont souvent nettement inférieures dans d'autres quartiers ou hors du centre-ville.

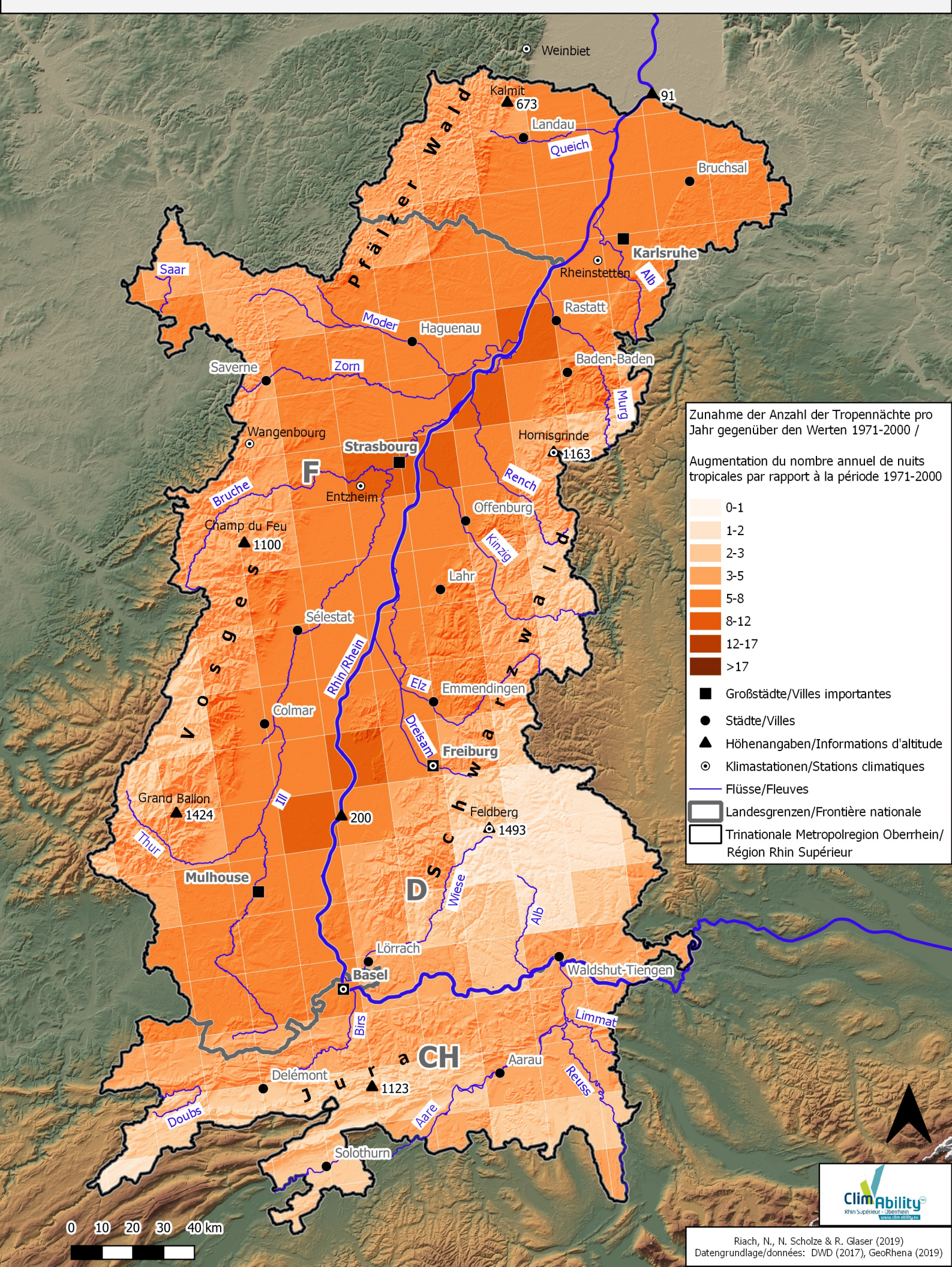
Évolution en climat futur

Les cartes climatiques montrent que cette tendance se poursuivra, et qu'il faut s'attendre à une **augmentation du nombre de nuits tropicales**. Dans un futur proche (2021-2050), les valeurs des deux scénarios de changement climatique sont encore relativement proches l'une de l'autre, et prévoient pour une grande partie de la vallée rhénane environ 3-5 nuits tropicales supplémentaires par an en moyenne, soit plus du double des valeurs de référence. Dans un futur plus lointain (2071-2100), il existe cependant une grande différence entre le scénario modéré et le scénario fort : alors que dans le scénario modéré (RCP4.5), l'augmentation du nombre de nuits tropicales dans la vallée rhénane est généralement de 5-8 nuits tropicales par an en moyenne, dans le scénario pessimiste (RCP8.5) elle est supérieure à 17 nuits par an. Les étés exceptionnellement chauds du début du XXI^e siècle, tel l'été 2003, pourraient devenir la norme dans la deuxième moitié du XXI^e siècle. L'augmentation du nombre de nuits tropicales dans les îlots de chaleur urbains est susceptible d'être encore plus élevée lors d'épisodes extrêmes, ce qui pose de **graves risques pour la santé** de la population y résidant. Un effort important est donc nécessaire pour mettre en œuvre et faire connaître les mesures d'adaptation à la chaleur, en particulier dans les agglomérations urbaines.

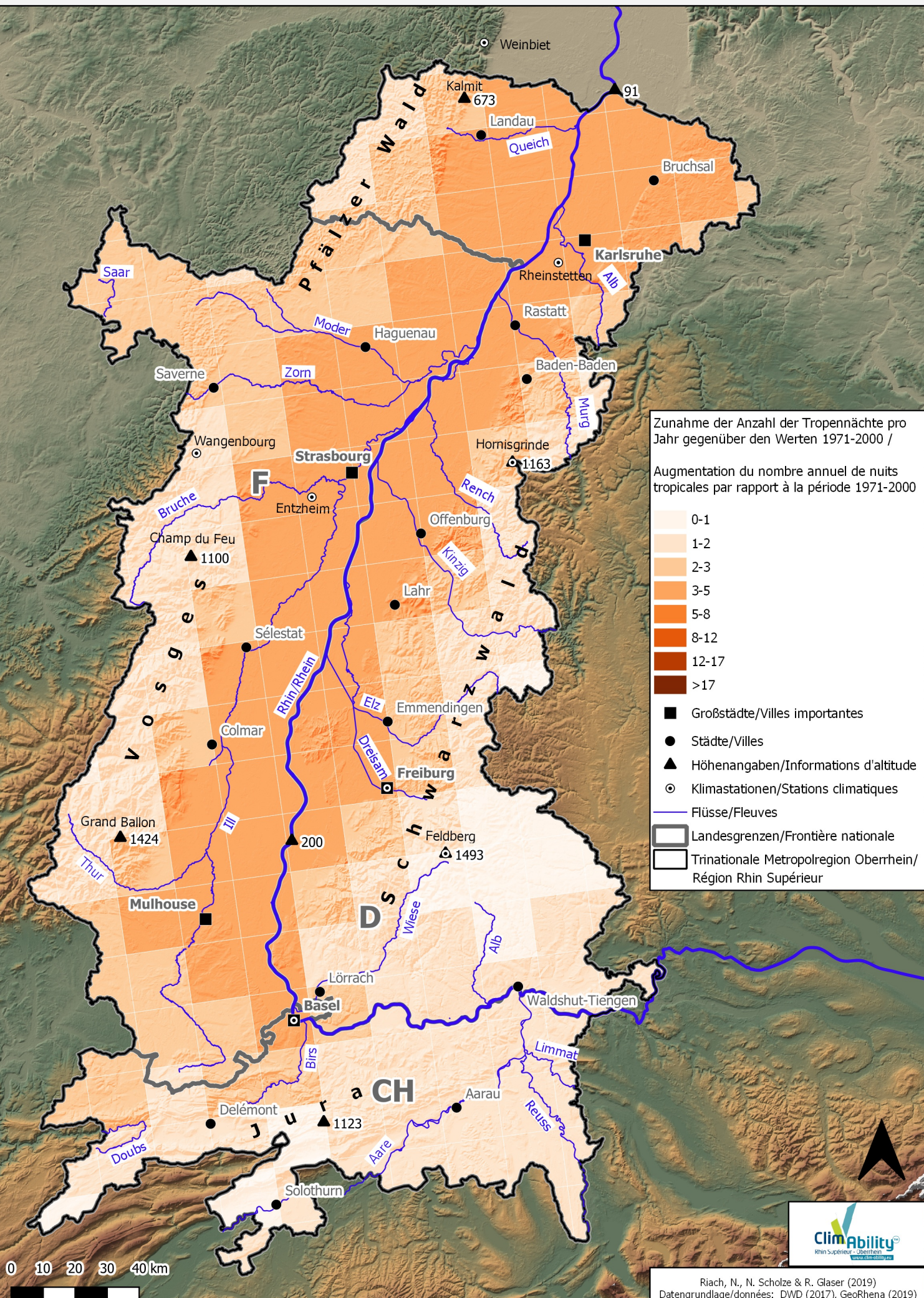
Cependant, ici également, et ceci surtout dans le scénario de changement climatique à long terme (RCP8.5, 2071-2100), il y aura une augmentation des nuits tropicales, qui sera encore plus importante en termes de pourcentage que dans les zones moins élevées, en raison du faible niveau initial. Concrètement, cela signifie que la charge thermique liée aux nuits tropicales dans les communes situées d'altitude de la Forêt-Noire et des Vosges, ne deviendra un sujet pertinent qu'au cours du 21^{ème} siècle.

1. Brasseur G, Jacob D, Schuck-Zöller S (Ed.) (2017): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin Heidelberg, Chap. 14 Gesundheit, p. 137-149.
0. Les valeurs indiquées dans le tableau proviennent des sources suivantes et ont été partiellement calculées à partir de données brutes :
 - pour les stations françaises: mesures officielles de Météo France
 - pour les stations allemandes : mesures officielles du Service météorologique allemand (DWD), disponibles en ligne sur le portail server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.pl
 - pour la station de Bâle-Binningen : données officielles de MétéoSuisse, disponibles en ligne sur le portail www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-indikatoren.html
2. Par rapport à l'îlot de chaleur urbain:
 - Krug A, Mücke HG (2018): Auswertung Hitze-bezogener Indikatoren als Orientierung der gesundheitlichen Belastung. In: UMID: Umwelt und Mensch - Informationsdienst Nr. 2/2018, S. 67-79. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/publikationen/uba_krug_muecke.pdf [19.07.2019]
 - Kuttler W (2004): Stadtklima. Teil 1: Grundzüge und Ursachen, in: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 16 (3): 187-199. <https://doi.org/10.1065/uwsf2004.03.078>; Teil 2: Phänomene und Wirkungen, in: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 16 (4): 263-274. <https://doi.org/10.1065/uwsf2004.08.083> [19.07.2019]
3. Andrian-Werbung S & Plegnière S (2016): Wärmebelastung in Städten. Indikatorenbasiertes Klimafolgenmonitoring für Baden-Württemberg. URL: https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/documents/10184/539907/I-SR-3_Indikator_Waermebelastung.pdf/a07eaddb-87c5-485d-83fb-16cb5534e913 [19.07.2019]
4. Données officielles du Service météorologique allemand (DWD), disponibles en ligne sur le portail server.wettermail.de/opendata-dwd/cgi-bin/klima2.pl [19.07.2019]

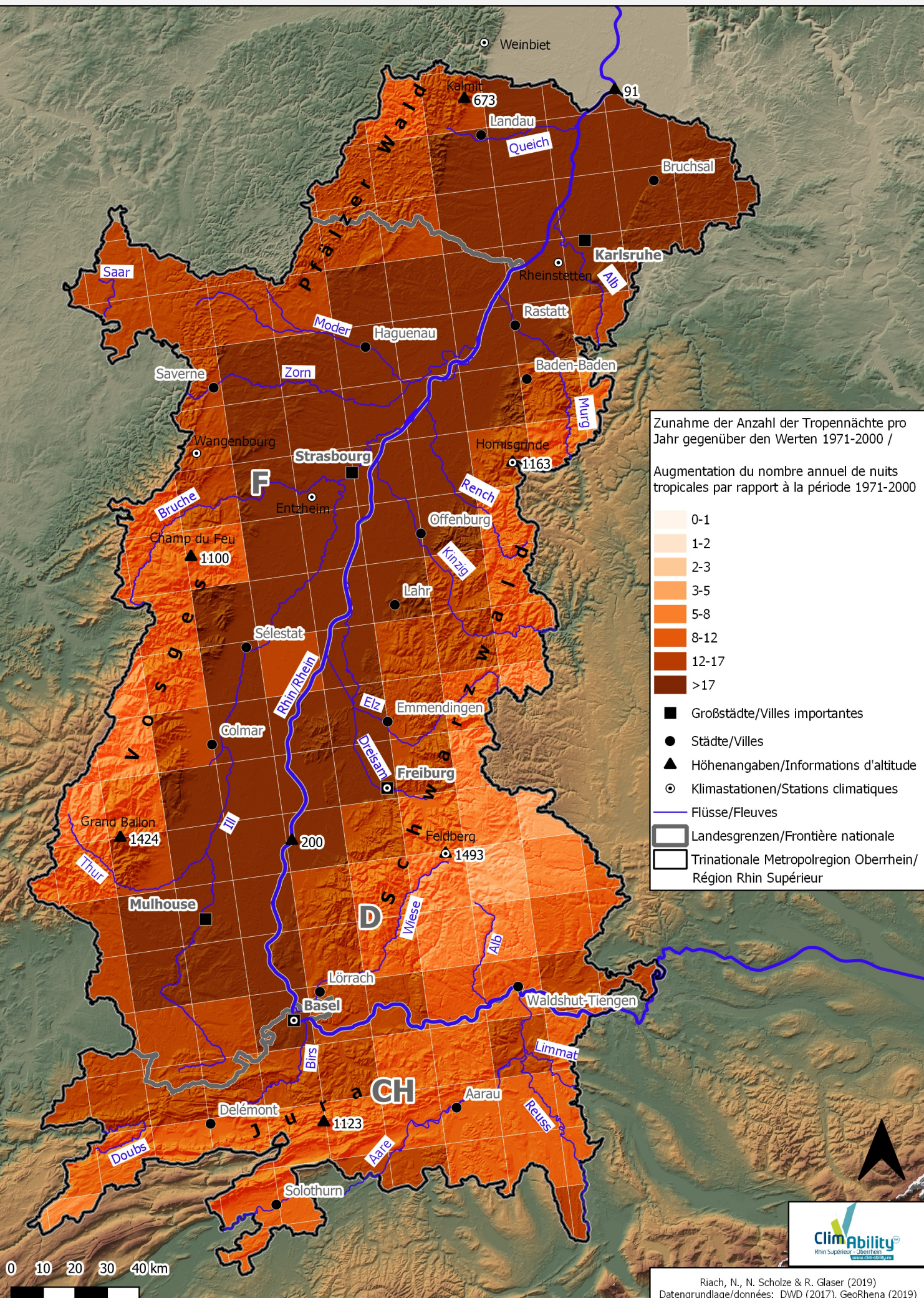
Moderater Klimawandel / Changement climatique modéré (RCP4.5) 2071-2100



Starker Klimawandel / Changement climatique fort (RCP8.5) 2021-2050



Starker Klimawandel / Changement climatique fort (RCP8.5) 2071-2100





Gestaltung und Redaktion / Conception et édition

Nicolas Scholze & Nils Riach

Physische Geographie

Universität Freiburg

Schreiberstraße 20

79085 Freiburg

Zitiervorschlag / Citation suggérée

Riach N, Scholze N, Glaser R, Roy S, Stern B (2019): Klimawandel am Oberrhein: Ein zweisprachiges Dossier mit 24 Karten und 6 Begleittexten // Changement climatique dans le Rhin Supérieur: un dossier bilingue avec 24 cartes et 6 textes d'accompagnement. Publiziert bei www.georhena.eu/de/Kartensammlung // publié sur www.georhena.eu/fr/Carthèque



Fonds européen de développement régional
(FEDER)
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
(EFRE)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Kanton Basel-Stadt



Partenaires associés / Assoziierte Partner

