



SEBASTIANA
STIFTUNG



u^b

**UNIVERSITÄT
BERN**

**OESCHGER CENTRE
CLIMATE CHANGE RESEARCH**



Étés caniculaires et secs en Suisse

Causes et conséquences des étés records en
1947, 2003 et 2018



Étés caniculaires et secs en Suisse

Causes et conséquences des étés records en 1947, 2003 et 2018

Traduction :

Alexis Berne, Sonia Dupuis, Jérôme Kopp, Pauline Rivoire, Alexandre Tuel

Agencement :

Alexander Hermann

Données bibliographiques :

Imfeld, N., P. Stucki, S. Brönnimann, S. Bader, M. Bürgi, P. Calanca, S. Gubler, A. Holzkämper, L. Hövel, F. A. Isotta, C. Kestenholz, S. Kotlarski, A. Mastai, S. U. Nussbaumer, C. C. Raible, M. Röthlisberger, S. C. Scherrer, K. Staub, A. M. Vicedo-Cabrera, M.-M. Vogel, K. Wehrl, T. Wohlgemuth et H. J. Zumbühl (2022). Étés caniculaires et secs en Suisse. Causes et conséquences des étés records en 1947, 2003 et 2018, *Geographica Bernensia*, G98, 33 p., doi:10.4480/GB2022.G98.02.

Traduction :

Allemand (doi:10.4480/GB2022.G98.01)

Anglais (doi:10.4480/GB2022.G98.03)

© GEOGRAPHICA BERNENSIA 2022
Institut de géographie, Université de Berne, Suisse



Impression : Publikation Digital Operations GmbH, Brugg

Affiliations

Stephan Bader

Division Climat
Office fédéral de météorologie et de climatologie, MétéoSuisse

Stefan Brönnimann

Institut de géographie, Université de Berne
Oeschger Centre for Climate Change Research, Université de Berne

Matthias Bürgi

Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL
Institut de géographie, Université de Berne

Pierluigi Calanca

Groupe Climat et agriculture, Agroscope

Stefanie Gubler

Division Climat
Office fédéral de météorologie et de climatologie, MétéoSuisse

Laura Hövel

Institut de géographie, Université de Berne
Oeschger Centre for Climate Change Research, Université de Berne

Annelie Holzkämper

Groupe Climat et agriculture, Agroscope
Oeschger Centre for Climate Change Research, Université de Berne

Noemi Imfeld

Institut de géographie, Université de Berne
Oeschger Centre for Climate Change Research, Université de Berne

Francesco A. Isotta

Division Climat
Office fédéral de météorologie et de climatologie, MétéoSuisse

Christoph Kestenholz

Institute of Social and Preventive Medicine, Université de Berne
Oeschger Centre for Climate Change Research, Université de Berne

Sven Kotlarski

Division Climat
Office fédéral de météorologie et de climatologie, MétéoSuisse

Alina Mastai

Institut de l'atmosphère et du climat, EPF Zurich

Samuel U. Nussbaumer

Institut de géographie, Université de Zurich

Christoph C. Raible

Institut de physique, Université de Berne
Oeschger Centre for Climate Change Research, Université de Berne

Matthias Röthlisberger

Institut de l'atmosphère et du climat, EPF Zurich

Simon C. Scherrer

Division Climat
Office fédéral de météorologie et de climatologie, MétéoSuisse

Kaspar Staub

Institut de médecine évolutive, Université de Zurich
Institut d'histoire, Université de Berne

Peter Stucki

Institut de géographie, Université de Berne
Oeschger Centre for Climate Change Research, Université de Berne

Ana M. Vicedo-Cabrera

Institute of Social and Preventive Medicine, Université de Berne
Oeschger Centre for Climate Change Research, Université de Berne

Martha-Marie Vogel

Programme sur l'Homme et la biosphère, UNESCO, Paris

Kathrin Wehrli

Division Climat
Office fédéral de météorologie et de climatologie, MétéoSuisse
Center for Climate Systems Modeling C2SM, EPF Zurich

Thomas Wohlgemuth

Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL

Heinz J. Zumbühl

Institut de géographie, Université de Berne

Table des matières

Des étés mémorables	6
Stefan Brönnimann, Noemi Imfeld, Peter Stucki	
L'été 1947 dans le contexte du changement climatique	8
Simon C. Scherrer, Stefanie Gubler, Francesco A. Isotta, Stephan Bader	
Dynamique: d'une parcelle d'air chaud à un été caniculaire	10
Noemi Imfeld, Matthias Röthlisberger	
Rôle de l'océan et de la circulation à grande échelle lors des vagues de chaleur en Europe centrale	12
Laura Hövel, Christoph C. Raible	
Du contrôle des étés caniculaires en Europe par les interactions sécheresses-chaleur	14
Martha-Marie Vogel	
Impact des années de sécheresse 1947, 2003 et 2018 sur l'agriculture	16
Annelie Holzkämper, Pierluigi Calanca	
Effets des sécheresses de 1947 et 2018 sur les forêts suisses	18
Thomas Wohlgemuth, Matthias Bürgi	
La fonte extrême des glaciers alpins en 1947	20
Samuel U. Nussbaumer, Heinz J. Zumbühl	
Surmortalité durant les canicules extrêmes en Suisse	22
Ana M. Vicedo-Cabrera, Kaspar Staub, Christoph Kestenholz	
Chaleur et sécheresse estivales: une excursion dans l'avenir climatique de la Suisse	24
Kathrin Wehrli, Alina Mastai, Stefanie Gubler, Sven Kotlarski	
Notes	28
Crédit photos	32

Des étés mémorables

Vous souvenez-vous de l'été 2018 ? La sécheresse s'est installée dès le mois d'avril et s'est poursuivie jusqu'en septembre. Dans de nombreuses régions de Suisse, les précipitations ont à peine dépassé 50 pour cent de la normale pendant cette période. Des rivières, et même des lacs, se sont asséchés, comme le lac des Brenets à la frontière franco-suisse (fig. 1.1). Durant toute cette période, les températures sont restées élevées, au point que le semestre d'été 2018 fut le plus chaud depuis le début des mesures en 1864. De plus, une forte canicule toucha la Suisse entre fin juillet et début août de cette année (fig. 1.2).



Fig. 1.1 : Le lac des Brenets asséché le 18 septembre 2018 (© Keystone).

Un rapport de l'Office fédéral de l'environnement¹ sur cet événement souligne ses conséquences sur l'agriculture et la forêt, sur les cours d'eau et les glaciers, et sur la santé et la pollution atmosphérique. Le fait que cet été ne donne qu'un avant-goût des étés futurs est devenu évident à l'automne de la même année, lorsque les nouveaux scénarios climatiques pour la Suisse CH2018, élaborés par l'Office fédéral de météorologie et de climatologie, MétéoSuisse, l'EPFZ, l'Université de Berne et ProClim, ont été présentés au public.² Mais l'été 2018 n'a pas été extrême qu'en Suisse. Presque tout l'hémisphère nord a été concerné : Amérique du Nord, Europe, Asie. C'est inhabituel, et cela montre l'influence des gaz à effet de serre d'origine humaine, sans lesquels un tel événement ne peut plus être expliqué.³

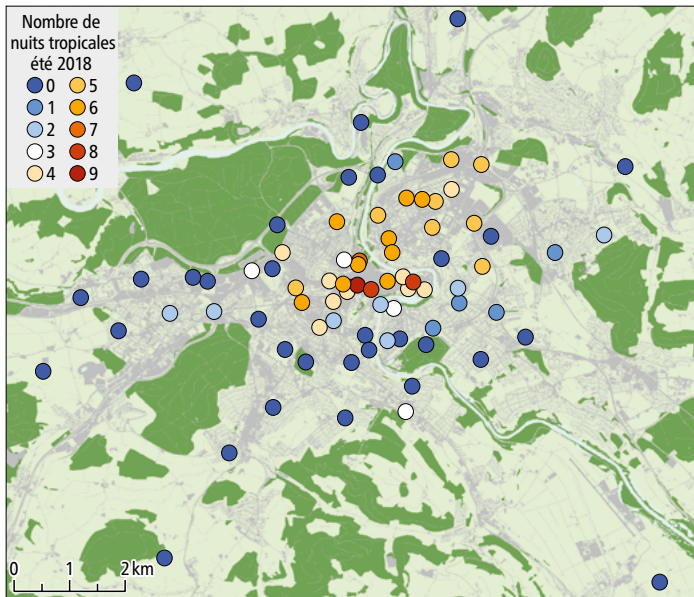


Fig. 1.2 : L'effet d'îlot de chaleur urbain renforce encore la chaleur déjà insupportable. Dans le réseau de mesure de l'Institut géographique de l'Université de Berne, huit à neuf nuits tropicales (nuits au cours desquelles la température ne descend pas en dessous de 20 °C) ont été enregistrées à l'été 2018 dans le centre-ville, contre seulement zéro à deux dans les environs.¹³

Cependant, le dernier été aussi extrême que 2018 ne remontait qu'à trois ans auparavant. En 2015, la Suisse avait en effet également été touchée par la sécheresse et la chaleur, les jardins avaient brunis et la chaleur avait été intense.⁴ A l'époque, l'Office fédéral de l'environnement avait aussi rédigé un rapport sur l'événement, qui avait été comparé avec l'été caniculaire de 2003. Des comparaisons ont également été faites et sont toujours faites avec un autre événement : l'été caniculaire et sec de 1947 (voir encadré).

Il y a exactement 75 ans – certains s'en souviennent peut-être encore –, l'Europe centrale fut frappée par un été caniculaire record. Les records de température de cet été-là⁵ n'ont été battus en maints endroits qu'en 2003 ou lors des vagues de chaleur de 2019. En Suisse aussi, certains des records établis en 1947 ont tenu jusqu'en 2003 (il faut toutefois noter que les mesures de l'époque étaient probablement influencées par le rayonnement et donc trop élevées). Parallèlement, l'été fut extrêmement sec en Suisse⁶, tout comme en 2018. A cela s'ajoute le fait que 1947 fut un été exceptionnel parmi toute une série d'étés secs. Les forêts ont souffert^{7,8,9} et les glaciers alpins ont fondu.¹⁰ Les rivières se sont asséchées (voir encadré ; à l'époque également, le lac des Brenets s'est asséché), avec des conséquences pour la production d'énergie et les transports. D'ailleurs, déjà à l'époque, on mettait en garde contre un changement climatique : une désertification provoquée par la déforestation.¹¹ En Allemagne, notamment, qui souffrait encore directement des conséquences de la guerre, l'été 1947 a eu des effets dévastateurs. Des documents sonores et visuels impressionnants témoignent de la situation en Suisse et en Allemagne.¹²

Comment de tels étés secs se produisent-ils ? Comment se forme une vague de chaleur ? Quelles en sont les conséquences pour l'homme et la société, pour l'agriculture et la sylviculture, pour nos glaciers ? Et à quoi devons-nous nous préparer pour l'avenir ? Le présent numéro apporte des réponses à ces questions.¹³ De brefs chapitres consacrés à des thèmes spécifiques mettent en lumière les processus en jeu et comparent les étés 2018, 2015, 2003 et 1947. Parallèlement, nous examinons la fréquence et l'intensité croissantes des étés caniculaires au cours des 150 dernières années et nous nous projetons dans le futur.

Dans le premier chapitre, nous comparons le semestre d'été 1947 avec les mesures disponibles depuis 1864. Nous montrons à quel point 1947 a été exceptionnellement chaud et sec et comment 1947 peut être comparé avec les événements de ces dernières décennies, fortement influencés par le changement climatique d'origine humaine. Dans le deuxième chapitre, nous examinons de plus près la dynamique atmosphérique, aux processus qui conduisent aux vagues de chaleur et à ce qui fait qu'une vague de chaleur se transforme en un été caniculaire.¹⁴ A une échelle un peu plus grande, le troisième chapitre explique comment l'océan et les processus atmosphériques à grande échelle influencent l'apparition de vagues de chaleur en Europe. Dans le quatrième chapitre, nous examinons comment la sécheresse et le déficit d'humidité des sols peuvent amplifier les vagues de chaleur. Nous nous penchons ensuite sur les conséquences de telles années extrêmes pour notre environnement. Quelles sont les conséquences des fortes chaleurs et des sécheresses sur l'agriculture et comment la population en a-t-elle souffert en 1947, comparé à aujourd'hui ? Quelles sont les conséquences de la chaleur et de la sécheresse sur les forêts et quelle est l'influence d'autres facteurs sur les quantités de bois endommagées par de telles années extrêmes ? Comment la chaleur a-t-elle impacté la fonte de nos glaciers ? Dans le neuvième chapitre, nous examinons comment les gens souffrent directement de la chaleur et comment cela peut être déduit de la surmortalité.¹⁵ Enfin, nous faisons une excursion dans le futur : combien de fois connaîtrons-nous à l'avenir des étés aussi extrêmes que ceux de 1947, 2003, 2015 ou 2018 ?

Ce cahier montre les conséquences des étés chauds et secs pour l'homme et la nature – des conséquences qu'il s'agit de maîtriser. Car il ne fait aucun doute que l'intensité et la fréquence des étés caniculaires vont augmenter. Ce cahier montre également de manière exemplaire qu'il y a 75 ans déjà, des domaines très différents de la société étaient concernés: santé, gestion des eaux, agriculture, forêts et glaciers. Finalement, l'été 1947 a été l'un des événements climatiques les plus lourds de conséquences du 20^e siècle. Nous pouvons en tirer des enseignements. On peut certes objecter que la situation était alors très différente. La transition vers l'économie d'après-guerre était encore en cours, la vulnérabilité de la société était bien plus grande et la dépendance vis-à-vis de l'agriculture plus forte. C'est peut-être vrai. Mais c'est précisément à cause de cela que nous pouvons tirer des enseignements aujourd'hui. Car aujourd'hui encore, et dans un avenir marqué par le changement climatique, il y aura des sociétés en situation de vulnérabilité, dans une phase de transition politique ou de dépendance économique. Et notre société compte également des personnes plus vulnérables, que nous devons protéger au maximum des conséquences des futurs étés caniculaires.

Ce cahier a été rendu possible grâce au volontariat spontané de ses auteurs. La production du cahier a été soutenue par la Fondation Sebastiana, par l'Académie suisse des sciences naturelles (la commission Atmospheric Chemistry and Physics ainsi que l'Association suisse de géographie) et par le Centre Oeschger pour la recherche climatique. Le cahier est publié simultanément en trois langues – un grand merci aux traducteurs.

Un film a également été produit à l'occasion du cahier et est disponible sur Youtube: www.giub.unibe.ch/1947



Fig. 1.3: Première page d'un article paru dans le Schweizer Illustrierte du 27 août 1947 sur les conséquences de «la grande sécheresse» de l'été 1947, notamment pour l'agriculture. Avec l'aimable autorisation des éditions Ringier Axel Springer Verlag

L'été caniculaire et sec de 1947 du point de vue des personnes concernées

Comment faut-il se représenter l'été 1947? Quelles en ont été les conséquences pour les hommes et les animaux? Qu'est-ce qui préoccupait les gens à l'époque, comment ont-ils vécu cet été? Pour ce numéro, nous avons interrogé différentes personnes qui ont vécu l'été 1947.

«La sécheresse a commencé en avril. Mais comme il avait fait assez humide auparavant, l'herbe ne souffrait pas encore beaucoup et on pouvait encore faire les foin. Puis la situation s'est aggravée», se souvient Rudolf Bachmann, un fils de paysan qui a grandi au Bantiger. D'autres difficultés se sont rapidement ajoutées à la sécheresse: les vers blancs abimaient les arbustes et les arbres. Il y avait peu de fourrage pour le bétail, les abattoirs étaient pleins. La chaleur était à peine supportable, et elle a duré une bonne partie de l'automne.

«On était heureux de faire du vélo, on portait des vêtements légers et on cherchait à se rafraîchir dans les bains de Berne», explique Hulda Eggenberg. «Mais à l'époque, les compartiments pour femmes et pour hommes étaient encore séparés». En tant que couturière dans un magasin de haute couture à Berne, ne pas transpirer des doigts était pour elle un grand problème.

«Mon père a acheté un tuyau d'arrosage américain Goodridge à l'été 1947. C'était quelque chose de spécial à l'époque», se rappelle Christian Röthlisberger. Le vin de 1947 a été un bon millésime, ajoute-t-il. Longtemps après, on en faisait encore l'éloge, même si la quantité produite avait été faible.

L'été caniculaire de 1947 a suivi les années de guerre marquées par les privations. En Allemagne, l'été 1947 a ainsi eu des conséquences particulièrement dramatiques. En Suisse, les conséquences ont été moins graves. Mais une autre année de privation s'ensuivit, bientôt suivie d'une autre année de sécheresse en 1949. Plusieurs des personnes interrogées ont comparé l'été 1947 à celui de 2018, ce qui correspond à de nombreux articles scientifiques de ce numéro.

Les entretiens menés pour ce cahier – sur 1947 et sur d'autres vagues de chaleur et autres anomalies climatiques – sont rassemblés dans un film (voir à gauche).

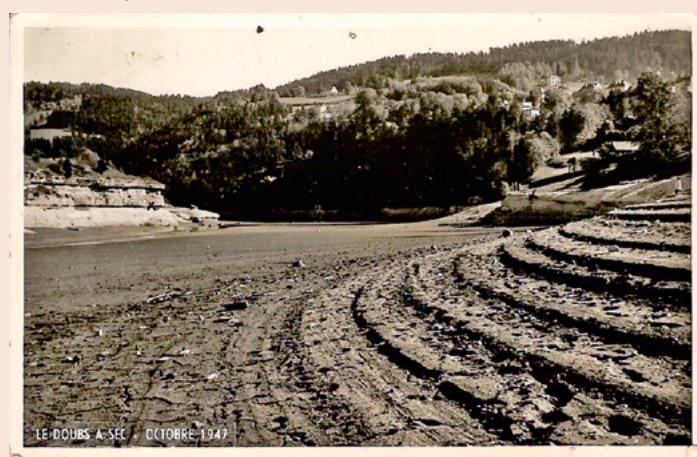


Fig. 1.4: Le Lac des Brenets asséché à l'été 1947 (Pascal Huguenin, Pontarlier).

L'été 1947 dans le contexte du changement climatique

La chaleur et la sécheresse du semestre d'été 1947 en Suisse furent uniques, particulièrement pour l'époque. L'apparition de cinq vagues de chaleur de mai à septembre, associée à une sécheresse massive sur le Plateau, est sans précédent dans les séries de mesures jusqu'à aujourd'hui. L'année 1947 reste jusqu'à aujourd'hui parmi les semestres d'été les plus chauds et reste le plus sec depuis 1864 dans le nord-ouest de la Suisse et le centre du Plateau. Cependant, la température et la chaleur du semestre d'été ont fortement augmenté au cours des dernières décennies en raison du changement climatique provoqué par l'homme. Ainsi, un semestre d'été normal aujourd'hui n'est que légèrement plus frais qu'en 1947. Les étés secs se sont également sensiblement multipliés au cours des dernières décennies.

Le changement climatique est en marche. En Suisse, la décennie 2011–2020 a déjà été plus chaude d'environ 2,5°C que la période préindustrielle 1871–1900.¹⁶ Les conséquences sont multiples: les glaciers fondent, il y a moins de neige, les précipitations et le cycle de l'eau changent, les mouvements de masse augmentent et les écosystèmes sont en danger.¹⁷ Nous situons ici le semestre d'été très exceptionnel de 1947^{5,18,19} à la lumière de l'histoire des mesures, qui s'étend maintenant sur près de 160 ans, et des événements de chaleur et de sécheresse estivales des vingt dernières années, fortement marqués par le changement climatique.

Températures et chaleur

La série chronologique des températures moyennes du semestre d'été sur l'ensemble de la Suisse montre le réchauffement impressionnant des 160 dernières années (fig. 2.1a).²⁰ Les semestres d'été sont aujourd'hui en moyenne plus de 2°C plus chauds que la moyenne préindustrielle de 1871 à 1900, une différence montant à 2,5°C à plus de 3,5°C pour les semestres extrêmes. On remarque en outre la phase chaude de la fin des années 1940, qui est surtout marquée par les trois semestres d'été chauds de 1945, 1947 et 1949. Alors que 1945 et 1949 ont été à peine 2°C plus chauds que la moyenne préindustrielle, 1947 se distingue par un écart de 3°C. Avec une moyenne de près de 12°C, il faisait alors environ 1,2°C de plus que ce qui avait été mesuré auparavant (à Genève et à Bâle depuis au moins 1753 et 1755), ce qui en fait un événement extrêmement rare.^{19,21} Après les étés caniculaires de 2018²² et 2003^{23,24}, 1947 est encore le troisième semestre d'été le plus chaud. Cependant, les semestres d'été sont aujourd'hui devenus largement plus chauds en raison du changement climatique dû aux activités humaines. Ainsi, douze semestres d'été après l'an 2000 ont dépassé 11°C en moyenne, alors que cette valeur n'a jamais été atteinte au cours des 137 années de 1864 à 2000, à l'exception de l'année 1947. Un semestre d'été aujourd'hui normalement chaud n'est plus que 0,8°C plus frais qu'en 1947.

Faiblesse des précipitations et sécheresse

En 1947, c'est surtout le Plateau suisse qui a été touché par un déficit extrême de précipitation et une sécheresse «catastrophique par endroits».^{7,18,19,25} Pour mettre ces valeurs en contexte, nous établissons une moyenne pour le Plateau suisse à partir des quatre séries de mesures homogènes à long terme de Bâle/Binningen, Berne/Zollikofen, Genève/Cointrin et Zurich/Fluntern. La série des précipitations sur le Plateau durant le semestre d'été (fig. 2.1b) est marquée par de grandes variations d'une année à l'autre et, contrairement à la température, ne présente pas de tendance claire à long terme. Avec seulement 52 pour cent des précipitations moyennes de la période 1871–1900, 1947 est le semestre d'été le moins pluvieux de la série de mesures de 158 ans comprise entre 1864 et 2021. Les années 1865, 1870, 1911 et 1949 sont également très peu pluvieuses, toutes avec 63 à 65 pour cent de la moyenne des précipitations préindustrielles. Les récents étés caniculaires de 2018 et 2003 ont été plus pluvieux, avec 69 et 70 pour cent.

Mais la sécheresse est plus qu'un manque de précipitations. Comme l'eau qui s'évapore n'est plus à la disposition de la végétation, l'augmentation de l'évaporation joue un rôle décisif dans la disponibilité de l'eau et dans les caractéristiques d'une sécheresse.²² Une mesure simple qui tient compte de l'évaporation est le bilan hydrique climatologique (précipitations moins évaporation potentielle, fig. 2.1c). Avec un déficit hydrique moyen de 330 mm, 1947 est clairement le semestre

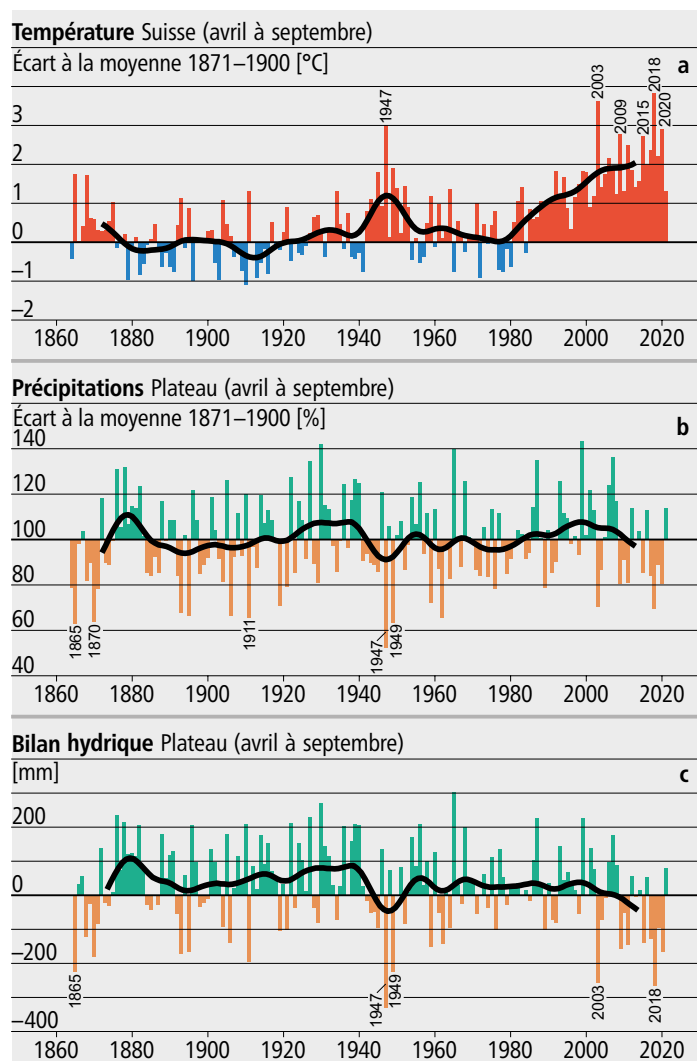


Fig. 2.1: a) évolution de la température suisse (écart en °C)²⁰, b) des précipitations sur le Plateau (écart en pourcentage) et c) du bilan hydrique climatologique (précipitations moins évaporation potentielle) sur le Plateau (en millimètres d'eau) au cours du semestre d'été (avril à septembre) depuis 1864. Les écarts (a et b) se rapportent à la moyenne préindustrielle de 1871 à 1900. Les cinq ou six semestres d'été les plus chauds/les plus faibles en précipitations/les plus secs sont respectivement indiqués. La courbe noire montre l'évolution lissée (lissage gaussien sur 20 ans). Plateau: une moyenne de quatre stations (voir texte). Données: MétéoSuisse.

d'été le plus sec dans la série de mesures de 158 ans. A première vue, la série du bilan hydrique évolue de manière similaire à la série des précipitations, mais de nettes différences apparaissent. Les années à faibles précipitations des dernières décennies progressent dans le classement du bilan hydrique, tandis que les années antérieures perdent du terrain. Ainsi, les étés caniculaires de 2018 et 2003, avec un déficit en eau d'environ 260 mm, font partie des trois plus secs, tandis que les semestres d'été pauvres en précipitations de 1911 et 1870 (3^e et 4^e rangs) ne font plus partie des cinq plus secs. Depuis l'an 2000, les semestres d'été secs se multiplient: sept années ont enregistré un déficit hydrique de plus de 100 mm. D'autres études montrent qu'au cours

des quarante dernières années, la légère diminution des précipitations et l'augmentation de l'évaporation ont contribué à peu près dans la même mesure à la multiplication observée des semestres d'été secs.²⁶

Caractéristiques régionales de la chaleur et de la sécheresse

En ce qui concerne la température moyenne, 1947 est le troisième semestre d'été le plus chaud après 2018 et 2003. Peut-il également rivaliser avec les étés les plus chauds de ces derniers temps en termes de chaleur ? Pour cela, nous considérons à titre d'exemple la fréquence de la chaleur sous forme du nombre de jours de canicule (fig. 2.2a) dans les quatre stations de Bâle/Binningen, Berne/Zollikofen, Genève/Cointrin et Zurich/Fluntern. Avec 26 à 43 jours de canicule selon les stations, 1947 peut en grande partie rivaliser avec les étés caniculaires récents, voire même les dépasser. Seule Genève/Cointrin a enregistré 50 jours de canicule en 2003, soit nettement plus qu'en 1947, où 34 jours de canicule avaient été enregistrés. Les vagues de chaleur de longue durée sont devenues nettement plus fréquentes au cours des dernières décennies.²¹ Ainsi, par exemple, les périodes de chaleur de dix jours avec une température maximale quotidienne moyenne de 30°C ou plus se succèdent aujourd'hui en Suisse romande à de courts intervalles d'un à deux ans.

La sécheresse peut être très différente d'une région à l'autre. C'est ce que montre l'évaluation du bilan hydrique dans les quatre stations du Plateau suisse, également pour l'année 1947 (fig. 2.2b). À Bâle/Binningen, un déficit en eau de plus de 460 mm a été enregistré. À Berne/Zollikofen et Zurich/Fluntern également, 1947 est clairement le semestre d'été le plus sec jamais mesuré, avec des déficits respectifs de 330 et 285 mm. À Genève/Cointrin en revanche, 1947 n'arrive qu'en quatrième position des semestres d'été les plus secs. Dans certaines parties de la Suisse orientale également, 2018 a été nettement plus sec que 1947.²² En 1947, le nord-ouest de la Suisse et le centre du Plateau ont donc été particulièrement touchés par la sécheresse (voir aussi fig. 2.1), où 1947 est à ce jour le semestre d'été le plus sec 1864.

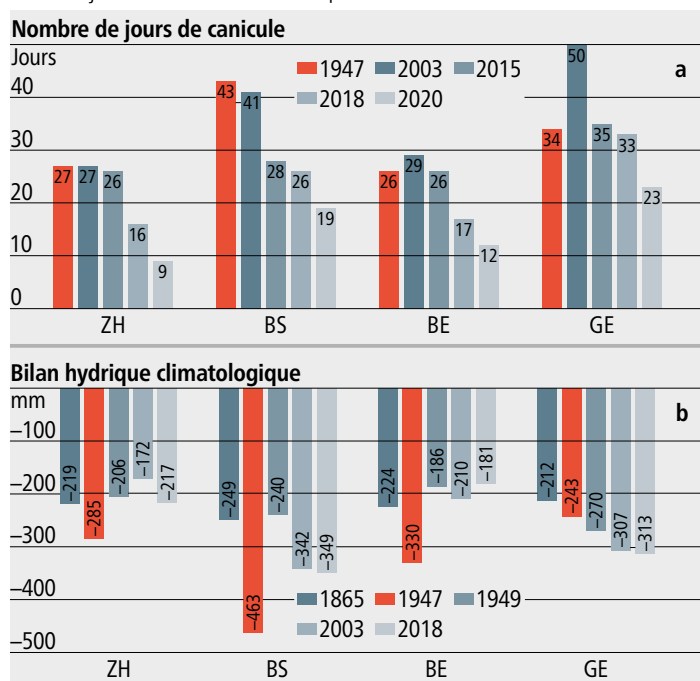


Fig. 2.2: a) nombre de jours de canicule pour les cinq semestres marqués par la canicule en 1947 (rouge), 2003 (bleu foncé), 2015 (bleu), 2018 (bleu moyen) et 2020 (bleu clair) ainsi que b) le bilan hydrique climatologique (précipitations moins évaporation potentielle en millimètres) des cinq semestres d'été très secs de 1865 (bleu foncé), 1947 (rouge), 1949 (bleu), 2003 (bleu moyen) et 2018 (bleu clair) pour les quatre stations de Zurich/Fluntern (ZH), Bâle/Binningen (BS), Berne/Zollikofen (BE) et Genève/Cointrin (GE).

« Le semestre d'été très exceptionnel de 1947 »

Le semestre d'été 1947 s'est caractérisé par « beaucoup de soleil, des températures élevées, peu de nuages et de précipitations ».¹⁸ Il y a eu une succession remarquable et unique depuis 1864 jusqu'à aujourd'hui de cinq vagues de chaleur, réparties sur tout le semestre d'été (voir fig. 2.3).⁵ La première s'est produite de fin mai à début juin. Une deuxième courte a suivi fin juin. La troisième, la plus chaude et la plus longue (14 jours), a duré du 22 juillet au 4 août et a atteint une température maximale moyenne journalière de 35,0°C à Bâle. Une quatrième vague de chaleur d'environ huit jours a eu lieu à la mi-août, suivie d'une cinquième vague de chaleur de neuf jours à partir du 11 septembre. Pour le semestre d'été, il en résulta un excédent de chaleur de 2,5 à 3,5°C par endroits par rapport à la moyenne préindustrielle de 1871 à 1900, avec les plus grands écarts dans les parties occidentales et centrales de la Suisse.

Outre la chaleur, le semestre d'été 1947 se distingua surtout par le manque prononcé de précipitations au nord des Alpes.^{18,19,27} Sur le Plateau, il ne tomba d'avril à septembre que 300 à 400 mm de précipitations sur une grande partie du territoire (fig. 2.4), ce qui correspond à environ la moitié des précipitations habituelles. Dans une bande allant du lac de Neuchâtel à Schaffhouse, il y eut moins de 300 mm, et même seulement 200 mm dans la région de Bâle.²⁸ La faiblesse des précipitations, combinée aux températures élevées, a entraîné une sécheresse marquée, « très exceptionnelle et très impressionnante ». Parmi les conséquences, il y eut des pertes massives dans l'agriculture^{25,28} (voir page 16), des pénuries d'eau chez les distributeurs d'eau urbains ainsi qu'une diminution de la production d'électricité.¹⁹

Vagues de chaleur 1947 (Bâle/Binningen)

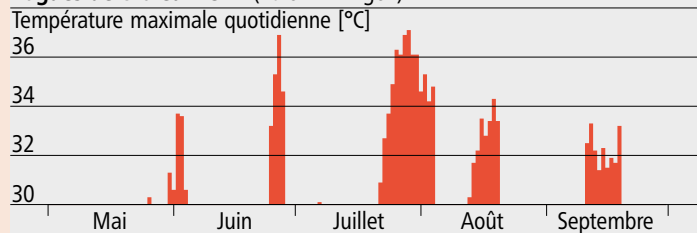
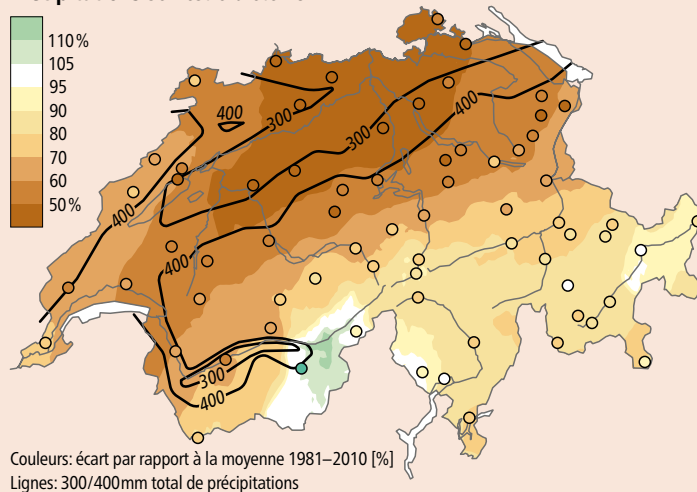


Fig. 2.3: Les cinq vagues de chaleur marquées de mai à septembre 1947 (exemple de la station de Bâle/Binningen). En rouge, les températures des jours où la température maximale quotidienne est supérieure ou égale à 30°C

Précipitations semestre d'été 1947



Couleurs: écart par rapport à la moyenne 1981–2010 [%]
Lignes: 300/400mm total de précipitations

Fig. 2.4: Cartes des précipitations reconstituées pour le semestre d'été 1947.²⁹ Les écarts par rapport à la moyenne 1981–2010 sont indiqués en pourcentage (couleurs) ainsi que les isolignes des totaux de précipitations de 300 et 400 mm (lignes noires en gras)

Dynamique: d'une parcelle d'air chaud à un été caniculaire

Dans cet article, nous faisons la lumière sur la formation des vagues de chaleur à différentes échelles spatiales et temporelles. En commençant par une parcelle d'air individuelle, nous nous demandons comment l'air change de température, dans quels systèmes météorologiques les vagues de chaleur se développent, et comment les vagues de chaleur individuelles peuvent conduire à une saison extrême. En outre, nous résumons les caractéristiques les plus importantes de la dynamique atmosphérique de l'été caniculaire de 1947.

Comment l'air change-t-il de température ?

Notre voyage à travers les échelles spatiales et temporelles d'une vague de chaleur commence au niveau d'une parcelle d'air individuelle. Nous pouvons prendre, par exemple, celle qui se trouvait à environ 100 mètres au-dessus de Berne à 14 heures le 13 août 2003, et dont la température était d'au moins 30°C à ce moment-là. Pour comprendre comment cette parcelle d'air a pu devenir aussi chaude, la dynamique atmosphérique s'intéresse souvent au chemin que décrit cette parcelle lors de son passage dans l'atmosphère. Ce chemin est appelé « trajectoire ». Si vous suivez une parcelle d'air le long de sa trajectoire, sa température varie d'une part en raison des changements de pression résultant de la descente ou de la montée et entraînant sa compression ou sa dilatation (changements de température dits « adiabatiques »). D'autre part, la température d'une parcelle d'air varie en raison du rayonnement, de la turbulence ou des transformations de phase de l'eau qu'elle contient (par exemple, la condensation de la vapeur d'eau), qui sont des variations de température dites « diabatiques ».

Les figures 3.1a et 3.1b montrent cette interaction des processus adiabatiques et diabatiques pour la parcelle d'air qui se trouvait au-dessus de Berne à 14 heures le 13 août 2003 (trajectoire colorée dans fig. 3.1a). Le 3 août, cette masse d'air se trouvait encore au-dessus de 600hPa (environ 4500m d'altitude) au-dessus de l'Atlantique, puis elle est progressivement descendue à 800hPa lors de son passage sur l'Atlantique Est et l'Angleterre jusqu'au 8 août. Au cours de ce processus, la parcelle d'air s'est réchauffée de 20°C, car les périodes de forte descente sont également associées à de fortes augmentations de température (fig. 3.1b). Lors des trois derniers jours avant l'arrivée à Berne, la masse d'air s'est trouvée près du sol, c'est-à-dire dans le kilomètre inférieur de l'atmosphère. Pendant cette période, le profil de température s'est découpé du profil de pression, car les processus diabatiques influençaient désormais fortement la température et la parcelle d'air ne se déplaçait presque plus verticalement. Le motif en dents de scie de la courbe de température de la figure 3.1b montre un cycle diurne, la masse d'air étant chauffée le jour et refroidie la nuit par rayonnement, les flux de chaleur sensible et la turbulence.

En Europe centrale, l'air au niveau du sol est chauffé pendant les vagues de chaleur à la fois par la subsidence et par des processus diabatiques.^{30,31} L'air de la vague de chaleur au niveau du sol vient principalement du nord-ouest au nord-est et seulement dans de rares cas des régions climatologiquement plus chaudes.³¹ Ceci est illustré par les trajectoires des parcelles d'air qui ont atteint Berne entre le 6 et le 13 août 2003, provenant principalement du nord-est et se trouvant encore au-dessus de l'océan Atlantique quelques jours auparavant (fig. 3.1a). Lorsque des parcelles d'air provenant des régions méridionales atteignent l'Europe centrale, elles glissent généralement au-dessus de l'air plus froid de cette région et atteignent donc rarement le niveau du sol.

Échelle synoptique

L'apparition et le lieu des vagues de chaleur sont liés à la circulation à l'échelle synoptique (c'est-à-dire la circulation à grande échelle sur plusieurs milliers de kilomètres) dans la moyenne et la haute troposphère (5000–12000 m d'altitude). À ces hauteurs se trouve le courant-jet, une bande de vents forts qui serpente d'ouest en est. Les méandres du courant-jet, appelés « ondes de Rossby », contrôlent l'apparition de zones de haute et de basse pression et déterminent donc dans une large mesure l'évolution de la température au sol. Cette relation est illustrée par la figure 3.2a–c, qui montre le courant-jet à 300hPa (vecteurs de vent), les anomalies de température au sol et la pression au niveau de la mer

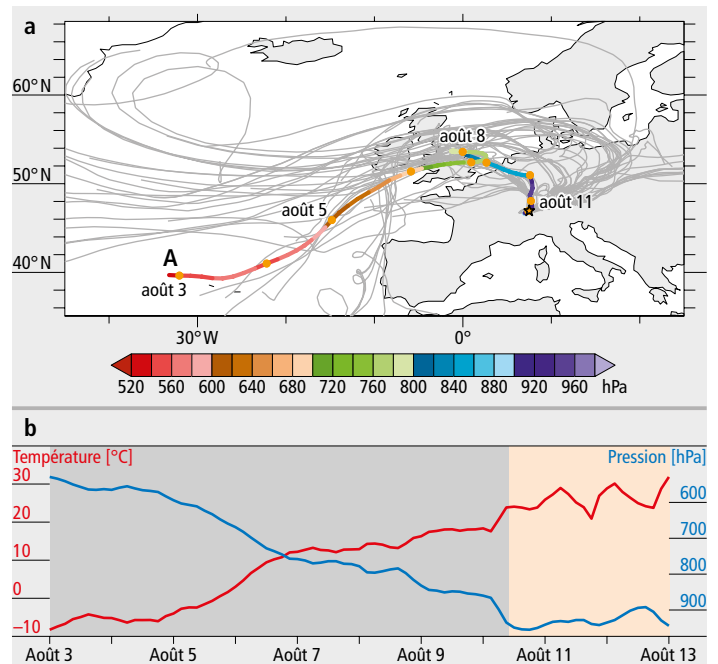


Fig. 3.1 : a) Trajectoires des parcelles d'air qui sont arrivées à Berne de 6 au 13 août 2003 à environ 100m au-dessus du sol (en gris).^{46,47} La trajectoire de la parcelle d'air avec une heure d'arrivée à 14 heures le 13 août (le jour le plus chaud de l'été à Berne) est colorée par la pression respective. b) Évolution de la pression (bleu) et de la température (rouge) de la parcelle d'air A.

pendant trois jours de l'été 1947. Les anomalies de température positives les plus importantes de ces trois jours en Europe occidentale se trouvent dans la partie centrale et orientale d'une « crête », qui est la région où le courant-jet décrit une déviation vers le nord. En revanche, les anomalies de température négatives plus à l'est sont situées sous un « creux », c'est-à-dire sous une déviation du courant-jet vers l'équateur. Dans la partie centrale et orientale de la crête, des anomalies de température positives se produisent, car dans la zone de haute pression qui s'y trouve, l'air près du sol et dans la troposphère moyenne descend sur une grande surface en étant chauffé de manière adiabatique. Ce réchauffement entraîne également un ciel sans nuages, car les gouttelettes des nuages et les cristaux de glace s'évaporent ou fondent et se subliment pendant l'affaissement. L'affaissement conduit donc également à un rayonnement solaire plus fort, qui réchauffe de manière diabatique l'air près du sol.³²

Si une crête se trouve au-dessus d'une région pendant une période particulièrement longue, cela favorise le développement de vagues de chaleur, car l'air proche du sol peut s'y réchauffer pendant des jours.³¹⁻³⁴ Cela se produit souvent lorsque les ondes de Rossby atteignent une extension particulièrement importante dans la direction nord-sud, réduisant ainsi leur vitesse et se déformant fortement³⁵ (on parle de rupture des ondes de Rossby). De telles crêtes peuvent rester stationnaires pendant des jours et parfois même des semaines (on parle alors de « blocs » ou de « blocages anticycloniques »).³⁶ En Europe centrale et septentrionale, les vagues de chaleur se produisent en majorité en relation avec des blocs.³² Lors des vagues de chaleur de l'été 1947, de tels blocages anticycloniques se trouvaient également au-dessus de l'Europe (lignes vertes de la fig. 3.2a–c).

De la vague de chaleur à un été extrêmement chaud

Les vagues de chaleur individuelles sont donc fortement liées aux sys-

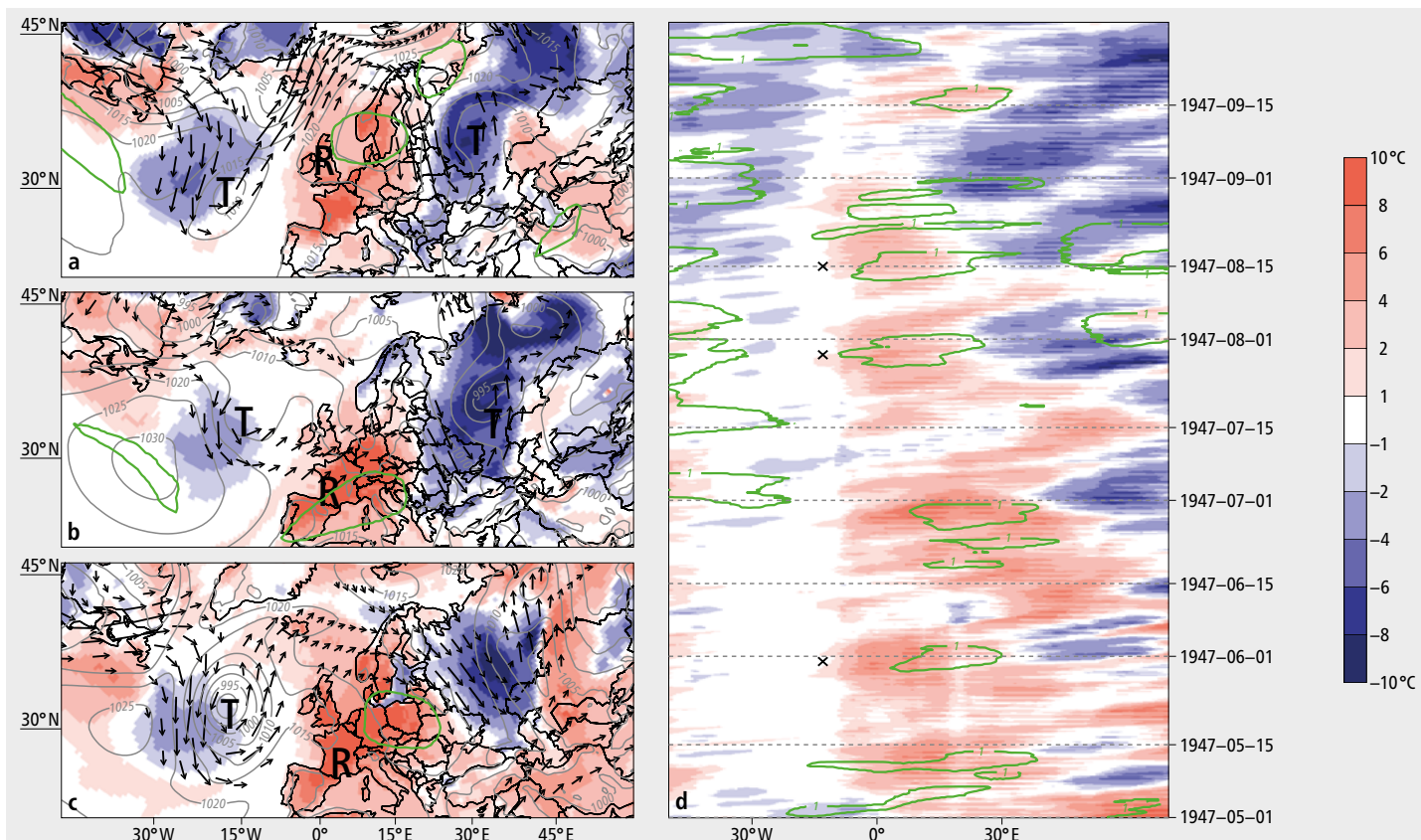


Fig. 3.2: a–c) Situation météorologique pendant trois jours de chaleur le 31 mai (a), le 29 juillet (b) et le 15 août (c) 1947 à 14 heures, heure locale. Les anomalies de température sont calculées par rapport à la climatologie quotidienne de 1931–1960 à 14 heures (couleurs). Les flèches de vent indiquent les endroits où le courant-jet a une vitesse supérieure à 18 m/s à une altitude de 300 hPa. La pression au sol (en hPa) est représentée par des contours gris. Les contours verts montrent la position des blocs.⁴⁸ Les creux et les crêtes sont étiquetés T et R. d) Représentation longitude-temps de l'été (mai à septembre) 1947 avec les anomalies horaires de température moyennées sur 35°–65°N (couleurs) et les blocs (lignes vertes). Les trois croix indiquent les instants représentés dans la colonne de gauche. Les données proviennent de la réanalyse 20crv3.⁴⁹

tèmes météorologiques à l'échelle synoptique. Mais comment des vagues de chaleur individuelles peuvent-elles conduire à tout un été extrêmement chaud? Il est difficile de répondre scientifiquement à cette question, car depuis que les données météorologiques sont collectées à grande échelle, il n'y a eu qu'un nombre limité d'extrêmes de chaleur saisonniers en chaque lieu. Cependant, il est clair que la durée et l'organisation temporelle des vagues de chaleur jouent un rôle clé. Au cours des étés extrêmement chauds de 2003 et 2018 en Europe, ainsi qu'en 2010 dans l'ouest de la Russie, plusieurs vagues de chaleur, dont certaines

furent particulièrement persistantes, se sont produites³⁷⁻⁴¹ et ont été associées à des blocs de longue durée, notamment au cours de l'été 2010 dans l'ouest de la Russie.^{40,42} Un tel bloc de longue durée est généralement renforcé à plusieurs reprises par des crêtes qui se forment à l'ouest du bloc et sont absorbées par celui-ci.^{36,43,44} En outre, l'accumulation répétée de crêtes (même sans bloc) peut entraîner des vagues de chaleur particulièrement longues.⁴⁵ L'apparition groupée dans le temps de blocs et de crêtes est influencée par ce que l'on appelle les téléconnexions, des connexions climatiques entre des zones très éloignées les unes des autres.

Un été avec de nombreux blocs sur l'Europe

Entre mai et septembre 1947, plusieurs vagues de chaleur d'une intensité inhabituelle se sont succédées. Les anomalies de température moyennes entre 35°N et 65°N (fig. 3.2d) ont presque été fortement positives sans discontinuer entre mai et septembre et interrompues seulement par de courts épisodes avec des températures moyennes. Des blocs ont été enregistrés à plusieurs reprises sur l'Europe tout au long de l'été. Selon la région, leur fréquence au cours de l'été 1947 était jusqu'à trois fois supérieure à la moyenne pour ces mêmes mois au cours de la période 1931–1960 (fig. 3.3a; le terme « fréquence » signifie ici pour chaque point de grille le pourcentage de l'été 1947 où des blocs se sont produits). Cette fréquence peut s'expliquer par le fait qu'un schéma de circulation à grande échelle similaire a été établi à plusieurs reprises, avec une crête sur l'Europe (fig. 3.2a–c). L'apparition répétée de ce schéma de circulation a conduit à l'apparition d'un nombre particulièrement important de blocs différents, selon la région jusqu'à quatre blocs de plus que dans la moyenne des années 1931–1960 (fig. 3.3b). Cela montre que l'organisation temporelle de

ces blocs (c'est-à-dire leur répétition dans un intervalle de temps relativement court) a pu jouer un rôle décisif dans l'été caniculaire de 1947.

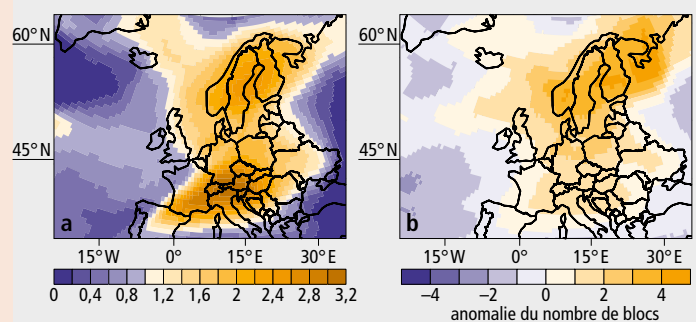


Fig. 3.3: a) Rapport entre la fréquence des blocs en été 1947 (mai à septembre) et la climatologie de 1931 à 1960. b) Anomalie du nombre de blocs par rapport à la climatologie de 1931 à 1960 [mêmes mois qu'en (a)].

Rôle de l'océan et de la circulation à grande échelle lors des vagues de chaleur en Europe centrale

Les océans, mais aussi la circulation atmosphérique à grande échelle, exercent une influence considérable sur les vagues de chaleur en Europe et les systèmes météorologiques associés. Des températures aussi bien anormalement froides qu'anormalement chaudes à la surface de l'Atlantique Nord sont liées à l'apparition de vagues de chaleur en Europe centrale. Dans cet article, nous examinons l'influence de ces températures et celle de la circulation atmosphérique dans la haute troposphère sur l'apparition des vagues de chaleur.

Interaction atmosphère-océan

Comment les changements de température de surface des océans affectent-ils l'atmosphère ? Des expériences menées à l'aide de modèles climatiques montrent qu'une anomalie négative de la température de surface de la mer, c'est-à-dire une température plus froide que d'habitude, crée une anomalie de pression positive, c'est-à-dire une zone de haute pression, dans la basse troposphère sus-jacente. Une anomalie de pression négative, c'est-à-dire une zone de basse pression, se développe en même temps dans la haute troposphère (7000–12 000 m d'altitude).⁵⁰ Toutefois, ce comportement général de l'atmosphère est modifié aux latitudes moyennes par les phénomènes dépressionnaires. Par phénomènes dépressionnaires, on entend des zones de basse pression se déplaçant d'ouest en est, portées par une circulation de vent d'ouest prévalente aux moyennes latitudes. Des études théoriques montrent qu'en raison de cette activité dépressionnaire, une zone de basse pression stationnaire et indépendante de l'altitude se forme en aval, c'est-à-dire à l'est, de l'anomalie négative de température de surface (fig. 4.1a).⁵¹ Dans le cas où cette anomalie se trouve au nord de l'océan Atlantique Nord, la zone de basse pression stationnaire se forme au large des îles britanniques. Le long de son flanc ouest, cette zone de basse pression pousse alors vers le sud de l'air froid provenant des régions polaires, renforçant ainsi l'anomalie négative de température (fig. 4.1b). On assiste donc à un renforcement mutuel de ces deux mécanismes. Une dorsale anticyclonique se forme également à l'est de la zone de basse pression. Ce processus représente donc l'une des façons dont les anticyclones peuvent se former au-dessus de l'Europe, pouvant par la suite déclencher des vagues de chaleur en Europe centrale⁵² selon un mécanisme détaillé en page 10. L'analyse de la vague de chaleur de 2015 a montré qu'une forte anomalie négative de température de surface dans le nord de l'océan Atlantique Nord avait joué un rôle clé, mais des anomalies de température négatives similaires à celles associées aux vagues de chaleur se produisent également d'autres années.⁵³ Les auteurs constatent qu'une anomalie très négative de la température de surface de la mer dans l'océan Atlantique Nord influence la circulation atmosphérique de telle sorte que le courant-jet dans la troposphère moyenne et supérieure (5000–12 000 m d'altitude) devient fixe, permettant à une crête de haute pression de se former sur l'Europe.

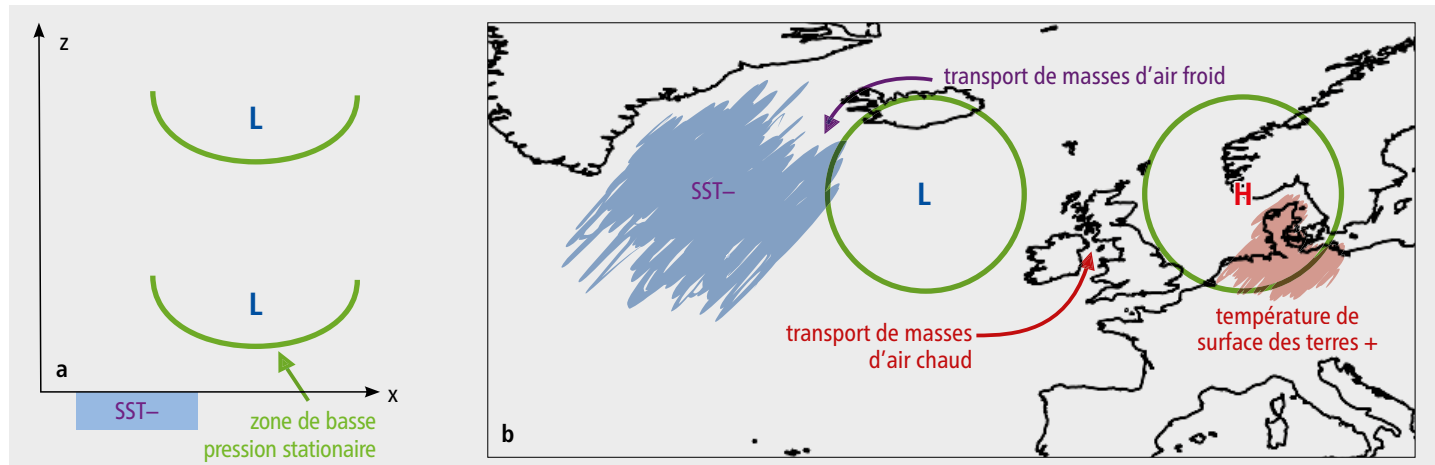


Fig. 4.1: Schémas: a) influence d'une anomalie négative de température de surface de la mer (SST) sur la distribution verticale de la pression atmosphérique et b) distribution horizontale de la température de surface de la mer et de la pression atmosphérique avec transport de masses d'air froid et chaud. b) illustration de l'interaction mutuellement renforcée entre l'océan et l'atmosphère.

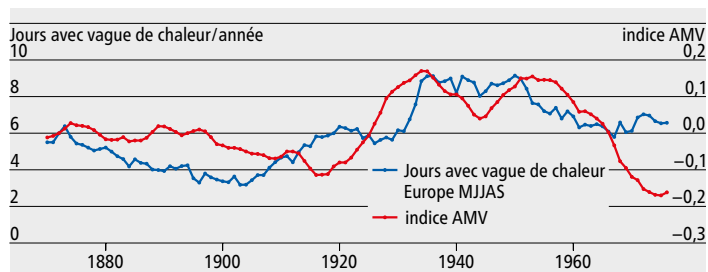


Fig. 4.2: Jours avec vague de chaleur sur l'Europe (climatologie 1850–1900 représentative de la période préindustrielle) et indice de la variation multidécennale de l'océan Atlantique⁵⁹ (moyenne mobile sur 10 ans dans les deux cas). Les données de température sont issues de la réanalyse 20crv3.⁴⁹

Une étude a également établi un lien entre la variation multidécennale de la température de surface de la mer dans l'océan Atlantique Nord (Atlantic Multidecadal Variability, AMV) et les vagues de chaleur en Europe.⁵⁴ Par « variation multidécennale », on entend ici des fluctuations de la température de surface de la mer qui persistent sur plusieurs décennies. Dans ce cas, les auteurs ont établi que c'était la température de surface de la mer dans le centre-ouest de l'océan Atlantique Nord qui jouait un rôle important, et non celle dans le nord de l'océan Atlantique Nord. Ils décrivent une relation entre des températures de surface de la mer plus élevées que d'habitude (une anomalie positive de l'AMV) et un nombre accru de jours de canicule en l'Europe centrale (fig. 4.2). Cette anomalie positive de surface dans le centre-ouest de l'Atlantique Nord provoque un flux de chaleur de l'océan vers l'atmosphère, ce qui crée une anomalie de pression négative à l'est de la source de chaleur. Celle-ci peut alors engendrer chaleur et sécheresse en Europe centrale selon le processus décrit ci-dessus. La figure 4.3 confirme statistiquement cette relation : une corrélation positive est observée entre la température de surface de la mer dans l'océan Atlantique nord-ouest et les jours de vague de chaleur en Europe, tandis qu'une corrélation négative est observée dans le nord de l'Atlantique Nord.

Nous constatons donc que les deux processus décrits, une anomalie de la température de surface de la mer dans le nord de l'Atlantique

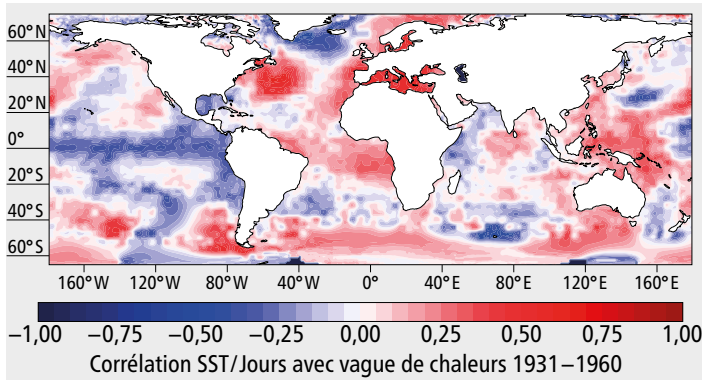


Fig. 4.3: Corrélation entre le nombre de jours avec vague de chaleur (climatologie 1850–1900 représentative de la période préindustrielle) en Europe (entre 10°O–40°E et 30–75°N) et la température de surface de la mer (mai–septembre). Les températures de surface de la mer proviennent de HadISST.⁶⁰

Nord et une autre dans l'Atlantique Nord centre-ouest, peuvent entraîner des vagues de chaleur et des sécheresses. Cependant, les analyses statistiques montrent également que nous ne pouvons pas savoir lequel des deux processus joue le rôle dominant.

Influence de la couverture de glace marine

Outre l'influence de la température de surface de la mer, une diminution de la couverture de glace marine et de la couverture neigeuse en Eurasie est également associée à une augmentation des vagues de chaleur en Europe.⁵⁵ L'affaiblissement du gradient de température méridional, c'est-à-dire nord-sud, dans l'océan Atlantique Nord et au-dessus de l'Eurasie diminue en effet l'activité dépressionnaire aux moyennes latitudes et rend le courant-jet beaucoup plus sinueux. Une diminution de l'activité dépressionnaire signifie que moins de zones de basse pression passent au-dessus de l'Europe. Combinée aux méandres plus prononcés du courant-jet, cette diminution entraîne l'apparition plus fréquente de blocs, le deuxième phénomène, qui est évoqué à la page 10 en relation avec les vagues de chaleur.

Mécanismes d'amplification dans la haute troposphère

Un autre processus susceptible de favoriser la formation de vagues de chaleur en Europe repose sur un mécanisme d'amplification dans la haute troposphère, c'est-à-dire là où se trouve le courant-jet.⁵⁶ Ce mécanisme repose sur le comportement de certaines ondes atmosphériques dans la haute troposphère (7000–12000m d'altitude) appelées ondes planétaires stationnaires (localisées). Il s'agit d'ondes qui s'étendent sur l'ensemble du globe, créant une séquence de zones de haute et de basse pression, qui n'ont normalement qu'une faible amplitude (c'est-à-dire dont les anomalies de pression sont faibles). Dans certaines conditions, ces ondes atmosphériques stationnaires peuvent être piégées dans le guide d'ondes des moyennes latitudes, entraînant une résonance et donc une amplification de ces ondes (c'est-à-dire une amplification des anomalies de pression). Un guide d'ondes est essentiellement un fort courant de vent orienté ouest-est, qui guide le mouvement des ondes individuelles d'ouest en est. Ce mécanisme a été étudié en lien avec les vagues de chaleur en Europe, et il s'avère qu'il a joué un rôle important pour la vague de chaleur de 2018.⁵⁷ Les ondes se retrouvent tout particulièrement piégées et amplifiées lorsque le courant-jet se divise en deux bandes, une au nord et l'autre au sud.⁵⁸ C'était notamment le cas lors de la vague de chaleur de 2018, où une zone de haute pression stationnaire s'était formée au-dessus de l'Europe grâce à ce processus d'amplification.⁵⁷

Un océan Atlantique Nord froid durant l'été 1947 et 2015

L'été 1947 a été caractérisé par un fort refroidissement de l'océan Atlantique Nord (fig. 4.4). Ce refroidissement est comparable à la situation de 2015 aussi bien par son amplitude (environ 1,5°C) que par sa position et son étendue (fig. 4.5).⁵³ Ce refroidissement semble être lié à une zone de basse pression qui se trouvait quelque peu en aval de celui-ci (voir fig. 3.2). Cette similitude avec 2015 suggère que l'interaction entre atmosphère et océan décrite ci-dessus a dû également jouer un rôle important dans la formation de l'été chaud de 1947. Les années 1940 ont aussi été caractérisées par une phase positive de l'AMV (fig. 4.2), qui peut également avoir contribué à l'augmentation de la sécheresse et de la chaleur sur l'Europe, comme décrit ci-dessus.

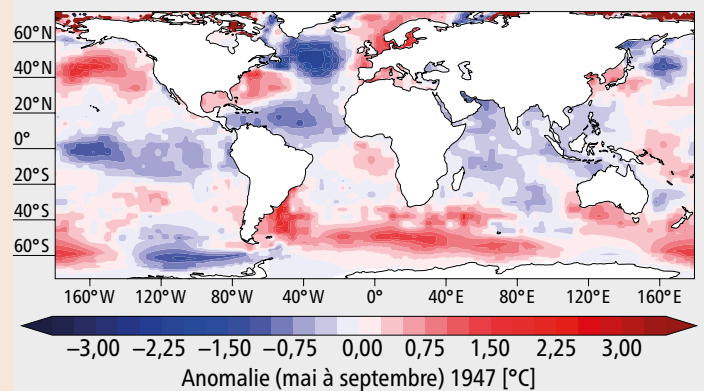


Fig. 4.4: Anomalie de température de surface de la mer pour les mois d'été de 1947 (mai–septembre) par rapport à la moyenne de 1931–1960. Les températures de surface de la mer proviennent de HadISST.⁶⁰

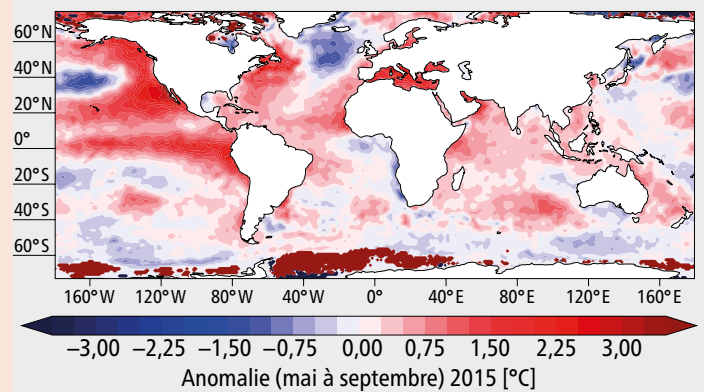


Fig. 4.5: Anomalie de température de surface de la mer pour les mois d'été de 2015 (mai–septembre) par rapport à la moyenne de 1991–2020. Les températures de surface de la mer proviennent de HadISST.⁶⁰

Les interactions sécheresse – chaleur entraînent des étés caniculaires en Europe

Les canicules estivales en 1947 en Suisse étaient accompagnées par une longue période de sécheresse qui a affecté l'Europe centrale entre 1945 et le début des années 1950 environ. Cette concomitance de sécheresses sévères et de canicules est une caractéristique que l'on retrouve dans les canicules plus récentes de 2003 et 2018 en Europe, qui furent associées à des impacts majeurs sur la société, les écosystèmes et l'économie, tels que la surmortalité liée aux canicules et les pertes de rendement dans l'agriculture.^{3,61-63} Cette concomitance de sécheresses et de canicules sera explorée dans le chapitre suivant.

Mécanismes de développement des canicules

En Europe et aux moyennes latitudes plus largement, les canicules sont généralement liées à des anomalies de circulation atmosphérique, en particulier les anti-cyclones stationnaires (voir page 10)^{37,52,64,65}, et peuvent être renforcées par des rétroactions surface – atmosphère souvent en lien avec l'assèchement des sols.^{66,67} L'humidité du sol, c'est-à-dire l'eau contenue dans le sol, peut influencer le climat via le bilan en énergie à la surface, qui est fonction du rayonnement incident et renvoyé (réfléchi et émis) par la surface. Le rayonnement net à la surface peut être décrit comme la somme du flux de chaleur sensible, du flux de chaleur latente et du flux géothermique. Le flux de chaleur sensible décrit le flux d'énergie qui chauffe l'air (et que l'on peut ressentir comme température), alors que le flux de chaleur latente correspond lui au flux d'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau à la surface et aussi à la transpiration des plantes (appelée évapotranspiration). Les sols secs peuvent conduire à une réduction du flux de chaleur latente, associée à une augmentation du réchauffement de la surface, donc du réchauffement et de l'assèchement de l'air, avec moins de nuages et de précipitations (fig. 5.1). Les régions peuvent être caractérisées par un régime d'humidité des sols sec, humide ou transitoire, en fonction de la fraction du rayonnement net qui est utilisée pour l'évapotranspiration, appelée fraction évaporative.^{68,69}

Dans le régime sec (les déserts par exemple), l'humidité du sol est proche du point de flétrissement. Ce qui signifie que les plantes ne peuvent plus extraire d'eau du sol et que l'évaporation est nulle. L'évapotranspiration est influencée par l'humidité du sol, mais de manière marginale lorsque les sols sont secs. Un tel régime est appelé régime « limité par l'eau ». Dans le régime transitoire, la répartition de l'énergie disponible est influencée par l'humidité du sol et l'évaporation dépend fortement de la disponibilité en eau dans le sol. Les régions en régime transitoire sont par conséquent des points chauds pour les rétroactions humidité du sol – atmosphère (voir section suivante). Des régions typiques du régime transitoire sont l'Afrique équatoriale ou l'Inde. Dans le régime humide, l'humidité dans le sol est au-delà d'une valeur critique: il y a assez d'eau disponible pour l'évaporation et l'évapotranspiration. C'est donc le rayonnement net qui contrôle l'évapotranspiration, le régime est dit « limité par l'énergie ». L'Europe centrale et du nord, incluant la Suisse, est typique-

ment en régime humide.^{68,70,71} Au cours des mois de printemps et d'été, ces régions peuvent toutefois entrer dans le régime transitoire, dans lequel des rétroactions humidité du sol – atmosphère peuvent être présentes.⁷¹

Rétroactions humidité du sol – atmosphère

Les rétroactions humidité du sol – atmosphère peuvent intensifier les canicules estivales en Europe^{67,70}. Une diminution de l'humidité du sol réduit le flux de chaleur latente ou de l'évapotranspiration (fig. 5.1 flèche noire au centre). Il y a par conséquent plus d'énergie disponible pour la chaleur sensible qui conduit à une augmentation de la température à proximité de la surface (flèche rouge vers le haut). Cette élévation de température augmente la demande en eau de l'atmosphère car un air plus chaud peut contenir 7 pour cent de plus de vapeur d'eau par degré de réchauffement (d'après la loi de Clausius-Clapeyron). Ceci augmente donc le flux de chaleur latente (flèche rouge vers le bas). C'est ce qu'on appelle la « boucle de rétroaction positive humidité du sol – température ».

L'humidité du sol peut aussi influencer les précipitations (fig. 5.1, flèches bleues). Une diminution de l'humidité du sol réduit le flux de chaleur latente (fig. 5.1, flèche noir au centre). Ceci peut conduire à une diminution des nuages et précipitations (flèche bleue montante). On peut le résumer comme la boucle de rétroaction positive humidité du sol – précipitations. Un tel couplage positif entre le flux de chaleur latente et les précipitations peut être trouvé dans les observations et les simulations des modèles climatiques à des échelles journalières à mensuelles.⁷³⁻⁷⁷ Cette boucle de rétroaction humidité du sol – précipitations peut aussi in fine contribuer à augmenter la température de l'air car un déficit de précipitations peut être associé à une diminution de l'humidité du sol, qui à son tour peut augmenter le flux de chaleur sensible et donc les températures à proximité de la surface. Comme l'humidité du sol est susceptible de changer avec le réchauffement climatique, ceci influencera l'évolution future des canicules.

Canicules futures

Les projections climatiques suggèrent que les canicules estivales en Europe seront plus fréquentes, plus longues et plus intenses au cours du 21^e siècle à cause du réchauffement climatique.^{64,72,78-80} Les rétroactions humidité du sol – atmosphère contribueront de manière significative à ces augmentations prévues pour les températures extrêmes aux moyennes latitudes.^{67,81,82} Les projections indiquent que la température durant les jours les plus chauds de l'année augmentera de plus de 9°C en Europe centrale à la fin du 21^e siècle suivant un scénario de statu quo (émissions élevées) en prenant en compte les rétroactions humidité du sol – atmosphère (fig. 5.2a), alors que cette augmentation ne serait que de 5 °C en les négligeant (fig. 5.2b).⁸³ Ces rétroactions humidité du sol – atmosphère peuvent expliquer jusqu'à 75 pour cent de l'amplification du réchauffement des températures caniculaires extrêmes au-delà de la température moyenne globale.⁸³

Par conséquent et particulièrement en Europe, il est prévu que les étés caniculaires associés à de graves sécheresses deviennent plus probables dans un climat qui se réchauffe.^{82,84} De même pour la Suisse, les simulations des modèles climatiques indiquent des étés plus chauds et secs, avec moins de précipitations, moins d'évapotranspiration et

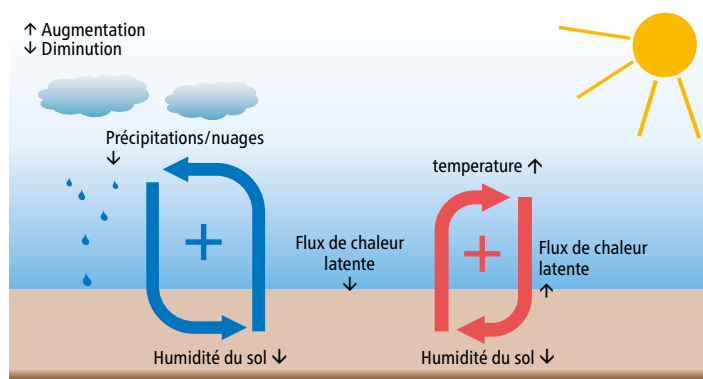


Fig. 5.1: Rétroaction positive entre l'humidité du sol et la température (rouge) et l'humidité du sol et les précipitations (bleu).⁹¹

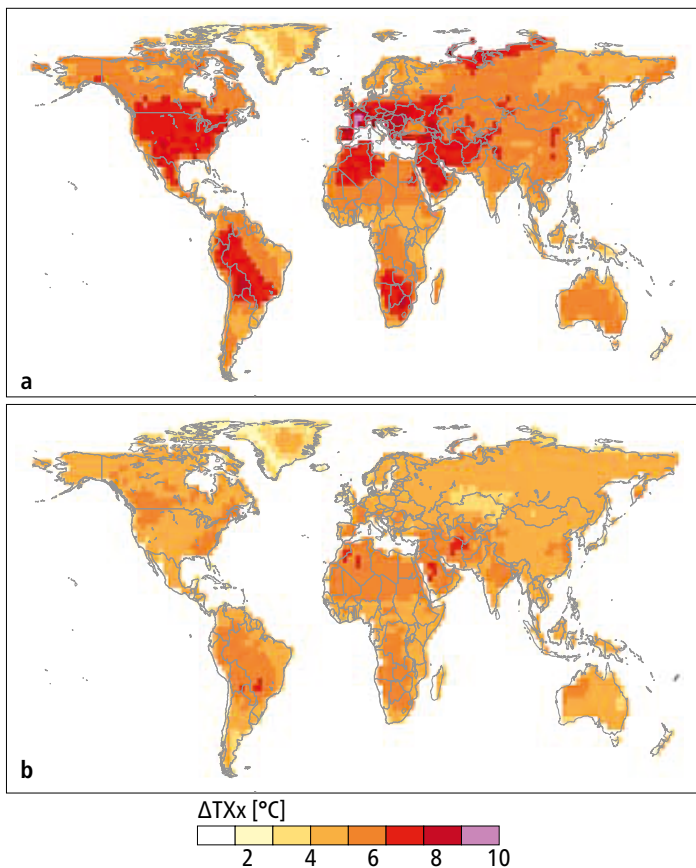


Fig. 5.2: Changement de température prévu pour le jour le plus chaud de l'année (ΔTX_x) entre 2081–2100 et 1951–1970 pour a) des simulations avec les rétroactions humidité du sol – température et b) des simulations pour lesquelles ces rétroactions sont inhibées (adapté).⁸³

des sols plus secs². Le nombre et la température des jours caniculaires devraient augmenter, en particulier dans les régions densément peuplées et de basse altitude.

Les étés exceptionnellement chauds et secs de 2003 et 2018

La Suisse a connu des étés exceptionnellement chauds et secs dans les décennies récentes, parmi lesquels 2003 se classe comme le plus chaud et 2018 comme le 3^e plus chaud depuis 1864.² La canicule de l'été 2003 est l'une des plus graves calamités naturelles ayant touché l'Europe avec une surmortalité de plusieurs dizaines de milliers de morts et des pertes considérables dans la production agricole.^{61,85} La période du 1^{er} au 13 août 2003 a été la canicule la plus extrême en Suisse depuis le commencement des mesures.²³ Elle a été causée par un blocage atmosphérique persistant au-dessus de l'Europe centrale et méridionale,^{38,85,86} précédé par un printemps marqué par un déficit en précipitations.³⁷ Les conditions météorologiques stables avec un ciel clair, un forçage radiatif élevé en juin et une accumulation de chaleur dans la couche limite pendant plusieurs jours a accru le déficit en humidité du sol.⁸⁷ Les rétroactions humidité du sol – atmosphère ont donc contribué significativement aux températures élevées observées durant la canicule de l'été 2003.⁶⁶

En 2018, une grande partie des régions de moyennes latitudes dans l'hémisphère nord a connu des températures extrêmes au printemps et à l'été (de mai à août, avec des records climatologiques) associées à des dommages importants (fig.5.3).³ Cette concomitance de canicules est sans précédent de par la surface totale affectée par des températures extrêmes, et n'aurait virtuellement certainement pas eu lieu sans le réchauffement d'origine anthropique. En Europe centrale et septentrionale, la canicule de l'été 2018 a été exceptionnellement chaude et sèche, associée à des incendies de forêts en Scandinavie, à un stress thermique et des pertes de production agricole.^{88,89} Les rétroactions humidité du sol – température ont amplifié le réchauffement, ce qui est inhabituel en Europe du nord qui est généralement en régime humide.⁸⁹

Ainsi, l'été 2018 met aussi en évidence le rôle important des rétroactions humidité du sol – atmosphère pour les canicules estivales. Ces événements sans précédent donnent un avant-goût des canicules qui pourraient toucher la Suisse dans le futur, étant donné l'augmentation prévue de la simultanéité des sécheresses et des canicules avec un réchauffement plus marqué.⁹⁰

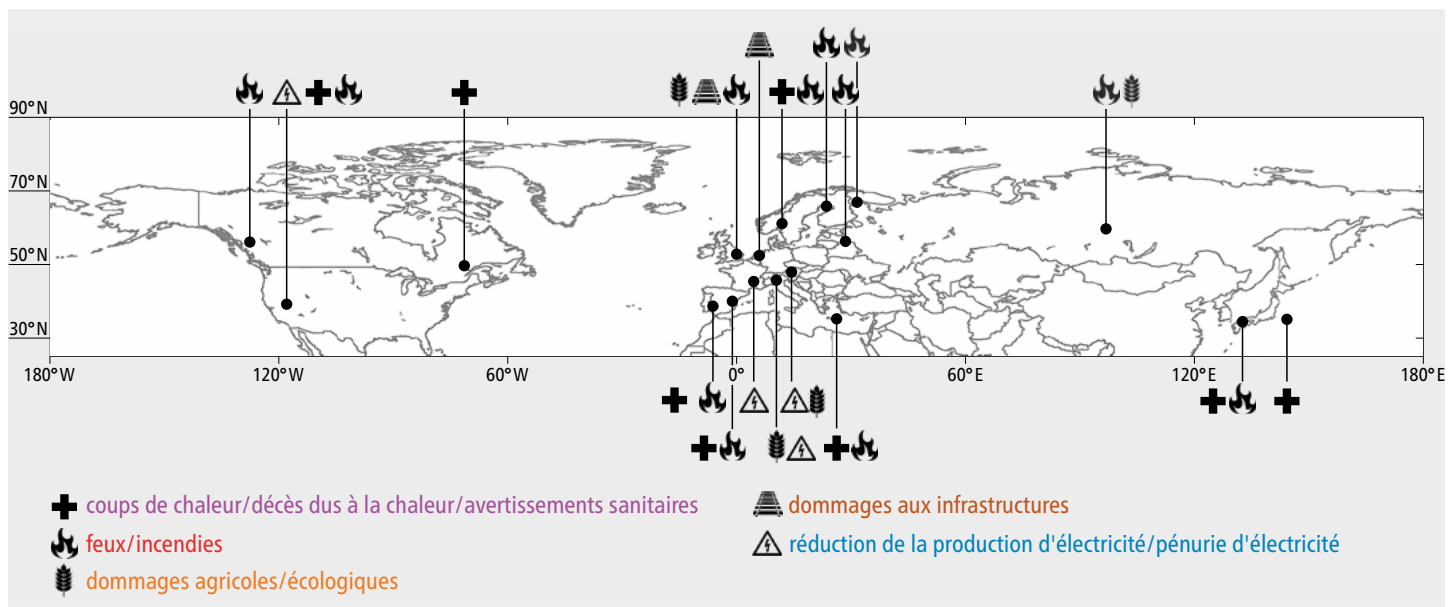


Fig. 5.3: Impacts liés à la canicule de 2018 rapportés dans des articles de presse (adapté).³

Impact des années de sécheresse 1947, 2003 et 2018 sur l'agriculture

Les sécheresses de 1947, 2003 et 2018 ont eu de graves répercussions sur les prairies et le bétail. Les rendements des grandes cultures ont présenté pour ces trois années des anomalies tant positives que négatives, car la date de la sécheresse détermine son impact sur les différentes cultures. Dans l'ensemble, la population suisse a été beaucoup plus touchée par la sécheresse de 1947 que par les années extrêmes récentes, car la sécurité alimentaire était nettement plus faible à cette époque.

Contraintes climatiques sur la production agricole

Les variations annuelles de rendement des cultures sont principalement déterminées par les conditions météorologiques au cours des cycles de croissance. Pour qu'une culture atteigne un rendement optimal, les conditions météorologiques doivent correspondre à des exigences de température et d'humidité spécifiques à chaque type de culture, au cours de chaque saison de croissance. Les contraintes dues au gel, à la sécheresse, à la chaleur, au rayonnement ou à des températures de croissance excessivement basses doivent être évitées. Par conséquent, les cultures sont généralement plantées de manière à ce que les schémas saisonniers de température et de précipitations, en moyenne et par expérience, répondent au mieux aux besoins spécifiques des cultures. Cependant, étant donné la variabilité du temps, il est pratiquement impossible d'empêcher certains facteurs climatiques d'avoir un effet limitant sur le rendement au cours d'années spécifiques. Ainsi, la variabilité annuelle de la météo entraîne une variation des rendements des différentes cultures agricoles, et la variabilité et les extrêmes climatiques peuvent avoir des effets très différents sur des cultures spécifiques.

La sécheresse comme facteur limitant

Avec seulement 300mm en six mois, moins de 50 pour cent de la quantité normale d'eau était disponible pour la végétation en 1947. Après un mois de mars 1947 très humide, c'est-à-dire avec un net excédent d'eau (fig. 6.1), d'importants déficits de précipitations ont été enregistrés en avril. Associés à des températures supérieures à la moyenne, cela a conduit à une longue période de sécheresse (voir page 9). Dans le nord-est de la Suisse, la sécheresse a atteint un premier pic en juin. En août, des déficits du bilan hydrique de 100mm ou plus se sont produits sur tout le Plateau suisse, et ce n'est qu'en octobre que cette période de sécheresse extrême a pris fin.⁹² La sécheresse a entraîné d'importantes pertes de rendement, car elle a persisté pendant toute la période de culture de 1947. Les rendements étaient particulièrement inférieurs dans les cultures herbagères, et les rendements des céréales étaient également inférieurs à la moyenne en 1947 (fig. 6.2). Un schéma similaire d'anomalies de rendement a également été observé pour les années extrêmes 2003 et 2018, avec toutefois des différences entre les types de cultures. Ce phénomène est expliqué plus en détail ci-dessous.

Manque de fourrage

Dans l'agriculture herbagère, le rendement du regain a été particulièrement réduit en 1947. Les rendements nationaux étaient de 10 à 13 pour cent inférieurs à la moyenne des années 1920–1950, tandis que les rendements de la première coupe étaient moins affectés par les mauvaises conditions climatiques (5 à 9 pour cent inférieurs à la moyenne des années 1920–1950). Les possibilités d'importation furent limitées en raison de la sécheresse qui sévit dans toute l'Europe.^{28,93} En outre, la situation politique et économique de l'après-guerre est précaire.¹⁸ La pénurie de fourrage entraîna un abattage d'urgence en 1947: les statistiques indiquent une augmentation de l'abattage des chevaux de 55 pour cent et des vaches de 18 pour cent. Les abattages d'urgence ont à leur tour entraîné des pénuries de lait et de beurre, auxquelles il a fallu faire face par le biais de rationnement et d'importations.^{18,28,94} Ainsi, le volume des importations nationales de beurre en 1947 fût presque deux fois supérieur à la moyenne de l'époque, et le volume des importations de lait concentré fût même 16 fois supérieur à la moyenne. Pour atténuer les difficultés qui s'étaient

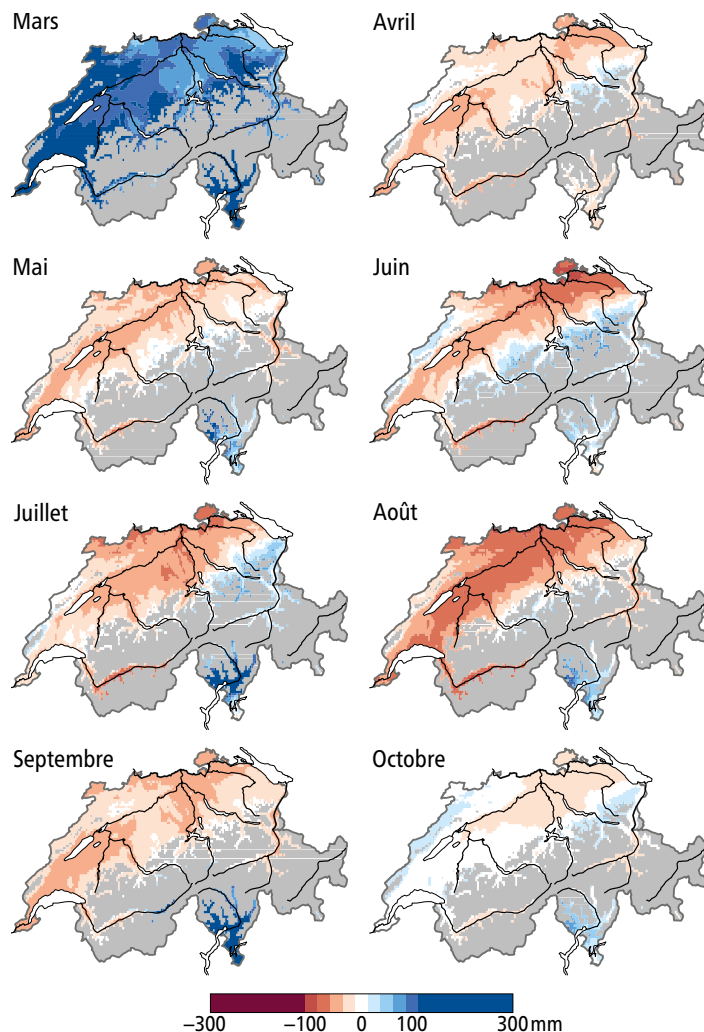


Fig. 6.1: Evolution temporelle et spatiale de la période de sécheresse en 1947 pour les zones situées à une altitude inférieure à 1200 m. Le bilan hydrique mensuel (la somme des précipitations moins la somme de l'évaporation potentielle, en mm) est représenté. Les calculs sont basés sur les analyses spatiales de l'Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse).¹⁰¹

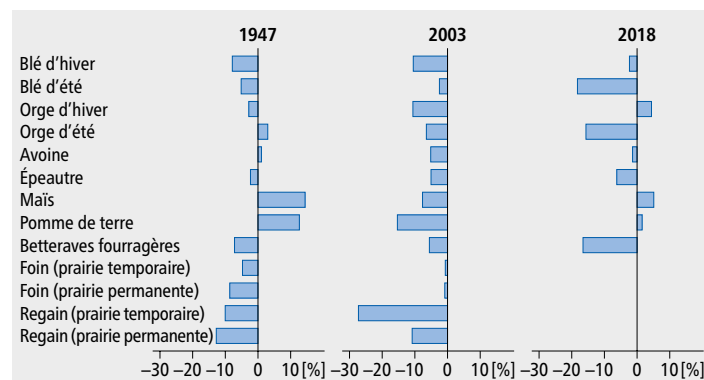


Fig. 6.2: Variations du rendement des principales cultures agricoles au cours des années sèches 1947, 2003 et 2018 (1947 par rapport à la moyenne 1920–1950; 2003 et 2018 par rapport à la moyenne 1990–2020).¹⁰⁰

présentées, la Confédération a accordé aux agriculteurs des zones de sécheresse une aide exceptionnelle via un crédit de 40 millions de francs.⁹⁵

Lors des années extrêmes de 2003 et 2018, les pertes de rendement des cultures fourragère ont été similaires, voire supérieures, mais les pénuries de fourrage ont été largement compensées par les importations.⁹⁶ Les taxes douanières ont été temporairement réduits en 2003 pour faciliter les importations.⁹⁷ Les statistiques de ces années n'indiquent pas d'irrégularités correspondant à un abattage d'urgence.

Le timing de la période de sécheresse est crucial

En 1947, surtout les rendements des cultures tardives ont diminué drastiquement. Pour les betteraves d'automne, généralement semées entre juillet et août, les rendements nationaux moyens étaient inférieurs de 47 pour cent à la moyenne des années 1920 à 1950. De même, les rendements des rutabagas, semés en juin, étaient inférieurs de 24 pour cent à la moyenne de l'époque.⁹⁴ Les rendements des betteraves fourragères n'ont été que légèrement réduits (-7 pour cent). Cette réduction plus légère par rapport aux navets et aux betteraves d'automne s'explique par la précocité de la période de croissance des betteraves fourragères. Celles-ci ont été semées autour du mois d'avril et pouvaient encore bénéficier des pluies abondantes de mars 1947. En 2003 et 2018, la sécheresse affecta de manière similaire le rendement des betteraves fourragères (-5 pour cent et -16 pour cent, respectivement; fig. 6.2).

En revanche, le rendement des pommes de terre en 1947 fut supérieur de 13 pour cent à la moyenne à long terme, tout comme le rendement national du maïs (14 pour cent au-dessus de la moyenne à long terme). Compte tenu des fortes anomalies climatiques cette année, ce rendement anormalement important est surprenant pour des cultures dont les besoins en eau sont relativement élevés. Il est intéressant de noter qu'une tendance similaire est évidente pour l'année extrême de 2018, bien que dans une moindre mesure (+2 à +5 pour cent de rendement). Cela suggère que le moment de l'apparition de la sécheresse est crucial, tout comme la propagation spatiale de la sécheresse et de la chaleur. Les cultures précoces, comme les pommes de terre ou le maïs, ont probablement pu bénéficier de l'approvisionnement du sol en eau issue des précipitations abondantes du mois de mars. On peut supposer un effet similaire pour 2018, où le déficit hydrique entre mai et juin était presque équilibré. En revanche, la sécheresse s'est installée plus tôt en 2003 et a duré tout l'été, entraînant de larges baisses de rendement dans les cultures des pommes de terre et du maïs.

Les baisses de rendement dans la production céréalière ont été comparativement faibles en 1947 (-8 pour cent pour le blé d'hiver). Cependant, la culture des céréales était un pilier essentiel de l'approvisionnement alimentaire de la population du pays. La plupart des terres arables de l'époque étaient utilisées pour la culture des céréales. Par conséquent, une perte de rendement de 8 pour cent dans le cas du blé d'hiver représenta un important manque à gagner. En comparaison, les pertes de rendement pour le blé d'hiver en 2003 étaient en pourcentage (-10 pour cent) légèrement supérieures, mais cette baisse représentait un niveau de rendement absolu beaucoup plus élevé. Les rendements plus élevés de ces dernières décennies ont été obtenus grâce à une mécanisation poussée des pratiques agricoles, à une meilleure sélection des variétés⁹⁸ et à une utilisation accrue des engrais minéraux.⁹⁴ Au cours de la période 1990–2020, les rendements des principales cultures arables ont été deux à plus de trois fois supérieurs à ceux de la période 1920–1950. Il est intéressant de voir que les rendements des céréales d'hiver en 2018 ont été moins impactés que ceux des céréales d'été. Cela peut s'expliquer par le fait que la sécheresse extrême de 2018 a commencé plus tard, à un moment où les céréales d'hiver avaient déjà atteint leur maturité mais où les céréales d'été étaient encore en phase de remplissage des épis.

Les pertes de rendement dans un contexte social

Notre comparaison des impacts sociaux des baisses de rendement illustre la forte influence des facteurs socio-économiques sur la résilience du système alimentaire aux extrêmes climatiques.⁹³ Les pertes de rendement se situaient dans une fourchette similaire lors des trois années extrêmes considérées. Cependant, la population suisse a été beaucoup plus touchée par les conditions climatiques extrêmes et leur impact sur la productivité agricole en 1947 qu'en 2003 ou 2018. Cela est dû au développement agricole qui a conduit à une augmentation massive du rendement durant les années 1950 à 1970; les rendements réduits en 2003 furent malgré tout largement supérieurs au niveau des rendements moyens entre 1920 et 1950. En outre, la stabilité politique qui règne aujourd'hui en Europe a également eu une influence positive sur la sécurité alimentaire.

Récolte de pommes de terre 1947

La maturité précoce a probablement eu un impact positif sur le rendement des pommes de terre en 1947, car les rendements des variétés précoces dans certains cantons touchés par la sécheresse comme Bâle, Schaffhouse et Argovie furent légèrement supérieurs aux rendements des variétés tardives. La part des variétés moyennement précoces telles que la « Bintje » était élevée en Suisse à cette époque.⁹⁹ En outre, les maladies fongiques favorisées par l'humidité telles que le mildiou ont généralement joué un rôle majeur dans la limitation du rendement de la production de pommes de terre au cours des années 1940. En effet, à l'époque, la disponibilité des pesticides efficaces était limitée. Ainsi, les conditions plus sèches de 1947 ont probablement été à une pression moindre des maladies et donc à un impact limité. Suite à la « bataille agricole » initiée par le conseiller fédéral Friedrich Traugott Wahlen en 1940, la surface cultivée en pommes de terre en 1947 était de près de 70000 ha. Ce chiffre est très largement supérieur à celui d'aujourd'hui (11000 ha en 2020).^{99,100} Il est donc également concevable que la surface cultivée en pommes de terre s'étendait à l'époque à des endroits à plus haute altitude et donc plus frais. Dans ces endroits, les températures supérieures à la moyenne de l'été 1947 ont pu avoir un effet positif sur le rendement des pommes de terre, tandis que les déficits de précipitations y furent moins impactant.

Pommes de terre (variétés tardives)

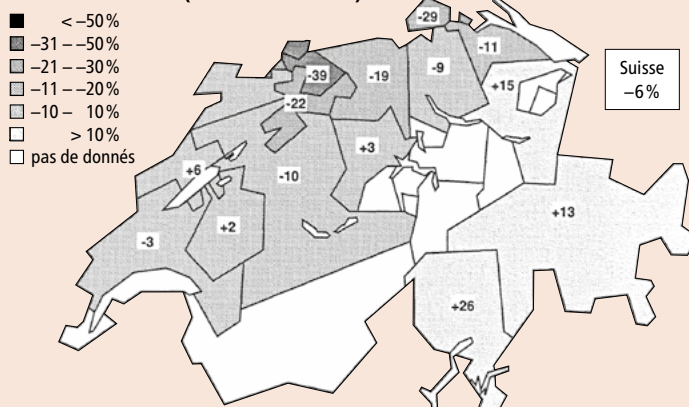


Fig. 6.3: Rendements des pommes de terre en Suisse en 1947 (écart par rapport à la moyenne de la période 1944–1951 en pourcentage).²⁸

Effets des sécheresses de 1947 et 2018 sur les forêts suisses

Les sécheresses estivales peuvent causer des dégâts conséquents aux forêts. Par exemple, la sécheresse estivale de 2018, combinée à la violente tempête hivernale « Burglind » et aux étés chauds des années suivantes 2019 et 2020, a causé des dommages massifs dans toute la Suisse, notamment à cause des infestations de scolytes. Dans le présent article nous montrons pourquoi de tels dommages se produisent et comment ils sont liés à 1947.

Les dégâts forestiers en lien avec la sécheresse de 1947 ont été décrits de manière particulièrement saisissante dans les rapports et articles de l'époque. Cependant, les dommages sont difficiles à quantifier dans leur intégralité, car la sécheresse n'entraîne pas seulement des dommages immédiats, mais favorise également les processus de dépérissement à moyen terme. De tels processus peuvent affecter les branches de la couronne mais aussi l'arbre entier. Au contraire, les dommages causés par les chablis peuvent être très bien quantifiés car ils se produisent durant un laps de temps court et bien défini.^{102,103} Néanmoins, il existe des données comparables sur l'étendue des dommages forestiers résultant de la sécheresse en 1947 par rapport à 2018; ceci en termes d'infestation par les scolytes. Les dommages directs aux forêts comprennent la mort de branches, de couronnes et d'arbres entiers. Indirectement, la sécheresse entraîne des dommages plus importants par l'infestation de scolytes ou par les incendies de forêt, entre autres. Dans ce qui suit, nous examinons de plus près les dommages forestiers de 1947 et tentons de les comparer aux dommages forestiers de l'année sèche 2018. L'année 1947 a été considérée comme très exceptionnelle pour de nombreuses forêts en Suisse. Cela s'est traduit par la publication de la première chronique forestière dans la « Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen » l'année suivante.¹⁰⁴ Le but était d'enregistrer les événements forestiers importants de manière systématique. On était évidemment conscient de l'importance historique de la sécheresse de 1947.

Sénescence des feuilles, mort des branches et des arbres

Diverses sources font état des effets concrets de la sécheresse de 1947 sur les forêts suisses. Dans les endroits très secs, la sénescence des feuilles, qui se produit généralement en automne, a été observée dans tout le pays dès le début du mois d'août.¹⁰⁴ Il existe également de nombreux rapports sur les dégâts forestiers locaux. Dans les régions inférieures du canton de Bâle-Campagne, une coloration précoce des feuilles a été observée sur les pentes exposées au sud et à l'ouest et sur les sols de gravier dès le début du mois d'août. Sur les sols perméables des rives de la Birse et du Rhin, les couronnes des charmes, des bouleaux, des chênes, des érables et des saules étaient en grande partie défoliées.¹⁰⁵ A l'automne 1947, des groupes entiers de chênes et de bouleaux étaient morts sur ces sols, ainsi que des hêtres mais dans une moindre mesure.¹⁰⁶ Des dégâts dus à la sécheresse ont aussi été signalés dans la région du Rhin, dans le nord des cantons de Zurich et de Schaffhouse, ainsi que sur les pentes du Jura, au bord du lac de Bière.¹⁰⁶ En automne 1947, de nombreux arbres défoliés, notamment des chênes sessiles, des hêtres et des érables, étaient visibles dans les peuplements forestiers. Les épicéas ont mieux résisté que les sapins. Aucun dégât important n'a été observé dans les chênaies du versant sud du Jura, de Bière vers l'ouest jusqu'à Saint-Blaise sur le lac de Neuchâtel. Cependant, une mortalité a été constatée à plusieurs reprises concernant des chênes sessiles, érables, et plus rarement des sapins, des épicéas et des hêtres. En général, davantage de dégâts ont été constatés sur les jeunes arbres que sur les vieux arbres. La sécheresse a également entraîné la mort de jeunes peuplements d'épicéas entre Saint-Blaise et Le Landeron, de cultures de feuillus dans les zones inférieures du canton de Berne, de cultures dans les pépinières et de feuillus plantés dans les clairières du canton de Zurich.¹⁰⁴ La figure 7.1 présente une carte des dommages signalés à cette époque (principalement dans le secteur agricole).¹⁰⁷

Infestation de sapins et d'épicéas par des scolytes

Les scolytes se reproduisent sous l'écorce des sapins et des épicéas. A cette fin, ils percent des trous dans l'écorce, ce qui est difficile dans les arbres sains car l'écorce est imprégnée de résine. En cas de sécheresse



Fig. 7.1 : Les zones affectées par la sécheresse en Suisse, publié le 27 août 1947, « Schweizer Illustrierte Zeitung ».

prolongée, les arbres produisent moins de résine et sont donc plus vulnérables, ce qui peut entraîner une reproduction massive des scolytes. Les tempêtes hivernales ont également un effet sur la reproduction des scolytes car elles peuvent endommager ou affaiblir les arbres sur une grande étendue, ce qui permet aux scolytes de facilement percer l'écorce devenue sèche et endommagée. Après les dégâts forestiers causés par les tempêtes hivernales dans plusieurs cantons suisses en 1946,¹⁰³ les scolytes se sont multipliés pendant le temps chaud de l'année suivante. Une première poussée de prolifération des scolytes a été observée dès 1945, qui était également une année sèche, mais semble avoir été freinée par les conditions humides de 1946. Les scolytes se sont multipliés d'autant plus rapidement au cours de l'été 1947. Dans toute la Suisse, environ 340 000 m³ de bois de scolytes et 173 000 m³ de bois sec se sont accumulés en 1949 à la suite de la sécheresse de 1947.¹⁰⁸ Depuis 1800, la catastrophe des scolytes de 1944 à 1950 a été la plus importante jamais observée.¹⁰⁹

Feux de forêt

L'augmentation de la sécheresse entraîne aussi une augmentation du risque d'incendie de forêt. Au cours de l'été 1947, un total de 75 ha de forêt a brûlé à deux endroits dans la vallée de Bedretto (canton du Tessin), et un nombre inhabituellement élevé d'incendies a été signalé dans le canton du Valais, mais tous ont été rapidement éteints.¹⁰⁴ Dans le canton des Grisons, un grand incendie a détruit environ 170 ha de forêt près de Tschlin.¹¹⁰ Les incendies de forêt décrits pour l'année sèche 1947 étaient toutefois nettement moins importants (en termes de surface endommagée; environ 800 ha) que le grand incendie de forêt sur le versant sud du Calanda, qui s'est produit en 1943.¹¹¹ La surface des dégâts était également moins importante que les 300 ha de forêt qui ont brûlé au-dessus de Loèche (canton du Valais) pendant la vague de chaleur de l'été 2003.¹¹² La raison est que la sécheresse estivale de 1947 a été moins prononcée dans les vallées alpines centrales que sur le Plateau suisse central et dans le nord de la Suisse (voir page 8).

Comparaison des dégâts forestiers déclarés

Comment les dégâts aux arbres et aux forêts déclarés pour l'année de sécheresse 1947 se comparent-ils à la récente année de sécheresse 2018? Il se trouve que les différents relevés effectués en 1947 se comparent bien aux caractéristiques des dégâts de la sécheresse estivale de 2018.^{8,113,114} Tous les effets secondaires sur les arbres observés en 1947 – de la fissuration de l'écorce à la coloration ou chute prématurée des feuilles, la morta-



Fig. 7.2: Peuplement forestier en été 2020 avec des hêtres partiellement ou totalement morts à Hemishofen SH. La mortalité a été déclenchée par la sécheresse de l'été 2018. Image: Ulrich Wasem.

lité des branches dans les couronnes d'arbres et la mort des arbres vieux ainsi que jeunes – ont également été observés en 2018 et les années suivantes (fig. 7.2). De plus, la prolifération rapide d'insectes, en particulier des scolytes, à la suite d'une chaleur prolongée¹¹⁵ avait aussi déjà été présentée correctement il y a 70 ans.¹¹⁶ Cependant, la répartition spatiale des dégâts des deux événements diffère. En 1947, ce sont les zones de basse altitude du Plateau, du Jura et du nord de la Suisse qui ont le plus souffert (fig. 7.1). En 2018, certaines régions de Suisse orientale (région du Walensee, de la Linth à la vallée de la Seez, vallée du Rhin supérieur) et les zones de basse altitude du Valais ont également été touchées.¹¹⁷ En 2018, la coloration des feuilles a partiellement commencé à la mi-juillet alors qu'en 1947, c'était début août. En 1947 et les années précédentes, plusieurs tempêtes ont causé des dégâts locaux dans les zones touchées par la sécheresse (par exemple, dans le canton de Neuchâtel)¹¹⁸. En 2018 en revanche, c'est une seule tempête hivernale sévère (« Burglind ») qui a balayé le Plateau et les Préalpes. 1,3 million de m³ de bois de tempête ont été accumulés¹¹⁹ en Suisse, représentant le quatrième plus grand événement en terme de dégâts dus à une tempête depuis le début de la récolte de données à l'échelle nationale en 1865.¹²⁰ Par conséquent, les effets combinés de cette tempête, de la sécheresse de l'été 2018 et de la reproduction massive des scolytes ont eu comme résultat d'énormes quantités de bois endommagé en 2019 et 2020, de l'ordre de 1,5 million de m³, dépassant largement les quantités de 1947.¹¹⁴ Il faut toutefois tenir compte du fait que les stocks de bois ont considérablement augmenté depuis la Seconde Guerre mondiale.^{103,121} En 1947, les peuplements forestiers étaient en moyenne non seulement moins denses (arbres vivants mesurés en m³/ha), mais la composition des essences et les structures forestières ne correspondaient pas aux conditions actuelles. Dans de nombreuses forêts, la proportion de conifères était plus élevée par rapport à la composition naturelle des espèces d'arbres et par rapport à aujourd'hui. En effet, des conifères avaient été plantés à grande échelle aux 19^e et 20^e siècle.¹²² Ces peuplements artificiels se sont avérés sensibles à la sécheresse, selon l'endroit. Alors que la régénération naturelle prédomine aujourd'hui, la régénération artificielle était très répandue en 1947. Par conséquent, de nombreuses pépinières et parcelles de reboisement ont été gravement touchées par la sécheresse. Dans une grande partie du Plateau suisse, la sécheresse estivale de 1947 a été l'année de sécheresse la plus prononcée du XX^e siècle, dépassant même la sécheresse de 2018. Cependant, la sécheresse estivale de 1947 a touché des zones beaucoup plus petites que celle de 2018, qui a également atteint des niveaux records en Suisse occidentale et dans les Alpes centrales.

En résumé, les dégâts forestiers ont été importants tant en 1947 qu'en 2018, mais les quantités de bois endommagé ont été massivement plus

élevées en 2018 et les années suivantes. Les différences de volume s'expliquent d'une part par le stock moyen de bois par surface plus élevé aujourd'hui, et d'autre part par les dégâts causés par les scolytes, favorisés notamment par la tempête hivernale Burglind et les multiples étés chauds. Si la fréquence des événements composés de périodes sèches et de tempêtes hivernales successives devait augmenter à l'avenir, il faut s'attendre à ce qu'une sécheresse comparable à celle de 1947 ou de 2018 puisse avoir des impacts importants sur les forêts à plusieurs reprises.

Lutte contre les scolytes en Suisse romande

Le canton de Neuchâtel a signalé environ 15 000 m³ de bois fortement infesté par les scolytes en 1948 et 6 000 m³ supplémentaires en 1949. Ce sont principalement les sapins (environ 60 pour cent) qui ont été touchés, et les épicéas dans une moindre mesure.¹²³ La situation était encore plus grave autour du lac de Bière, où plusieurs hectares de bois de sécheresse s'étaient accumulés dans les sapinières en 1947 déjà. Une surface de 40 ha a dû être complètement défrichée, et il ne restait que 10 à 50 pour cent de la réserve sur une autre surface de 60 ha. De 1947 à 1950, environ 50 000 m³ de bois infesté s'est accumulé dans le Seeland entre La Neuveville et Lengnau. En conséquence, la coupe de bois a dû être arrêtée jusqu'en 1954, et le prix du bois dans la région a chuté de 10 francs par unité en raison de l'offre excédentaire.¹¹⁶ Une centaine d'hommes ont été employés pour lutter contre la progression des scolytes (fig. 7.3).



Fig. 7.3: Des ouvriers dans la forêt d'Eschenberg, près de Winterthur, retirent l'écorce des sapins infestés par le scolyte et la brûlent à l'été 1947 (bibliothèques de Winterthur, collection Winterthur).

La fonte extrême des glaciers alpins en 1947

Les étés chauds et secs comme celui de 1947 ont un impact direct sur les glaciers alpins. Le bilan de masse des glaciers, en tant que signal climatique direct, est par conséquent négatif dans de telles situations météorologiques. Au cours des vingt dernières années, on a assisté à une accumulation de telles situations « défavorables aux glaciers ».

Les glaciers comme indicateurs climatiques sensibles

Les glaciers sont d'excellents indicateurs climatiques, car ils illustrent de manière claire les régimes climatiques passés. Le réchauffement observé dans les Alpes depuis la fin du Petit Age Glaciaire vers 1850 s'est accompagné d'une fonte considérable de tous les glaciers alpins.¹²⁴ Cependant, les glaciers sont des systèmes complexes et dynamiques, car ils sont influencés par une variété de facteurs qui ne peuvent être approximés que par une observation détaillée. Afin d'étudier la relation entre le climat et le comportement des glaciers, deux types d'observation peuvent être envisagés : le bilan de masse du glacier en tant que signal direct du changement climatique, et le changement de longueur du glacier, qui peut être immédiatement perçu visuellement au niveau de la langue du glacier, mais qui constitue un signal climatique indirect, retardé et amplifié. Les deux variables sont idéalement mesurées chaque année.

Le bilan de masse décrit la quantité de masse qu'un glacier dans son ensemble gagne ou perd au cours d'une année hydrologique. Pour le bilan de masse des glaciers des Alpes, les conditions météorologiques des mois de mai à septembre sont particulièrement déterminantes. L'ablation, c'est-à-dire la fonte de la neige et de la glace, est d'autant plus forte que les conditions anticycloniques chaudes et riches en rayonnement solaire sont fréquentes et qu'elles durent longtemps. En outre, les conditions de précipitations jouent un rôle important dans le semestre d'hiver. L'augmentation des chutes de neige entraîne une plus grande accumulation, c'est-à-dire une plus forte augmentation de la masse des glaciers. Cela entraîne la formation de névé et de nouvelle glace dans les régions supérieures et donc plus froides du glacier, qui est ensuite transportée vers les régions inférieures et plus chaudes, où la perte de glace se produit par la fonte.

Il y a toujours un certain délai avant que le signal du bilan de masse n'arrive à la langue du glacier. C'est ce qu'on appelle le temps d'adaptation dont un glacier a besoin pour trouver un nouvel état d'équilibre après un changement climatique – en avançant ou en reculant. Le temps d'adaptation dépend en grande partie de la superficie du glacier et ne doit pas être confondu avec le temps de réaction de la langue glaciaire à un changement climatique. Ce changement observable au front du glacier peut être deux à trois fois plus court que le temps d'adaptation.¹²⁵

Données disponibles sur le bilan de masse des glaciers

Les données de bilan de masse des glaciers d'Europe centrale montrent (fig. 8.1) que la valeur la plus négative du bilan annuel depuis le début des mesures a été atteinte en 1946/47. Les autres années présentant des bilans de masse annuels très négatifs sont 1921, 1950, 2003, 2015 et 2017, et le bilan estival le plus négatif a été atteint en 2003. Les années 1947, 1950, 2012, 2015 et 2018 ont également été caractérisées par des bilans estivaux très négatifs. Pour la région sélectionnée, le bilan annuel est principalement déterminé par le bilan estival. L'exception est 2018, qui présente le troisième bilan estival le plus négatif, mais un bilan annuel moins négatif en raison de précipitations hivernales plus fortes (bilan hivernal plus positif). Les courbes montrent également que le bilan hivernal moyen a peu changé, alors que les bilans estivaux sont devenus nettement plus négatifs au cours des quarante dernières années. Cependant, dans la base de données du World Glacier Monitoring Service (WGMS), il n'y a que cinq glaciers dont les séries de bilans de masse remontent à 1947. Trois de ces glaciers sont situés dans les Alpes (glacier du Silvretta, Claridenfirn, grand glacier d'Aletsch). La figure 8.2 montre quatre de ces séries. L'une des séries des bilans de masse la plus détaillée existe pour le Storglaciären (Laponie suédoise) depuis 1945/46. Le bilan de masse de ce glacier est également négatif en 1947, ce qui corres-

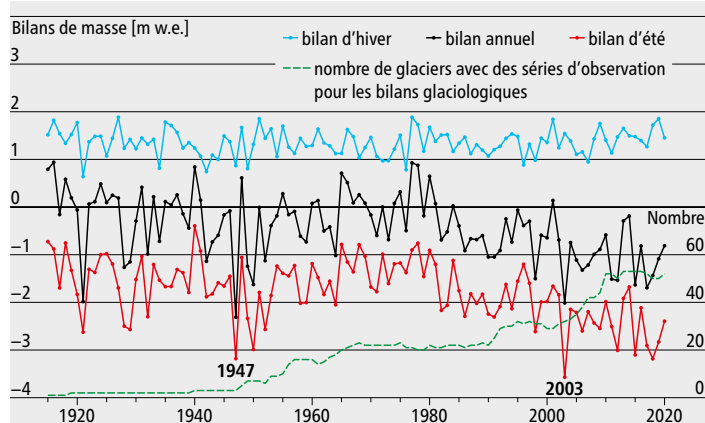


Fig. 8.1 : Bilans de masse glaciologique annuels (en mètres d'équivalent eau) pour l'Europe centrale. Le nombre correspondant de glaciers pour lesquels des données sont disponibles est également indiqué.¹²⁴ Le bilan annuel le plus négatif a été enregistré au cours de l'année hydrologique 1946/47, et le bilan estival le plus négatif en 2003. Au début de la série de mesures, le nombre de mesures est toutefois très faible.

pond bien aux températures élevées (non illustrées) et aux nombreux systèmes de haute pression bloqués (voir page 10). En examinant les séries individuelles des trois glaciers alpins, on peut constater que l'année 1947 se démarque clairement, mais ne représente pas toujours la valeur absolue la plus négative. Il faut également noter que ces trois séries d'observation ne sont basées que sur quelques mesures de balises.

Données sur les changements de longueur des glaciers

Contrairement au bilan de masse des glaciers, les mesures de la variation de longueur des glaciers sont nombreuses depuis le 19^e siècle.¹²⁶ De plus, pour les glaciers particulièrement bien documentés, les reconstructions basées principalement sur des sources historiques fournissent des informations sur les variations de longueur jusqu'au 16^e siècle.¹²⁷ La figure 8.3 montre les variations de longueur de certains glaciers des Alpes occidentales et centrales. Cependant, étant donné que la modification de la longueur des glaciers est un signal climatique indirect, retardé et intégré, les effets des périodes météorologiques individuelles (par exemple, les années à bilan de masse particulièrement négatif) ne peuvent pas être déterminés directement. Pour certains glaciers, on peut néanmoins observer une fonte accrue de la langue glaciaire lors de ces années à bilan de masse très négatif, par exemple au glacier du Rhône.

Conséquences des situations météorologiques extrêmes sur les glaciers

La température élevée de l'air et l'augmentation significative de l'ensoleillement ont été les facteurs importants qui ont provoqué une fonte excessive du névé et de la glace au cours de l'été 1947. Les précipitations ne sont pas tombées sous forme de neige mais sous forme de pluie, même en haute altitude. Haefeli et Kasser ont estimé la perte de glace et de névé dans l'ensemble de la région alpine suisse au cours de l'année hydrologique 1946/47 à 3,4 milliards de m³.¹²⁸ M. Huss a calculé une perte maximale de glace de 5,9 km³ pour l'ensemble des Alpes en 1947.¹²⁹ H. Hoinkes a également noté un nombre maximal d'heures d'ensoleillement pendant une période d'ablation en 1947 (suivie de 1950). Cette période de fonte extrême des glaciers était associée à une faible circulation atmosphérique : des anticyclones ont prévalu pendant 65 jours au total.¹³⁰

La couverture de neige du glacier au printemps est également décisive, car elle empêche l'ablation. La neige fraîche est plus légère et

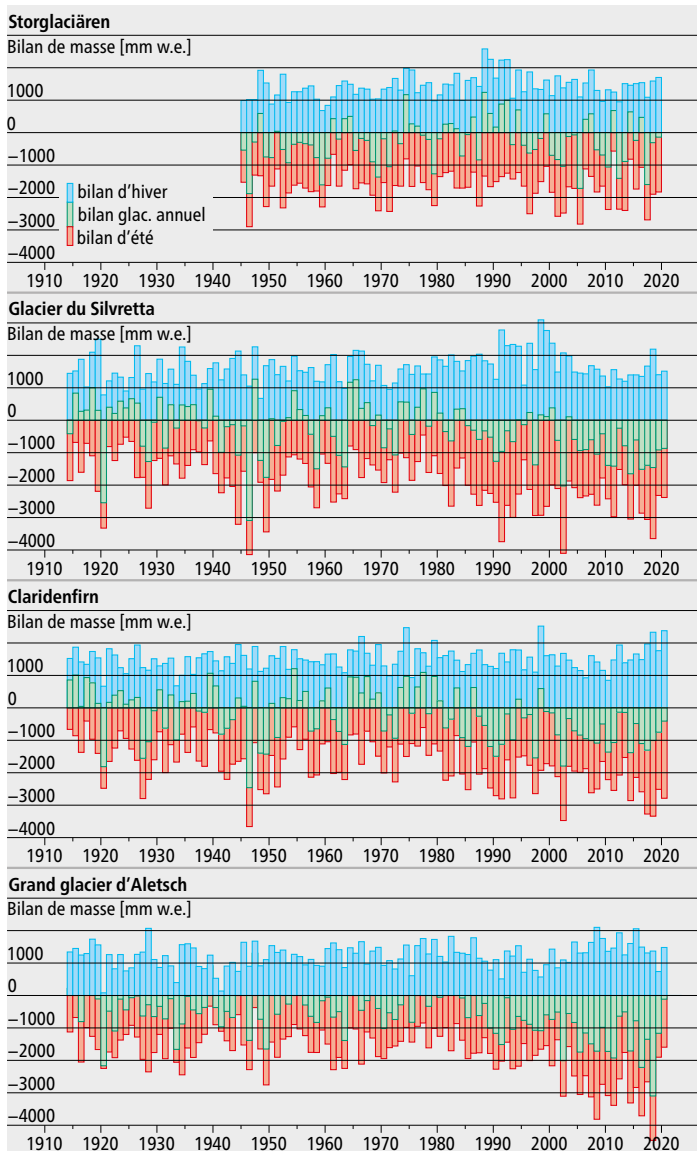


Fig. 8.2: Séries de bilans de masse glaciologiques pour les glaciers dont les séries de mesures remontent au moins à 1947: Storglaciären, glacier du Silvretta, Claridenfirn, grand glacier d'Aletsch (données: GLAMOS 1881-2021; WGMS 2021).

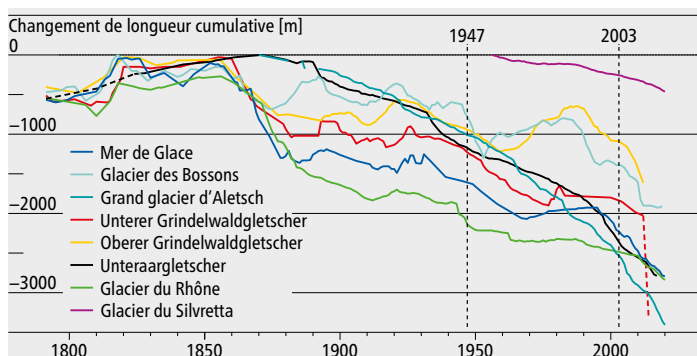


Fig. 8.3: Changements de longueur de glaciers sélectionnés dans les Alpes occidentales et centrales sur la base de données mesurées^{124, 126} ou de reconstructions (valeurs reconstruites: Nussbaumer, Zumbühl).

réfléchit mieux le rayonnement (albédo plus élevé). La situation inverse (par rapport à 1947) s'est probablement produite à plusieurs reprises entre 1812 et 1817, lorsque les chutes de neige se sont répétées à intervalles plus rapprochés et que les glaciers sont restés protégés du rayonnement solaire pendant une longue période, dans des cas ex-

trêmes pendant tout un été. Par conséquent, la plupart des glaciers alpins ont progressé très fortement et rapidement à cette époque.¹³¹

Les glaciers remplissent une fonction de stockage naturel en libérant de l'eau, en particulier pendant les périodes de sécheresse chaude, fournissant ainsi une réserve d'eau au moment où elle est le plus nécessaire. Avec la disparition des glaciers, cette importante fonction d'équilibre se perdra progressivement dans un avenir proche.¹³²

1947, une «année catastrophique» pour les glaciers

Les observations sur les glaciers de l'époque nous donnent un aperçu intéressant des effets de l'année hydrologique 1946/47. P.-L. Mercanton écrit dans «Les variations périodiques des glaciers des Alpes suisses»¹⁰ que l'année hydrologique 1946/47 n'a apporté en hiver que les trois quarts environ des précipitations normales (chutes de neige) et que le semestre d'été suivant a été beaucoup plus chaud que d'habitude. Cela a conduit à une ablation intense, qui a non seulement fait disparaître l'accumulation de masse de l'hiver précédent, mais aussi une bonne partie des réserves des années précédentes. Des valeurs particulièrement négatives ont été mesurées sur le Claridenfirn (2900m d'altitude) et le glacier du Silvretta (3010m d'altitude). En 1947, l'écoulement a également été considérable et d'une durée exceptionnelle. A la mi-septembre, le Rhône à Gletsch avait coulé comme en plein été. Selon Mercanton, ces conditions exceptionnelles ont suscité un regain d'intérêt de la part des observateurs des glaciers.

Dans le cas du glacier du Rhône (fig. 8.4), la fonte intense a eu des conséquences désastreuses: Dans la soirée du 9 août 1947, la rupture d'un barrage de glace a entraîné la libération soudaine d'eau de fonte et de blocs de glace. Alarmés par le grondement, les gens de Belvédère ont pu avertir par téléphone la station de Gletsch, afin que les personnes présentes puissent se mettre à l'abri. Sur un total de 100 glaciers recensés dans les Alpes suisses en 1947, aucun n'avancait, deux étaient stationnaires et 98 reculaient.¹⁰

Dans les Alpes orientales, on parla d'une «année catastrophique» pour les glaciers. Ici aussi, les glaciers n'avaient presque plus de bassins d'accumulation durant l'été 1947. Dans le massif de Silvretta, les glaciers étaient totalement dépourvus de neige au début du mois de septembre. L'été 1947 a été marqué par un maximum de fonte en surface, la ligne de névé s'est déplacée au-dessus de la limite supérieure des bassins d'accumulation et la couverture de névé et de glace des pentes au-dessus de la rimaye a fondu dans de nombreux cas. De nombreuses crêtes rocheuses furent fortement recouvertes de glace nue seulement, ce que même les plus anciens guides de montagne n'avaient jamais connu.¹³³



Fig. 8.4: La langue du glacier du Rhône le 16 septembre 1947, photographiée par P.-L. Mercanton.

Surmortalité durant les canicules extrêmes en Suisse

La chaleur est un important facteur de mortalité et de morbidité en Suisse. Le risque de mortalité augmente de 16 pour cent pendant les périodes de chaleur dans les principales villes suisses,¹³⁴ et les hospitalisations pour troubles psychologiques augmentent elles pendant les canicules. Cependant, les impacts en termes de santé des canicules historiques avant 2003, comme celle de 1947, restent mal connus. Pour y remédier, nous allons estimer la surmortalité pour huit villes suisses et évaluer les impacts sur la santé pendant des canicules récentes (2003, 2015, 2018) ainsi que celle historique de 1947.

L'impact de la chaleur sur la santé a gagné en visibilité dans le grand public depuis que les étés sont devenus exceptionnellement chauds dans les dernières décennies. En plus de la canicule record de l'été 2003 en Europe, quatre des six étés entre 2015 et 2021 en Suisse sont considérés comme les étés les plus chauds depuis le commencement des mesures en 1864 (voir page 9). Les canicules associées ont entraîné un lourd bilan en termes de morts, avec par exemple une surmortalité de 6.9 pour cent et 5.4 pour cent pendant les étés chauds de 2003 et 2015 en Suisse, et une augmentation de 2.4 pour cent des admissions hospitalières pour ce dernier.^{135–137}

Les canicules ont affecté des populations avec divers caractéristiques démographiques et contextes sociaux : quel est le rôle des mécanismes d'adaptation potentielle et d'acclimatation, des changements d'exposition démographique et climatiques ? Pour apporter des réponses, nous quantifions la surmortalité globale (toutes causes confondues) pendant la canicule de 1947 et la comparons à la surmortalité constatée pendant les canicules plus récentes de 2003, 2015 et 2018, dans les huit plus grandes villes de Suisse (Bâle, Berne, Genève, Lausanne, Lucerne, Saint-Gall, Winterthour et Zurich).

Quantification de la surmortalité pendant les canicules

L'estimation de la surmortalité est une approche bien établie pour évaluer l'impact sur la santé de facteurs externes pendant des périodes spécifiques, telles que les maladies infectieuses saisonnières (grippe et COVID-19 par exemple) ou des facteurs de stress environnementaux comme la chaleur, ou plus spécifiquement les canicules. Le terme surmortalité se réfère au nombre (ou au pourcentage) de morts observés par rapport au nombre de morts attendus pendant une période spécifique selon les données du passé. Cette mortalité attendue est calculée à partir de modèles statistiques basés sur les tendances saisonnières et à plus long terme dans les observations passées.

Pour notre étude, les valeurs de mortalité globale (toutes causes confondues) pour la période allant de 1999 à 2018 sont fournies par l'Office Fédérale de la Statistique (OFS) en Suisse. Les morts non-résidents et les morts suisses à l'étranger sont exclus. Pour la période allant de 1941 à 1960, nous utilisons les valeurs historiques de mortalité globale à l'échelle hebdomadaire rapportées dans le « Bulletin du Service Fédéral de l'Hygiène Publique ». ¹³⁸ Celles-ci n'incluent pas les enfants mort-nés, mais considèrent la population résidente et non-résidente. La qualité de ces données historiques est considérée comme très bonne dans la littérature. ¹³⁹

Nous calculons alors la surmortalité hebdomadaire comme la différence entre la mortalité observée et attendue pour chaque canicule (sur la période d'été entre mai et septembre) et chaque ville. Le nombre de morts attendus pour chaque semaine est estimé en utilisant des modèles de régression, ajustés sur la mortalité observée pour chaque ville et pour deux sous-périodes différentes : 1941–1960 et 1999–2018. Ceci afin d'éviter tout biais lié à l'utilisation de deux sources d'information différentes. En effet, bien que les données se rapportent aux mêmes villes, nous ne pouvons être certains qu'il n'y ait aucune différence systématique dans la manière dont les morts ont été enregistrés. Les tendances temporelles sont compensées par une fonction linéaire du temps et les tendances saisonnières par une fonction polynomiale trigonométrique de termes en sinus et cosinus (avec une période d'une année), comme fait dans des études antérieures.

Les résultats sont exprimés en fraction de surmortalité (pourcentage) et

calculés comme l'excédent de morts divisé par le nombre total de morts observés pour chaque semaine (et multipliés par 100). Cette quantification relative de l'impact permet de meilleures comparaisons entre les sous-périodes (1941–1960 et 1999–2018), les canicules et les villes, car elle n'est pas influencée par les différences de taille de population ou de durée de la période considérée (i.e. les différentes canicules). Nous résumons la surmortalité hebdomadaire par la moyenne sur toute la période estivale (définie comme la surmortalité estivale) et sur toutes les semaines d'une canicule (définie comme la surmortalité caniculaire). Nous considérons une période caniculaire commune pour toutes les villes en considérant les canicules d'échelle nationale. C'était le cas pour les semaines 22 juillet – 4 août et 12–21 août 1947⁵, 1–13 août 2003¹³⁴, 1–7 et 16–24 juillet 2015⁷⁹, 30 juillet – 8 août 2018¹⁴⁰. Il est à noter que la surmortalité estimée représente une mesure indirecte de l'exposition supposée à la chaleur, car cet excédent par rapport au nombre de morts attendus est lié, en premier lieu, à toutes les causes de décès. En outre, les estimations n'incluent pas de mesures de l'incertitude.

Surmortalité pendant la canicule de 1947 par rapport à celles de 2003, 2015 et 2018

Comme montré dans le tableau 9.1, la canicule de 1947 a été particulièrement dévastatrice pour la population à Lucerne et Bâle, où la surmortalité pendant les semaines de canicule était supérieure à 30 pour cent, suivies de Berne et Saint-Gall avec des valeurs de 20 pour cent ou plus. Le choc de cette canicule a aussi été très fort. À Lucerne par exemple, la surmortalité caniculaire était approximativement six fois plus grande que la surmortalité estivale. Ceci montre clairement l'impact fort de la canicule de 1947 dans ces régions. Par contraste, on ne voit qu'un impact limité ou nul à Lausanne, Genève, Winterthour et Zurich (surmortalité caniculaire sous les 10 pour cent).

	1947		2003		2015		2018	
	HW	Été	HW	Été	HW	Été	HW	Été
Bâle	32,8	12,3	66,0	13,1	40,1	9,3	40,7	-0,5
Berne	23,2	4,8	7,4	1,5	34,8	2,5	31,3	12,1
Genève	5,7	6,2	42,1	11,8	12,6	3,9	13,3	0,3
Lausanne	7,0	-2,1	25,0	1,1	3,0	-6,1	10,6	9,2
Lucerne	38,5	6,0	27,9	3,0	25,6	9,4	7,9	3,2
Saint-Gall	19,7	-4,6	-7,7	-2,0	15,7	0,3	8,4	-3,6
Winterthour	8,2	1,8	21,4	14,5	-4,0	1,0	1,9	-9,4
Zurich	-4,9	-2,1	15,8	8,1	21,1	5,1	42,9	6,5

Tableau 9.1 : Surmortalité relative par ville et pour les étés 1947, 2003, 2015 et 2018 (en pour cent). Les valeurs rapportées correspondent à la surmortalité caniculaire (HW) et à la surmortalité estivale (Été).

Par comparaison, l'impact de la canicule de 2003 était substantiellement plus grand dans presque toutes les villes (fig. 9.1), avec des surmortalités caniculaires de 20 pour cent et plus à Lausanne, Lucerne, Winterthour et Zurich, et de 40 à 60 pour cent à Genève et Bâle. La canicule de 2015 a entraîné une surmortalité caniculaire globalement plus faible en comparaison avec 2003, et légèrement supérieure à la canicule de 1947. Enfin, la surmortalité caniculaire pour 2018 est similaire à celle de 2015 pour Bâle, Berne et Genève, mais plus forte pour Zurich.

Globalement, la population de la ville de Bâle a été plus fortement affectée pendant les périodes caniculaires considérées, alors que chaque canic

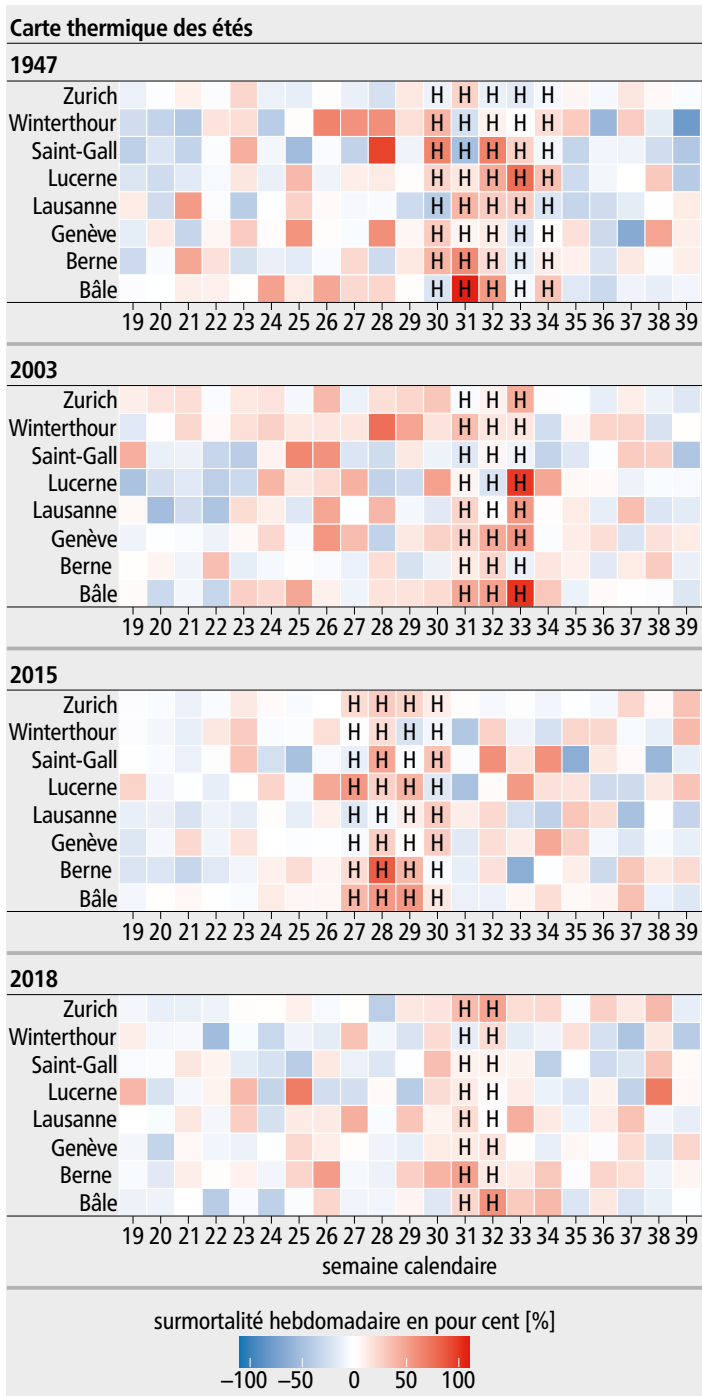


Fig. 9.1: Surmortalité hebdomadaire (en pour cent) dans les villes de Bâle, Berne, Genève, Lausanne, Lucerne, Saint-Gall, Winterthour et Zurich, pendant l'été (mai à septembre) en 1947, 2003, 2015 et 2018. La lettre majuscule «H» indique les semaines d'occurrence d'une canicule.

culé a eu un impact différent sur les autres villes. Par exemple, la canicule de 1947 a plus durement touché la ville de Lucerne alors que les canicules plus récentes ont eu un impact beaucoup plus faible. La surmortalité a crû avec le temps à Zurich. À l'inverse, Genève a été plus fortement affectée par la canicule de 2003 que par les deux canicules plus récentes.

Ces variations spatiales et temporelles pourraient être expliquées, entre autres, par deux facteurs. Le premier est l'orographie complexe et le climat hétérogène en Suisse, qui ont conduit à des températures maximum et des durées de canicules différentes en chaque ville au cours d'un même épisode caniculaire, comme rapporté dans des études précédentes.^{79,134,140,141} Le second est lié à la diversité

des populations entre les différentes villes et au cours du temps, y compris la structure démographique, ainsi que les caractéristiques socio-économiques et culturelles, qui ont été précédemment identifiées comme des facteurs de risque pour la mortalité liée à la chaleur.¹⁴²

Nous ne trouvons pas de tendances temporelles claires qui indiqueraient une possible adaptation de la population, ce qui est en désaccord avec d'autres études récentes.¹³⁸ Cependant, la surmortalité pendant les canicules après 2003 a été légèrement plus faible, malgré l'accélération du réchauffement climatique au cours des dernières décennies. C'est vrai en particulier pour Genève et Lausanne. Un plan de santé publique à l'échelle nationale a été mis en place après 2003, et quelques cantons (Fribourg, Genève, Tessin, Vaud et Valais) ont pris des mesures supplémentaires.¹⁴¹ Ceci suggérerait que la mise en œuvre de ces mesures additionnelles pour protéger la population de la chaleur (par exemple l'introduction de systèmes d'alerte pendant les canicules) a été efficace pour réduire l'impact sanitaire des canicules après 2003.

En outre, nous considérons que la comparabilité des estimations de surmortalité entre les villes et surtout entre la canicule de 1947 et celles des années plus récentes pourrait être affectée par la différence de structure démographique de la population. Selon la base de données Mortalité Humaine, 9 pour cent de la population suisse étaient âgés de 65 ans ou plus en 1947, contre 16 pour cent en 2003. Comme les groupes âgés sont plus vulnérables à la chaleur, et compte tenu des tendances actuelles au vieillissement, l'impact des canicules plus récentes pourrait venir principalement de la proportion plus élevée de personnes âgées de nos jours en comparaison avec les années 1940.

En fait, la surmortalité pourrait croître dans le futur. De nos jours, la chaleur est considérée comme l'un des risques environnementaux les plus dangereux avec des impacts sur la santé publique et les activités économiques.¹⁴³⁻¹⁴⁵ Le changement climatique est déjà en train d'amplifier ces impacts par l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des canicules. On s'attend à ce que les impacts sur la santé publique continuent d'augmenter exponentiellement avec le réchauffement climatique. Ce constat appelle des mesures d'adaptation efficaces,^{146,147} qui n'étaient évidemment pas facilement disponibles en 1947.



Fig. 9.2: Baigneurs cherchant à se rafraîchir à la piscine du Dolder, Comet Photo AG, Zurich, 1947.

Chaleur et sécheresse estivales: une excursion dans l'avenir climatique de la Suisse

Les scénarios climatiques à l'échelle mondiale et régionale montrent que le réchauffement déjà observé se poursuivra à l'avenir. Son ampleur sera déterminée par les futures émissions de gaz à effet de serre par l'humanité. Même si l'objectif de 2 degrés fixé par l'accord de Paris sur la protection du climat est atteint, les températures en Suisse continueront d'augmenter au moins jusqu'au milieu du siècle. Des conditions comme celles de l'été 1947 deviennent donc de plus en plus probables et, dans certaines circonstances, la norme. Sur la base d'un futur été extrême fictif, nous montrons à quelles conditions il faudra s'attendre en Suisse à l'avenir si les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le monde ne portent pas leurs fruits.

Scénarios climatiques au niveau mondial et en Europe

L'été 1947 a été un événement extrême au moment où il s'est produit, mais il est déjà beaucoup moins exceptionnel aujourd'hui en raison du changement climatique en cours et du réchauffement observé à ce jour (voir page 9). Depuis l'époque préindustrielle, les températures moyennes en Suisse ont augmenté d'environ 2 °C¹⁷ et les sécheresses estivales se sont multipliées au cours des dernières décennies.²⁶ Il est largement admis que ces changements climatiques ne sont pas des fluctuations naturelles, mais qu'ils sont dus aux activités humaines et à l'émission continue de gaz à effet de serre.¹⁴⁸ Cette influence humaine se poursuivra à l'avenir et affectera notre climat.

L'ampleur des changements climatiques attendus d'ici la fin du 21^e siècle dépendra de la quantité totale de gaz à effet de serre émis à l'avenir, ainsi que de l'efficacité des puits naturels et techniques à absorber une partie des gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère. Des réductions significatives et rapides des émissions humaines pourraient limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale par rapport à l'époque préindustrielle à 2 °C, voire à 1,5 °C. C'est l'objectif fixé par la communauté internationale dans l'Accord de Paris sur le climat de 2015. Cependant, les mesures de protection du climat actuellement annoncées par les différents pays (à partir de janvier 2022) ne seront probablement pas suffisantes pour atteindre cet objectif.¹⁴⁹

Afin d'estimer l'influence des émissions humaines sur le climat mondial, on utilise des modèles climatiques globaux. Il s'agit de représentations mathématiques et physiques complexes du système climatique qui incluent tous les processus climatiques clés de l'atmosphère, de l'océan et des surfaces terrestres. Des scénarios futurs d'émissions de gaz à effet de serre par l'homme sont appliqués aux modèles, sur la base desquels sont simulés les changements climatiques. Étant donné que les résultats dépendent du scénario d'émissions choisi sur des échelles de temps de plusieurs décennies, ils sont appelés scénarios climatiques ou projections climatiques, par opposition aux prévisions météorologiques et climatiques dont les périodes de prédiction sont plus courtes. Cependant, en raison de l'énorme puissance de calcul requise par les modèles climatiques mondiaux, leur résolution spatiale de 100 à 150 km est généralement trop grossière pour représenter les caractéristiques régionales du climat. Ceci est particulièrement vrai pour les régions avec une structure topographique marquée comme la région alpine. C'est pourquoi on a souvent recours à des modèles climatiques régionaux, qui ne couvrent pas la totalité du globe mais seulement une région spécifique et peuvent donc être exploités avec une résolution spatiale plus élevée de quelques kilomètres.¹⁵⁰ Les informations sur l'état de l'atmosphère à grande échelle à la limite des zones des modèles régionaux sont extraites des modèles climatiques globaux.

La figure 10.1 montre l'évolution prévue des températures et des précipitations estivales en Europe jusqu'à la fin du siècle, dans l'hypothèse d'un scénario « business as usual » (poursuite de la politique actuelle), soit sans efforts de protection du climat mondial (Representative Concentration Pathway RCP8.5). L'analyse est basée sur un grand nombre de simulations climatiques régionales de l'initiative EURO-CORDEX.^{151,152} Sur la quasi-totalité de l'Europe, on s'attend à une nouvelle augmentation des températures estivales de plus de 3 °C par rapport à la référence 1981–2010 (fig. 10.1a). Un réchauffement

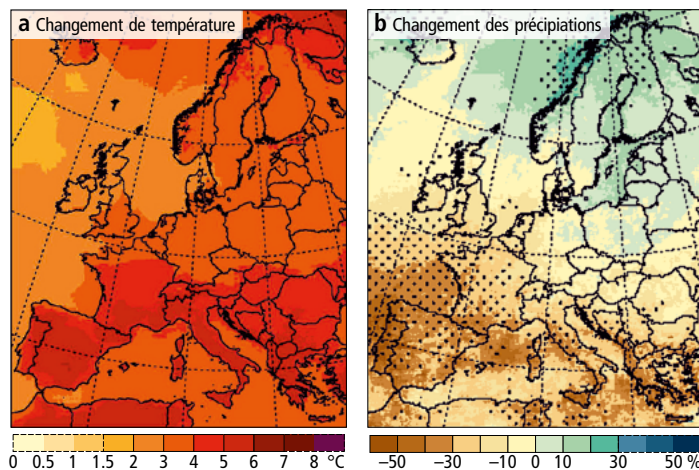


Fig. 10.1: a) Changement prévu de la température estivale et b) des précipitations estivales (chaque juin–août) en Europe jusqu'au fin du siècle par rapport à la période de référence 1981–2010 pour un scénario sans protection du climat (RCP8.5). La médiane de l'ensemble de modèles EURO-CORDEX est représentée.^{151,152} Les zones en pointillés dans la figure de droite indiquent les cellules de grille où 90 pour cent ou plus des modèles s'accordent sur la direction du changement des précipitations.²

encore plus fort, de 5 °C ou plus dans certains cas, peut être observé dans le sud de l'Europe. La région alpine et le territoire suisse sont également touchés par ce fort réchauffement dans la partie sud de l'Europe. Les raisons de cette amplification méditerranéenne ne sont pas entièrement comprises, mais sont probablement dues à un changement du profil vertical de la température atmosphérique.^{153,154} Ceci est également la cause, du moins en partie, du signal clair de sécheresse estivale attendu pour l'Europe centrale et méridionale (fig. 10.1b). La région alpine et la Suisse sont également touchées par cette diminution des précipitations estivales, tandis qu'une légère augmentation des précipitations estivales est attendue pour une grande partie de l'Europe du Nord.

Scénarios climatiques pour la Suisse

Que signifient concrètement ces projections climatiques régionales pour la Suisse? Cette question trouve une réponse détaillée dans les derniers « Scénarios climatiques pour la Suisse » (CH2018).^{2,155} Ils constituent les scénarios de référence officiels et une base importante pour la stratégie d'adaptation de la Suisse.¹⁵⁶ Ils ont été développés par un consortium de recherche dirigé par MétéoSuisse et l'ETH Zurich et placé sous l'égide du Centre national de services climatologiques (NCCS). Afin d'augmenter le niveau de détail spatial des scénarios EURO-CORDEX et de corriger les erreurs systématiques des modèles, une procédure de réduction d'échelle statistique et de correction des erreurs a été appliquée, et l'échelle des projections des modèles a été réduite à une grille haute résolution de 2 kilomètres pour la Suisse et à des emplacements de stations individuelles.¹⁵⁷

En ce qui concerne le climat estival futur de la Suisse, il semble que, conformément aux projections européennes, on doit s'attendre à un nouveau réchauffement estival (fig. 10.2a). Ce réchauffement attein-

drait environ 5°C pour un scénario sans protection du climat (RCP8.5) ou environ 1,3°C pour un scénario avec protection du climat (RCP2.6), d'ici la fin du 21^e siècle, avec une incertitude considérable du modèle autour de ces estimations centrales. Dans le scénario d'émission optimiste RCP2.6, qui serait très probablement assuré par la réalisation de l'objectif de 2°C fixé à Paris, la poursuite du réchauffement ne se produirait en principe que jusqu'au milieu du siècle et les températures estivales moyennes resteraient ensuite à un niveau relativement stable. L'évolution prévue des précipitations estivales est un peu moins claire (fig. 10.2b). Dans le scénario de protection du climat (RCP2.6), seules de légères diminutions sont attendues d'ici la fin du siècle (environ -4 pour cent). En revanche, si les émissions de gaz à effet de serre poursuivent au même rythme (RCP8.5), une baisse significative des précipitations estivales est prévue à partir du milieu du siècle (environ -21 pour cent). La probabilité d'occurrence d'un été chaud et sec semblable à celui de 1947 devrait donc augmenter considérablement à l'avenir et devenir la norme, du moins dans un scénario sans protection climatique.

Ces changements moyens auront un impact sur de nombreux systèmes et indicateurs. À titre d'exemple, la figure 10.4 montre la répartition spatiale du nombre de jours de chaleur dans les observations de la période de référence 1981–2010 ainsi que vers la fin du siècle, pour un scénario avec et sans protection climatique. Un jour de chaleur est défini comme un jour où la température maximale est supérieure à 30°C et il est généralement associé à une charge thermique notable pour le corps humain. Dans le climat de la période de référence, les jours de chaleur ne se produisent en moyenne pas plus de 15 fois par an sur le Plateau suisse, dans la région de Genève, au Tessin et dans les vallées chaudes (fig. 10.4a). D'ici la fin du siècle, la fréquence d'occurrence augmentera sensiblement dans les deux scénarios et concernera également des régions qui n'ont pas encore été touchées. Dans un scénario avec protection du climat (Fig. 10.4b), plus de vingt jours de chaleur sont attendus dans les régions méridionales et les vallées chaudes, et le phénomène des jours de chaleur s'étendra jusqu'à la zone des Préalpes. Des changements encore plus importants sont attendus pour un scénario sans protection climatique (Fig. 10.4c) : dans ce cas, vers la fin du siècle, il faut s'attendre à plus de trente jours de chaleur par an et même jusqu'à soixante jours de chaleur par an se-

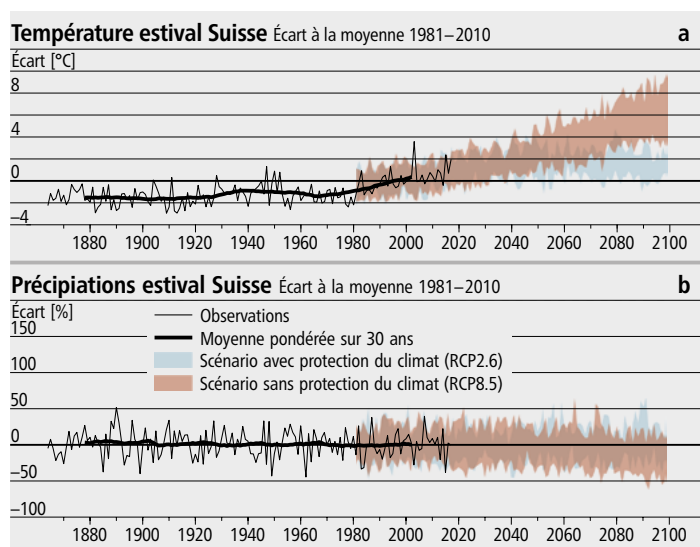


Fig. 10.2 : Évolution précédemment observée et projetée de la température moyenne estivale (en haut) et des précipitations estivales (en bas; juin–août dans chaque cas) en Suisse. Les zones colorées montrent la plage d'incertitude du modèle pour un scénario avec protection du climat (RCP2.6, bleu) et un scénario sans protection du climat (RCP8.5, rouge).²

L'été 1947 dans un climat de l'avenir

L'été 1947 a été exceptionnellement chaud pour l'époque. Depuis lors, cependant, le climat s'est considérablement réchauffé, et il continuera à se réchauffer au cours des prochaines décennies. Dans quelle mesure un été comme celui de 1947 sera-t-il normal dans un climat futur ? Pour répondre à cette question, nous comparons la température moyenne des semestres d'été 1947, 2003 et 2018 avec le climat attendu à la fin du XXI^e siècle. Pour ce faire, nous déterminons la température moyenne suisse pour les scénarios CH2018 – en tant que moyenne pondérée de 19 stations.²⁰ Nous approximons la distribution des températures projetées des semestres d'été avec une distribution normale pour chaque simulation de modèle climatique. Cependant, comme la tendance sous-jacente des données n'a pas été supprimée, la variabilité d'une année à l'autre peut être un peu trop élevée, c'est-à-dire que l'étendue de la distribution peut être un peu trop grande. Nous calculons la valeur moyenne de la température future d'un été sur les trente années 2070–2099 et toutes les projections.

La figure 10.3 montre que la température moyenne du semestre d'été sera supérieure à 11°C dans la plupart des cas vers la fin du siècle, quel que soit le scénario retenu. La température moyenne suisse attendue pour le semestre d'été et toutes les simulations de modèles climatiques est de 11,8°C avec le RCP2.6 et de 15,2°C avec le RCP8.5. Ainsi, des semestres d'été plus chauds que ceux de 1947 ne seront pas rares à la fin du siècle, même dans un scénario avec une protection climatique conséquente. Sans protection climatique, il faut s'attendre à des étés nettement plus chauds que 1947, 2003 et 2018. Un été comme 1947 serait alors même exceptionnellement froid et ne se produirait que très rarement. Si, en revanche, les mesures de protection du climat sont partiellement mises en œuvre (RCP4.5), les étés de 2003 et 2018 correspondraient alors à peu près à un été moyen auquel s'attendre.

En seulement 150 ans, l'importance de l'été 1947 change fondamentalement. S'il s'agissait encore d'un événement exceptionnellement chaud à l'époque, il faut s'attendre à ce que la température estivale observée en 1947 soit souvent dépassée d'ici la fin du 21^e siècle. Si aucune mesure de protection du climat n'est prise, 1947 deviendrait même un été exceptionnellement frais dans un climat futur.

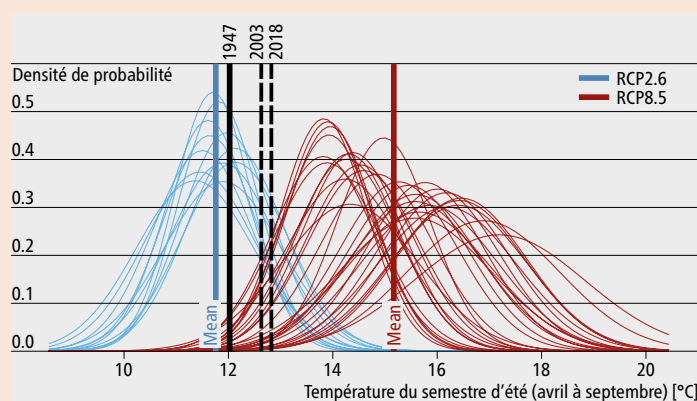
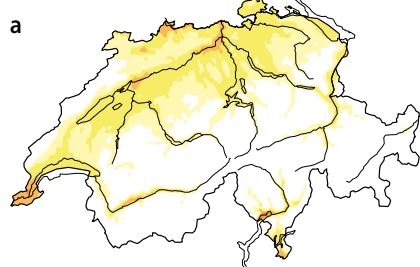
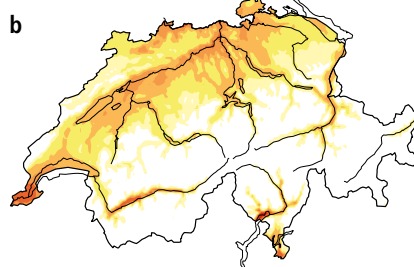


Fig. 10.3 : Distribution de la température du semestre d'été (avril–septembre) pour la période de la fin du siècle (2070–2099). Une distribution normale a été ajustée pour chaque simulation du modèle climatique (lignes fines colorées), la tendance des données n'a pas été supprimée. Les lignes verticales colorées montrent les températures moyennes sur l'ensemble des semestres d'été du RCP respectif. Sont également représentées les températures observées pour les semestres d'été 1947 (12,0°C), 2003 (12,6°C) et 2018 (12,8°C). Pour toutes les données, la température moyenne suisse a été déterminée.²⁰

Observations
1981–2010



Scénario avec protection du climat (RCP2.6)
2070–2099



Scénario sans protection du climat (RCP8.5)
2070–2099

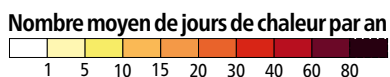
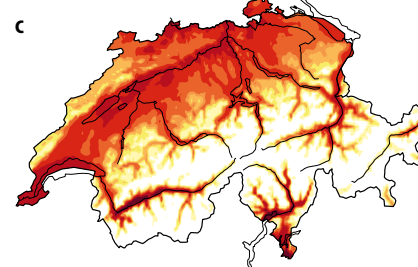


Fig. 10.4: Distribution spatiale du nombre moyen de jours de chaleur (jours avec température maximale >30°C) par an pour a) les observations de la période de référence 1981–2010 et vers la fin du siècle, pour b) un scénario avec protection du climat (RCP2.6), et pour c) un scénario sans protection du climat (RCP8.5).²

ront possibles dans de grandes parties de la Suisse. Une forte charge thermique se manifestera également dans des régions qui n'ont pas été touchées jusqu'à présent, comme le nord des Alpes ou les vallées transversales dans les Alpes.

Un été extrême de l'avenir

À quoi pourrait ressembler à l'avenir un été extrêmement chaud et sec comme celui de 1947? Et quelles en seraient les conséquences? Une thèse de master (ETH Zurich et MétéoSuisse)¹⁵⁸ aborde cette question sur la base des « scénarios climatiques pour la Suisse » CH2018. Pour ce faire, un futur « été 2090 » fictif a été identifié, dont la distribution des températures moyennes estivales attendues vers la fin du siècle sur la Suisse est aussi extrême que celle des étés 1947 ou 2003 vis-à-vis de leurs climats estivaux prédominants respectifs. L'hypothèse retenue est un scénario sans protection du climat (RCP8.5). L'été futur ainsi identifié a été simulé par l'une des chaînes de modèles EURO-CORDEX,

corrigé statistiquement dans le cadre de CH2018, et mis à l'échelle à une résolution spatiale plus fine

Il est montré que le futur « été 2090 » extrême accentue à nouveau clairement les conditions de température et de précipitation de l'année 1947 (fig. 10.5). De grandes parties de la Suisse présentent une température moyenne estivale supérieure à 20°C. La température moyenne descend rarement en dessous de 10°C, même dans les régions de haute altitude des Alpes, et certaines parties de la Suisse centrale et de la Suisse occidentale affichent des valeurs supérieures à 25°C (fig. 10.5b). Sur l'ensemble de la Suisse, « l'été 2090 » est plus de 5°C plus chaud que l'été 1947, et dans certaines régions, des différences de plus de 7°C sont même atteintes (fig. 10.5c). De même, la sécheresse estivale est à nouveau beaucoup plus prononcée en 2090 qu'en 1947. Dans presque toute la Suisse, les précipitations mensuelles moyennes sont inférieures à 100 mm (fig. 10.5, ligne du bas). Par rapport à l'été 1947, qui était déjà très sec à

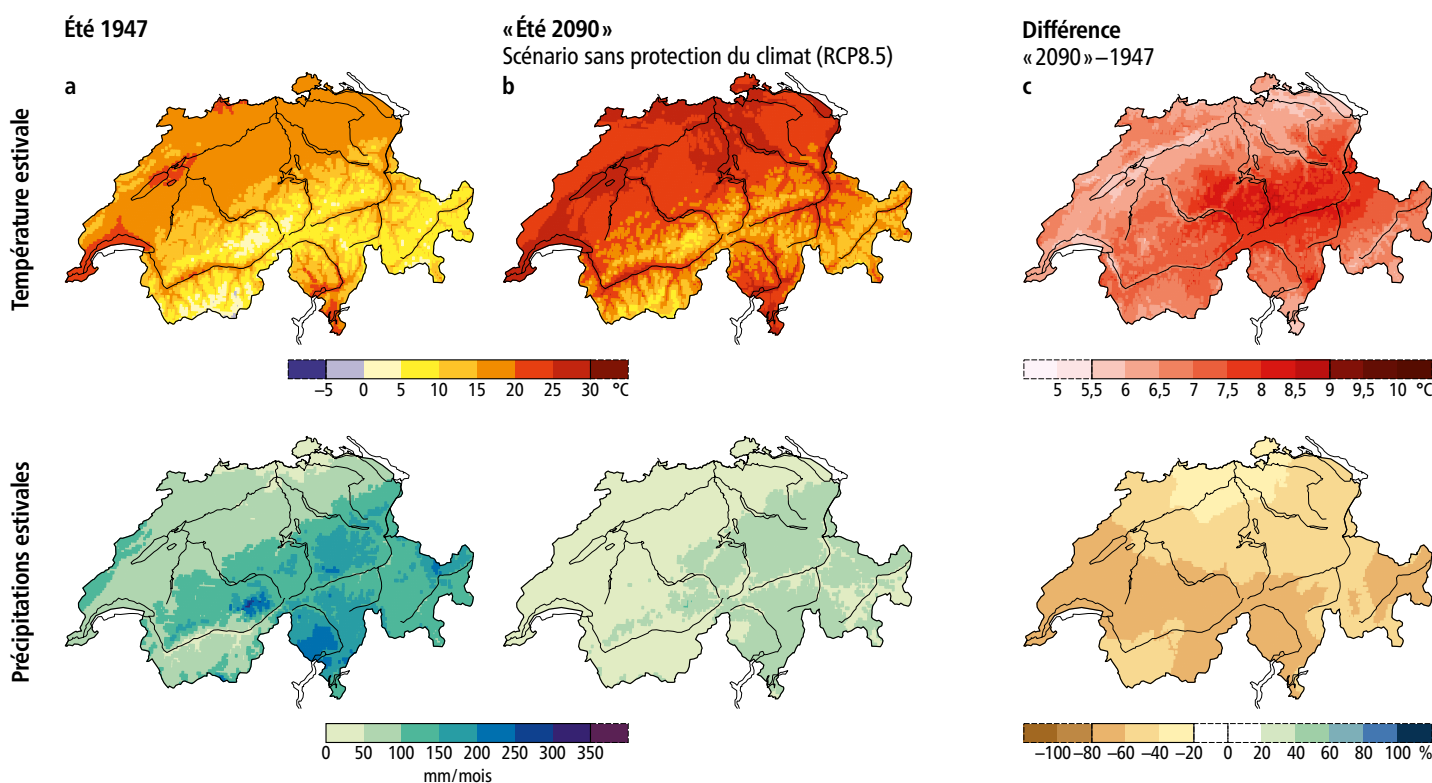


Fig. 10.5: Distribution spatiale de la température moyenne estivale (en haut) et des précipitations estivales (en bas; juin–août dans chaque cas) a) pour l'année 1947 ainsi que b) pour un futur été extrême dans un scénario sans protection climatique (RCP8.5) et c) différence « été 2090 » moins été 1947.¹⁵⁸

l'époque, cela signifie une nouvelle réduction des précipitations de plus de 40 pour cent dans la plupart des régions, voire de plus de 60 pour cent dans certaines régions du sud et de l'ouest de la Suisse (fig. 10.5)

Cet exemple illustre les conditions extrêmes vers lesquelles le climat estival de la Suisse se dirige sans efforts de protection du climat au niveau mondial, et donne une idée des efforts nécessaires en matière d'adaptation au climat. Tout comme aujourd'hui, les cours d'eau, par exemple, pourront offrir un rafraîchissement à court terme lors des chaleurs estivales (fig. 10.6), mais la planification de mesures à long terme pour faire face aux changements est essentielle. La protection du climat et l'adaptation au climat sont également d'une importance capitale pour un pays tempéré comme la Suisse.



Fig. 10.6: Le Rhin à Bâle continuera à fournir de la fraîcheur pendant les mois d'été encore plus chauds (© Shutterstock).

Notes

- 1 BAFU (Hrsg.). Hitze und Trockenheit im Sommer 2018. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. *Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1909*, 96 (2019).
- 2 CH2018. *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. National Centre for Climate Services, Zurich* (2018).
- 3 Vogel, M. M., Zscheischler, J., Wartenburger, R., Dee, D. & Seneviratne, S. I. Concurrent 2018 Hot Extremes Across Northern Hemisphere Due to Human-Induced Climate Change. *Earth's Future* **7**, 692–703 (2019).
- 4 BAFU (Hrsg.). Hitze und Trockenheit im Sommer 2015. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. *Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1629* 108 (2016).
- 5 Grütter, J., Lehmann, S., Auchmann, R., Martius, O. & Brönnimann, S. The heatwaves in Switzerland in summer 1947. *Geogr. Bernensia* **G89** 69–80 (2013).
- 6 Hirschi, E., Auchmann, R., Martius, O. & Brönnimann, S. The 1945–1949 droughts in Switzerland. *Geogr. Bernensia* **G89**, 81–90 (2013).
- 7 Calanca, P. Climate change and drought occurrence in the Alpine region: How severe are becoming the extremes? *Glob. Planet. Change* **57**, 151–160 (2007).
- 8 Rathgeb, U., Bürgi, M. & Wohlgemuth, T. Waldschäden wegen Dürre von 1864 bis 2018 in der Schweiz und insbesondere im Kanton Zürich. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **171**, 249–256 (2020).
- 9 Baumgartner, A. Niederschlagsschwankungen und Dürregefährdung mit Bezug auf den Waldbau. *Forstwissenschaftliches Cent.* **69**, 636–662 (1950).
- 10 Mercanton, P.-L. Les variations périodiques des glaciers des Alpes suisses. Soixante-huitième rapport – 1947. *Les Alpes* **24**, 8 (1948).
- 11 Dewitz, H. A. Versteppung bedroht unseren Kontinent. *Die Zeit* **Nr. 33** (1947).
- 12 Ciné-Journal suisse. Disponible sur <https://memobase.ch/fr/recordSet/bar-001>.
- 13 La recherche sur ce sujet a été soutenue par le Fonds national suisse de la recherche scientifique (projet WeaR, 188701) et la Commission européenne (ERC Grant PALAEO-RA, 787574).
- 14 La contribution de Matthias Röthlisberger a été financée par le Conseil européen de la recherche (CER) dans le cadre du programme Horizon 2020, sous le numéro de subvention 787652.
- 15 Kaspar Staub tient à remercier la Fondation pour la recherche scientifique de l'Université de Zurich (STWF-21-011) pour son financement, ainsi que Inga Birkhäuser et Julia Simola pour leur aide dans la transcription des données historiques.
- 16 MeteoSchweiz. MeteoSchweiz Blog vom 18. Januar 2021. (2021). Disponible sur <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/aktuell/meteoschweiz-blog/meteoschweiz-blog-subpage.html/de/data/blogs/2021/1/waermstes-jahrzehnt-sein-messbeginn.html>.
- 17 BAFU (Hrsg.). Klimawandel in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. *Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 2013*, 105 (2020).
- 18 Mörikofer, W. Die Trockenheit des Sommers 1947 in der Schweiz. *Prisma* **2 (7)**, 201–206 (1947).
- 19 MZA. Die Dürre des Sommers 1947. in *Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt 1947, 84. Jahrgang Zürich* (1948).
- 20 Begert, M. & Frei, C. Long-term area-mean temperature series for Switzerland – Combining homogenized station data and high resolution grid data. *Int. J. Climatol.* **38**, 2792–2807 (2018).
- 21 Bider, M. Die ungewöhnliche Wärmeperiode 1947 statistisch untersucht. *Experientia* **IV/4**, 14 (1948).
- 22 MeteoSchweiz. Hitze und Trockenheit im Sommerhalbjahr 2018 – eine klimatologische Übersicht. *Fachbericht MeteoSchweiz* **272**, 38 (2018).
- 23 Bader, S. Die extreme Sommerhitze im aussergewöhnlicher Witterungsjahr 2003. *Arbeitsbericht der MeteoSchweiz* **200**, 23 (2004).
- 24 BUWAL. Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. *Schriftenreihe Umwelt Nr. 369* 174 (2004).
- 25 Pfister, C. & Rutishauser, M. Dürresommer im Schweizer Mittelland seit 1525. *Unterlagen zum OcCC/ProClim-Work.* **1525**, (2000).
- 26 Scherrer, S. C., Hirschi, M., Spirig, C., Maurer, F. & Kotlarski, S. Trends and drivers of recent summer drying in Switzerland. *Env. Res. Commun.*, 4 (2022).
- 27 MZA. Description synoptique de l'évolution du temps au cours des mois particulièrement secs de l'année 1947. in: *Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt 1947, 84. Jahrgang, Zürich* (1948).
- 28 Schorer, M. Extreme Trockensommer in der Schweiz und ihre Folgen für Natur und Wirtschaft. *Geographica Bernensia* **G40**, Bern (1992).
- 29 Isotta, F. A., Begert, M. & Frei, C. Long-Term Consistent Monthly Temperature and Precipitation Grid Data Sets for Switzerland Over the Past 150 Years. *J. Geophys. Res. Atmos.* **124**, 3783–3799 (2019).
- 30 Bieli, M., Pfahl, S. & Wernli, H. A lagrangian investigation of hot and cold temperature extremes in Europe. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **141**, 98–108 (2015).
- 31 Zschenderlein, P., Fink, A. H., Pfahl, S. & Wernli, H. Processes determining heat waves across different European climates. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **145**, 2973–2989 (2019).
- 32 Pfahl, S. & Wernli, H. Quantifying the relevance of atmospheric blocking for co-located temperature extremes in the Northern Hemisphere on (sub-)daily time scales. *Geophys. Res. Lett.* **39**, (2012).
- 33 Sousa, P. M., Trigo, R. M., Barriopedro, D., Soares, P. M. M. & Santos, J. A. European temperature responses to blocking and ridge regional patterns. *Clim. Dyn.* **50**, 457–477 (2018).
- 34 Röthlisberger, M. & Martius, O. Quantifying the Local Effect of Northern Hemisphere Atmospheric Blocks on the Persistence of Summer Hot and Dry Spells. *Geophys. Res. Lett.* **46**, 10101–10111 (2019).
- 35 Altenhoff, A. M., Martius, O., Croci-maspoli, M., Schwierz, C. & Davies, H. C. Linkage of atmospheric blocks and synoptic-scale Rossby waves: A climatological analysis. *Tellus, Ser. A Dyn. Meteorol. Oceanogr.* **60**, 1053–1063 (2008).
- 36 Woollings, T. *et al.* Blocking and its Response to Climate Change. *Curr. Clim. Chang. reports* **4**, 287–300 (2018).
- 37 Fink, A. H. *et al.* The 2003 European summer heatwaves and drought--synoptic diagnosis and impacts. *Weather* **59**, 209–216 (2004).
- 38 Black, E., Blackburn, M., Harrison, G., Hoskins, B. & Methven, J. Factors contributing to the summer 2003 European heatwave. *Weather* **59**, 217–223 (2004).
- 39 Spensberger, C. *et al.* Dynamics of concurrent and sequential Central European and Scandinavian heatwaves. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **146**, 2998–3013 (2020).

- 40 Schneidereit, A. *et al.* Large-Scale Flow and the Long-Lasting Blocking High over Russia: Summer 2010. *Mon. Weather Rev.* **140**, 2967–2981 (2012).
- 41 Trenberth, K. E. & Fasullo, J. T. Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010. *J. Geophys. Res. Atmos.* **117**, 17103 (2012).
- 42 Fragkoulidis, G., Wirth, V., Bossmann, P. & Fink, A. H. Linking Northern Hemisphere temperature extremes to Rossby wave packets. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **144**, 553–566 (2018).
- 43 Shutts, G. J. The propagation of eddies in diffluent jetstreams: Eddy vorticity forcing of ‘blocking’ flow fields. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **109**, 737–761 (1983).
- 44 Steinfeld, D. & Pfahl, S. The role of latent heating in atmospheric blocking dynamics: a global climatology. *Clim. Dyn.* **53**, 6159–6180 (2019).
- 45 Röthlisberger, M., Frossard, L., Bosart, L. F., Keyser, D. & Martius, O. Recurrent Synoptic-Scale Rossby Wave Patterns and Their Effect on the Persistence of Cold and Hot Spells. *J. Clim.* **32**, 3207–3226 (2019).
- 46 Hersbach, H. *et al.* The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **146**, 1999–2049 (2020).
- 47 Sprenger, M. & Wernli, H. The LAGRANTO Lagrangian analysis tool – Version 2.0. *Geosci. Model Dev.* **8**, 2569–2586 (2015).
- 48 Scherrer, S. C., Croci-Maspoli, M., Schwierz, C. & Appenzeller, C. Two-dimensional indices of atmospheric blocking and their statistical relationship with winter climate patterns in the Euro-Atlantic region. *Int. J. Climatol.* **26**, 233–249 (2006).
- 49 Slivinski, L. C. *et al.* Towards a more reliable historical reanalysis: Improvements for version 3 of the Twentieth Century Reanalysis system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **145**, 2876–2908 (2019).
- 50 Hoskins, B. J. & Karoly, D. J. The Steady Linear Response of a Spherical Atmosphere to Thermal and Orographic Forcing. *J. Atmos. Sci.* **38**, 1179–1196 (1981).
- 51 Walter, K., Luksch, U. & Fraedrich, K. A Response Climatology of Idealized Midlatitude Thermal Forcing Experiments with and without a Storm Track. *J. Clim. Clim.* **14**, 467–484 (2001).
- 52 Cassou, C., Terray, L. & Phillips, A. S. Tropical Atlantic Influence on European Heat Waves. *J. Clim.* **18**, 2805–2811 (2005).
- 53 Duchez, A. *et al.* Drivers of exceptionally cold North Atlantic Ocean temperatures and their link to the 2015 European heat wave. *Environ. Res. Lett.* **11**, 074004 (2016).
- 54 Ghosh, R., Müller, W. A., Baehr, J. & Bader, J. Impact of observed North Atlantic multidecadal variations to European summer climate: a linear baroclinic response to surface heating. *Clim. Dyn.* **48**, 3547–3563 (2017).
- 55 Zhang, R., Sun, C., Zhu, J., Zhang, R. & Li, W. Increased European heat waves in recent decades in response to shrinking Arctic sea ice and Eurasian snow cover. *npj Clim. Atmos. Sci.* **2020** **31**, 3, 1–9 (2020).
- 56 Petoukhov, V., Rahmstorf, S., Petri, S. & Schellnhuber, H. J. Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **110**, 5336–5341 (2013).
- 57 Kornhuber, K., Petoukhov, V., Petri, S., Rahmstorf, S. & Coumou, D. Evidence for wave resonance as a key mechanism for generating high-amplitude quasi-stationary waves in boreal summer. *Clim. Dyn.* **49**, 1961–1979 (2017).
- 58 Wirth, V. Waveguidability of idealized midlatitude jets and the limitations of ray tracing theory. *Weather Clim. Dyn.* **1**, 111–125 (2020).
- 59 Trenberth, K. E. & Shea, D. J. Atlantic hurricanes and natural variability in 2005. *Geophys. Res. Lett.* **33**, 12704 (2006).
- 60 Hadley Centre for Climate Prediction and Research. HadISST1.1 – Global Monthly Mean Gridded SSTs (1870–2015). *NCAS Br. Atmos. Data Cent.* (2007).
- 61 Mitchell, D. *et al.* Attributing human mortality during extreme heat waves to anthropogenic climate change. *Environ. Res. Lett.* **11**, 074006 (2016).
- 62 Bastos, A. *et al.* Impacts of extreme summers on European ecosystems: a comparative analysis of 2003, 2010 and 2018. *Philos. Trans. R. Soc. B* **375**, 20190507 (2020).
- 63 Beillouin, D., Schaubberger, B., Bastos, A., Ciais, P. & Makowski, D. Impact of extreme weather conditions on European crop production in 2018. *Philos. Trans. R. Soc. B* **375**, (2020).
- 64 Meehl, G. A. & Tebaldi, C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science* **305**, 994–997 (2004).
- 65 Cattiaux, J. *et al.* Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate. *Geophys. Res. Lett.* **37**, L20704 (2010).
- 66 Fischer, E. M., Seneviratne, S. I., Lüthi, D. & Schär, C. Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves. *Geophys. Res. Lett.* **34**, 1–6 (2007).
- 67 Seneviratne, S. I., Lüthi, D., Litschi, M. & Schär, C. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature* **443**, 205–209 (2006).
- 68 Koster, R. D. *et al.* Regions of Strong Coupling Between Soil Moisture and Precipitation. *Science (80-.)*. **305**, 1138–1140 (2004).
- 69 Seneviratne, S. I. *et al.* Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Rev.* **99**, 125–161 (2010).
- 70 Teuling, A. J. *et al.* A regional perspective on trends in continental evaporation. *Geophys. Res. Lett.* **36**, 2404 (2009).
- 71 Schwingshackl, C., Hirschi, M. & Seneviratne, S. I. Quantifying Spatiotemporal Variations of Soil Moisture Control on Surface Energy Balance and Near-Surface Air Temperature. *J. Clim.* **30**, 7105–7124 (2017).
- 72 Schär, C. *et al.* The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nat.* **2004** **4276972** **427**, 332–336 (2004).
- 73 Schär, C., Lüthi, D., Beyerle, U. & Heise, E. The soil-precipitation feedback: A process study with a regional climate model. *J. Clim.* **12**, 722–741 (1999).
- 74 Pal, J. S. & Eltahir, E. A. B. Pathways Relating Soil Moisture Conditions to Future Summer Rainfall within a Model of the Land-Atmosphere System. *J. Clim.* **14**, 1227–1242 (2001).
- 75 Koster, R. D., Suarez, M. J., Higgins, R. W. & Van den Dool, H. M. Observational evidence that soil moisture variations affect precipitation. *Geophys. Res. Lett.* **30**, (2003).
- 76 Guo, Z. *et al.* GLACE: The Global Land-Atmosphere Coupling Experiment. Part II: Analysis. (2006).
- 77 Findell, K. L., Gentine, P., Lintner, B. R. & Kerr, C. Probability of afternoon precipitation in eastern United States and Mexico enhanced by high evaporation. *Nat. Geosci.* **4**, 434–439 (2011).
- 78 Christidis, N., Jones, G. S. & Stott, P. A. Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nat. Clim. Chang.* **2014** **51** **5**, 46–50 (2014).

- 79 Russo, S., Sillmann, J. & Fischer, E. M. Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environ. Res. Lett.* **10**, 124003 (2015).
- 80 Santanello, J. A. *et al.* Land–Atmosphere Interactions: The LoCo Perspective. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **27**, 3713–3730 (2018).
- 81 López-Moreno, J. I. *et al.* Recent temperature variability and change in the Altiplano of Bolivia and Peru. *Int. J. Climatol.* **36**, 1773–1796 (2016).
- 82 Teuling, A. J. A hot future for European droughts. *Nat. Clim. Chang.* **2018** *85* **8**, 364–365 (2018).
- 83 Vogel, M. M. *et al.* Regional amplification of projected changes in extreme temperatures strongly controlled by soil moisture-temperature feedbacks. *Geophys. Res. Lett.* **44**, 1511–1519 (2017).
- 84 Samaniego, L. *et al.* Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nat. Clim. Chang.* **2018** *85* **8**, 421–426 (2018).
- 85 García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, R. M., Luterbacher, J. & Fischer, E. M. A Review of the European Summer Heat Wave of 2003. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **40**, 267–306 (2010).
- 86 Ogi, M., Yamazaki, K. & Tachibana, Y. The summer northern annular mode and abnormal summer weather in 2003. *Geophys. Res. Lett.* **32**, 1–4 (2005).
- 87 Miralles, D. G., Teuling, A. J., Van Heerwaarden, C. C. & De Arellano, J. V. G. Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation. *Nat. Geosci.* **2014** *75* **7**, 345–349 (2014).
- 88 Toreti, A. *et al.* The Exceptional 2018 European Water Seesaw Calls for Action on Adaptation. *Earth's Futur.* **7**, 652–663 (2019).
- 89 Dirmeyer, P. A., Balsamo, G., Blyth, E. M., Morrison, R. & Cooper, H. M. Land–Atmosphere Interactions Exacerbated the Drought and Heatwave Over Northern Europe During Summer 2018. *AGU Adv.* **2**, e2020AV000283 (2021).
- 90 Seneviratne, S. I. *et al.* Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. in *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds. Masson-Delmotte, V. *et al.*) (Cambridge University Press, 2021).
- 91 Vogel, M. M., Zscheischler, J. & Seneviratne, S. I. Varying soil moisture-atmosphere feedbacks explain divergent temperature extremes and precipitation projections in central Europe. *Earth Syst. Dyn.* **9**, 1107–1125 (2018).
- 92 Pfister, C. *Wetternachhersage 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496–1995)*. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, (1999).
- 93 Schorer, M. Klimaänderung Schweiz: Trockenheit in der Schweiz. in *Workshop Bericht* (ed. OcCC) 17 (OcCC, 2000).
- 94 Brugger, H. *Statistisches Handbuch der schweizerischen Landwirtschaft*. (Kommissionsverlag, Verbandsdruckerei AG, 1968).
- 95 SNB. 40. Geschäftsbericht der Schweizerischen Nationalbank. Bern, 67 (1947).
- 96 Erdin, D. *Das Trockenjahr 2018. AGRISTAT Aktuell* (2018).
- 97 Keller, F. & Fuhrer, J. Die Landwirtschaft und der Hitzesommer 2003. *Agrar. Schweiz* **11**, 403–410 (2004).
- 98 Fossati, D. & Brabant, C. Die Weizenzüchtung in der Schweiz. *Agrarforschung* **10**, 447–458 (2003).
- 99 SBV. *Statistische Erhebungen und Schätzungen auf dem Gebiete der Landwirtschaft*. (Schweizerisches Bauernsekretariat, 1948).
- 100 SBV. *Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung (SES)*. SBV (Ed.) (2021).
- 101 Nous remercions Christoph Frei de MétéoSuisse pour avoir fourni des champs de précipitations et de températures mensuelles cohérentes pour 1947, 2003 et 2018.
- 102 Schüepp, M., Schiesser, H. H., Hunziker, H., Scherrer, H. U. & Schmidtke, H. The winterstorm “Vivian” of 27 February 1990: About the meteorological development, wind forces and damage situation in the forests of Switzerland. *Theor. Appl. Climatol.* **1994** *493* **49**, 183–200 (1994).
- 103 Usbeck, T. *et al.* Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. *Agric. For. Meteorol.* **150**, 47–55 (2010).
- 104 Müller, H. Forstliche Chronik 1947. *Schweiz. Z. Forstwes.* **99**, 438–443 (1948).
- 105 Heinis, F. Beobachtungen über den Einfluss der Trockenheit des Sommers 1947 auf die Vegetation im unteren Baselbiet. *Tätigkeitsber. Naturforsch. Ges. Basell.* **18**, 156–159 (1949).
- 106 Zoller, H. & Lüdi, W. Einige Beobachtungen über die Dürreschäden des Sommers 1947 in der Nordschweiz und am Schweizerischen Jura. *Ber. Geobot. Forschungsinst. Rübel* **73–85** (1949).
- 107 Schweizer Illustrierte. 27.08.1947
- 108 Keller, J. Erhebung über den Borkenkäferbefall im Jahre 1949. *Prakt. Forstwirt Schweiz* **1950**, 118–127 (1950).
- 109 Bütikofer, N. Historische Waldschäden in der Schweiz 1800–1960. (Historisches Institut der Universität Bern, 1987).
- 110 Brunner, I. Naturchronik für das Jahr 1947. *Jahresber. Naturforsch. Ges. Graubünden* **81**, 9–13 (1948).
- 111 Bavier, B. Der Waldbrand am Calanda im August/September 1943. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwes.* **95**, 291–298 (1944).
- 112 Gimmi, U., Bürgi, M. & Wohlgemuth, T. Wie oft brannte der Walliser Wald im 20. Jahrhundert? *Schweizerische Zeitschrift für Forstwes.* **155**, 437–440 (2004).
- 113 Wohlgemuth, T. *et al.* Früher Laubfall der Buche während der Sommertrockenheit 2018: Resistenz oder Schwächesymptom? *Schweizerische Zeitschrift für Forstwes.* **171**, 257–269 (2020).
- 114 Dubach, V. *et al.* Waldschutzüberblick 2020. *WSL Berichte* **107**, 1–58 (2021).
- 115 Jakoby, O., Lischke, H. & Wermelinger, B. Climate change alters elevational phenology patterns of the European spruce bark beetle (*Ips typographus*). *Glob. Chang. Biol.* **25**, 4048–4063 (2019).
- 116 Haag, E. Die Wiederherstellung der käfergeschädigten Waldungen der ersten Jurakette ob dem Bielersee. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwes.* **112**, 693–699 (1961).
- 117 Baltensweiler, A. *et al.* Räumliche Analyse von Trockenheitssymptomen im Schweizer Wald mit Sentinel-2-Satellitendaten. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwes.* **171**, 298–301 (2020).
- 118 Pfister, C., Bütikofer, N., Schuler, A. & Volz, R. Witterungsextreme und Waldschäden in der Schweiz. Eine historisch-kritische Untersuchung von Schadenmeldungen aus schweizerischen Wäldern in ihrer Beziehung zur Klimabelastung, insbesondere durch sommerliche Dürreperioden. (1988).
- 119 BAFU. Medienmitteilung: Winterstürme Anfang 2018: Rund 1.3 Mio m³ Holz liegen am Boden. 18.01.2018

- 120 Usbeck, T. Wintersturmschäden im Schweizer Wald von 1865 bis 2014. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwes.* **166**, 184–190 (2015).
- 121 Brändli, U. B., Abegg, M. & Allgaier Leuch, B. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der vierten Erhebung 2009–2017. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Bern (2020).
- 122 Bürgi, M. & Schuler, A. Driving forces of forest management – an analysis of regeneration practices in the forests of the Swiss Central Plateau during the 19th and 20th century. *For. Ecol. Manage.* **176**, 173–183 (2003).
- 123 Nagel, J.-L. Influences des éléments météorologiques sur l'accroissement des forêts. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwes.* **101**, 512–530 (1950).
- 124 WGMS. Global Glacier Change Bulletin No. 4 (2018–2019). (ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zürich, 2021).
- 125 Steiner, D. *et al.* Sensitivity of European glaciers to precipitation and temperature – two case studies. *Clim. Chang.* **90**, 413–441 (2008).
- 126 GLAMOS (1881–2021). The Swiss Glaciers 1880–2018/19. Glaciological Reports No 1–140. Yearbooks of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences (SCNAT), published since 1964 by VAW / ETH Zurich.
- 127 Zumbühl, H. J., Nussbaumer, S. U., Holzhauser, H. & Wolf, R. Die Grindelwaldgletscher – Kunst und Wissenschaft. (Bern: Haupt, 2016).
- 128 Haefeli, R. & Kasser, P. Beobachtungen im Firn- und Ablationsgebiet des grossen Aletschgletschers. *Schweizerische Bauzeitung* **66**, 489–494 (1948).
- 129 Huss, M. Extrapolating glacier mass balance to the mountain-range scale: the European Alps 1900–2100. *Cryosph.* **6**, 713–727 (2012).
- 130 Hoinkes, H. C. Glacier variation and weather. *J. Glaciol.* **7**, 3–19 (1968).
- 131 Brönnimann, S. *et al.* Last phase of the Little Ice Age forced by volcanic eruptions. *Nat. Geosci.* **12**, 650–656 (2019).
- 132 Huss, M. & Hock, R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nat. Clim. Chang.* **8**, 135–140 (2018).
- 133 Klebelsberg, R. Die Gletscher der österreichischen Alpen 1947–1949. Bericht über die Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins. *Zeitschrift für Gletscherkd. und Glazialgeol.* **1**, 203–219 (1950).
- 134 Ragettli, M. S., Vicedo-Cabrera, A. M., Schindler, C. & Rössli, M. Exploring the association between heat and mortality in Switzerland between 1995 and 2013. *Environ. Res.* **158**, 703–709 (2017).
- 135 Ragettli, M. S., Vicedo-Cabrera, A. M., Flückiger, B. & Rössli, M. Impact of the warm summer 2015 on emergency hospital admissions in Switzerland. *Environ. Health* **18**, (2019).
- 136 Vicedo-Cabrera, A. M., Ragettli, M. S., Schindler, C. & Rössli, M. Excess mortality during the warm summer of 2015 in Switzerland. *Swiss Med. Wkly.* **146**, w14379 (2016).
- 137 Grize, L., Huss, A., Thommen, O., Schindler, C. & Braun-Fahrlander, C. Heat wave 2003 and mortality in Switzerland. *Swiss Med. Wkly.* **135**, 200–205 (2005).
- 138 Vicedo-Cabrera, A. M. *et al.* A multi-country analysis on potential adaptive mechanisms to cold and heat in a changing climate. *Environ. Int.* **111**, 239–246 (2018).
- 139 Preston, S. H., Keyfitz, N. & Schoen, R. Causes of death: life tables for national population. (Seminar Press, 1972).
- 140 Kueh, M. T. & Lin, C. Y. The 2018 summer heatwaves over northwestern Europe and its extended-range prediction. *Sci. Reports 2020 101* **10**, 1–18 (2020).
- 141 Ragettli, M. S. & Rössli, M. Heat-health action plans to prevent heat-related deaths – experiences from Switzerland. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforsch. - Gesundheitsschutz* **62**, 605–611 (2019).
- 142 Sera, F. *et al.* How urban characteristics affect vulnerability to heat and cold: a multi-country analysis. *Int. J. Epidemiol.* **48**, 1101–1112 (2019).
- 143 Romanello, M. *et al.* The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: code red for a healthy future. *Lancet* **398**, 1619–1662 (2021).
- 144 Zhao, Q. *et al.* Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study. *Lancet. Planet. Heal.* **5**, e415–e425 (2021).
- 145 Green, H. *et al.* Impact of heat on mortality and morbidity in low and middle income countries: A review of the epidemiological evidence and considerations for future research. *Environ. Res.* **171**, 80–91 (2019).
- 146 Vicedo-Cabrera, A. M. *et al.* The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nat. Clim. Chang.* **11**, 492–500 (2021).
- 147 Gasparrini, A. *et al.* Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *Lancet. Planet. Heal.* **1**, e360 (2017).
- 148 IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- 149 climateactiontracker.org. Disponible sur <https://climateactiontracker.org/global/cat-thermometer>.
- 150 Giorgi, F. Thirty Years of Regional Climate Modeling: Where Are We and Where Are We Going next? *J. Geophys. Res. Atmos.* **124**, 5696–5723 (2019).
- 151 Kotlarski, S. *et al.* Regional climate modeling on European scales: A joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosci. Model Dev.* **7**, 1297–1333 (2014).
- 152 Jacob, D. *et al.* Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Reg. Environ. Chang.* **20**, 1–20 (2020).
- 153 Brogli, R., Kröner, N., Sørland, S. L., Lüthi, D. & Schär, C. The Role of Hadley Circulation and Lapse-Rate Changes for the Future European Summer Climate. *J. Clim.* **32**, 385–404 (2019).
- 154 Kröner, N. *et al.* Separating climate change signals into thermodynamic, lapse-rate and circulation effects: theory and application to the European summer climate. *Clim. Dyn.* **48**, 3425–3440 (2017).
- 155 Klimaszenarien Schweiz. Disponible sur www.klimaszenarien.ch.
- 156 Schweizerische Eidgenossenschaft. Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz: Aktionsplan 2020–2025, Bern, 164 (2020).
- 157 Feigenwinter Iris *et al.* Exploring quantile mapping as a tool to produce user tailored climate scenarios for Switzerland – MeteoSwiss. (2018).
- 158 Mastai, A. Storylines of future climate extremes in Switzerland. (Master's Thesis ETH Zurich/MeteoSwiss, 2022).

Crédit photos

Couverture (haut): Archives privées, Deacon Pascal Huguenin

Couverture (bas): Keystone, Anthony Anex

Fig. 1.1: Keystone, Anthony Anex

Fig. 1.3: Schweizer Illustrierte, 27 Août 1947, courtoisie de Ringier Axel Springer, maison d'édition

Fig. 1.4: Archives privées, Deacon Pascal Huguenin

Fig. 7.1: Schweizer Illustrierte, August 27, 1947, by courtesy Ringier Axel Springer publishing house

Fig. 7.2: Photo Ulrich Wasem

Fig. 7.3: Winterthur Libraries, Winterthur Collection

Fig. 8.4: Photo Paul-L Mercanton, Les variations périodiques des glaciers des Alpes suisses. Soixante-huitième rapport – 1947. *Les Alpes* 24, 8 (1948)

Fig. 9.2: ETH-Bibliothek Zurich, archive photo / Photographer: Comet Photo AG (Zurich) / Com_M01-0455-0006 / CC BY-SA 4.0

Fig. 10.6: Peeradontax/Shutterstock.com

GEOGRAPHICA BERNENSIA

Open Access Online Publications

www.geography.unibe.ch/services/geographica_bernensia/online_publications/

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

UNIVERSITÄT BERN
OESCHGER CENTRE
for Natural Risks

MeteorTest

sc|nat
Geosciences
Platform of the Swiss Academy of Sciences
Atmospheric Chemistry and Physics ACP

u^b
UNIVERSITÄT
BERN
OESCHGER CENTRE
CLIMATE CHANGE RESEARCH

**1868 – Les inondations
qui changèrent la Suisse:**
Causes, conséquences et leçons pour le futur

GEOGRAPHICA BERNENSIA

Brönnimann, S.; Rohr, C.; Stucki, P.; Summermatter, S.; Bandhauer, M.; Barton, Y.; Fischer, A.; Froidevaux, P. A.; Germann, U.; Grosjean, M.; Hupfer, F.; Ingold, K. M.; Isotta, F.; Keiler, M.; Romppainen-Martius, O.; Messmer, M. B.; Mülchi, R. I.; Panziera, L.; Pfister, L. M.; Raible, C.; Reist, T.; Rössler, O.; Röthlisberger, V.; Scherrer, S. C.; Weingartner, R.; Zappa, M.; Zimmermann, M.; Zischg, A. (2018) 1868 – Les inondations qui changèrent la Suisse: Causes, conséquences et leçons pour le futur. Geographica Bernensia G94, 51 S., doi:10.4480/GB2018.G94.03

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

UNIVERSITÄT BERN
OESCHGER CENTRE
CLIMATE CHANGE RESEARCH

SEBASTIANA
STIFTUNG

scnat
platform of the Swiss Academy of Sciences
piattaforma della Accademia Svizzera
plataforma da Accademia svizra
plataforma de l'Accademia d'Ultraschizra

u^b
UNIVERSITÄT
BERN
OESCHGER CENTRE
CLIMATE CHANGE RESEARCH

Changement climatique et saisons

GEOGRAPHICA BERNENSIA

Rutishauser, T.; Brönnimann, S.; Gehrig, R.; Pietragalla, B.; Baumgarten, F.; Vitasse, Y.; Stöckli, S.; Pfister, C.; Holzkämper, A.; Hund, A.; Fossati, D.; Meier, M.; Weingartner, R.; Buchmann, M. (2020) Changement climatique et saisons. Geographica Bernensia G97, 27 S., doi:10.4480/GB2020.G97.02

