



Changement climatique et saisons



Table des matières

Le calendrier des plantes documente le rythme des saisons	4
Regula Gehrig, Barbara Pietragalla, Frederik Baumgarten, Yann Vitasse, This Rutishauser	
Phénologie des arbres forestiers – Comment les changements climatiques se manifestent en forêt	8
Frederik Baumgarten, Yann Vitasse, This Rutishauser	
Calendriers phénologiques dans le monde animal	10
Sibylle Stöckli, This Rutishauser	
Un millénaire de chroniques météorologiques et saisonnières	12
Christian Pfister	
Des hivers plus courts et des étés plus longs	14
Stefan Brönnimann	
Impacts des changements de saisonnalité sur l'agriculture	16
Annelie Holzkämper, Andreas Hund, Dario Fossati	
Gelées tardives et changement climatique – Quels risques?	18
Stefan Brönnimann, Annelie Holzkämper, Michael Meier	
Les cours d'eau au fil des saisons	20
Rolf Weingartner	
Neige: changements actuels et futurs	22
Moritz Buchmann	
Bibliographie et illustrations	24

Rédaction:

This Rutishauser

Traduction:

Anja Bruschweiler

Relecture:

François Jeanneret

Mise en page:

Alexander Hermann

Données bibliographiques:

Rutishauser, This; Brönnimann, Stefan; Gehrig, Regula; Pietragalla, Barbara; Baumgarten, Frederik; Vitasse, Yann; Stöckli, Sibylle; Pfister, Christian; Holzkämper, Annelie; Hund, Andreas; Fossati, Dario; Meier, Michael; Weingartner, Rolf; Buchmann, Moritz (2022). *Changement climatique et saisons*. *Geographica Bernensia*, G97, 28 S., doi:10.4480/GB2020.G97.02.

Traduction:

Allemand (doi:10.4480/GB2020.G97.01)

© GEOGRAPHICA BERNENSIA 2022

Institut de Géographie de l'Université de Berne, Suisse

Impression: Publikation Digital AG



Avant-propos

Le changement climatique nous amène à porter une attention croissante aux changements dans notre environnement. Les événements extrêmes comme les tempêtes, les inondations, les sécheresses et les vagues de chaleur ont un impact direct sur notre cadre de vie et notre quotidien. **L'influence du changement climatique sur les saisons** est en revanche moins visible, mais d'une importance cruciale. Des dates de floraison et de récolte qui se décalent, une diminution des jours de neige en altitude et une absence de neige sur le Plateau suisse, tous ces phénomènes ont de graves conséquences, non seulement sur l'environnement, mais aussi sur l'agriculture, le tourisme et l'aménagement du territoire, surtout si l'on considère leur évolution sur plusieurs années ou décennies.

L'observation phénologique – définie au sens large comme l'étude des phénomènes saisonniers récurrents dans le monde vivant – nous permet de **percevoir, par nos sens, au quotidien**, les changements qui s'opèrent sous l'effet du réchauffement climatique. Les observations phénologiques sont souvent transmises de génération en génération créant ainsi une continuité importante dans les histoires familiales. Elles fournissent aussi de précieuses descriptions de lieux. Mais avant tout, ces observations servent à nous rappeler le lien étroit qui a de tout temps existé entre les êtres humains et la nature.

La recherche phénologique est forte d'une longue tradition à l'Institut de Géographie de l'Université de Berne. Ce qui a commencé à la fin des années 1960 comme un réseau d'observation et une base de données pour l'agriculture et l'aménagement du territoire a abouti à la création du programme d'observation **BernClim** qui célébra sa première saison complète d'observation en 1970. Les observations du programme BernClim, combinées aux riches quantités de données récoltées par le **réseau d'observation phénologique** de Météo-

Suisse, servent aujourd'hui de base pour l'élaboration de descriptions spatio-temporelles de 1950 à nos jours. Nous disposons en outre de données remontant jusqu'au haut Moyen Âge. Ces dernières offrent une perspective unique sur l'évolution du climat à long terme.

Cette brochure a été réalisée à l'occasion du 50^{ème} anniversaire du programme d'observation **BernClim**. Les chercheuses et chercheurs qui prennent la parole dans ces pages s'engagent tous avec ferveur, passion et persévérance dans leurs activités d'observation et d'analyse phénologique, non seulement à Berne, mais aussi auprès d'autres institutions. Ils sillonnent forêts et prairies pour observer les plantes et animaux ou tirent leurs conclusions à partir de données météorologiques, de mesures de neige ou de débit dans les cours d'eau.

La plupart des récits et études présentés dans cette brochure sont **basés sur des observations réalisées par des bénévoles**. Ces derniers ont pris note, sur plusieurs années, voir décennies, des changements qui s'opéraient dans la nature. La recherche phénologique ne pourrait exister sans les précieuses contributions de toutes ces personnes. En même temps, ce modus operandi présente également un défi de taille, celui de dresser un tableau complet et systématique à partir de nombreuses observations individuelles.

La publication de cette brochure a bénéficié du soutien de la **Fondation Sebastianiana**, du **Centre Oeschger pour la recherche sur le changement climatique** et la **Commission suisse pour la phénologie et la saisonnalité (CPS)** de l'**Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT)**. Elle est dédiée à toutes celles et ceux qui aspirent à documenter et à mieux comprendre l'interaction entre les êtres humains et la nature à l'échelle des saisons.



Réseau d'observation dans la région de Berne vers 1974¹.

Le calendrier des plantes documente le rythme des saisons

En Suisse, la phénologie des plantes est observée par différents réseaux de surveillance. Elle est fortement influencée par certains facteurs environnementaux. Ce phénomène devient d'autant plus apparent avec le changement climatique rapide que nous vivons actuellement. La façon dont de nombreuses essences forestières réagissent, à différentes altitudes et au fil du temps, est en train de changer fondamentalement. Certaines lois de la nature inchangées depuis des décennies se modifient, compliquant les projections et prévisions futures.

Regula Gehrig, Barbara Pietragalla, Frederik Baumgarten, Yann Vitasse, This Rutishauser

L'observation des différents stades de développement des plantes a une tradition millénaire. À l'époque des premières sociétés agraires, la sécurité alimentaire dépendait en grande partie de la façon dont les plantes se développaient en fonction des conditions climatiques. Les séquences temporelles jouent un rôle important dans les communautés végétales, mais aussi dans l'interaction entre plantes, animaux et humains.

Certains phénomènes saisonniers, comme la floraison ou le débourrement réagissent en intégrant les changements survenus dans notre système climatique. Au printemps, la hausse des températures et l'allongement des jours agissent comme éléments moteurs, ils stimulent la croissance, tandis que le manque d'eau et les conditions météorologiques extrêmes, comme le gel et les tempêtes, freinent le développement végétal (fig. 1). Des températures hivernales adéquates sont, cependant, tout aussi important; le froid permet aux plantes vivaces d'entrer et de rester en phase de repos. Nos connaissances sur le processus de dormance sont importantes, toutefois, encore lacunaires.

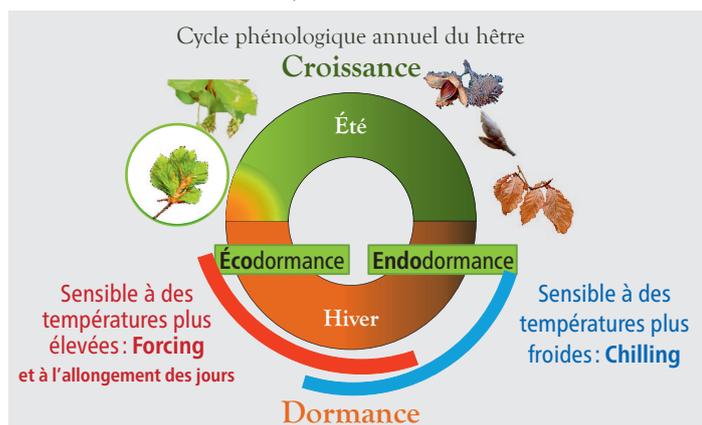


Fig. 1: Stades de développement annuel des plantes

Le climat, le sol, la faune et la flore associées, les conditions météorologiques et des facteurs propres à chaque plante jouent un rôle important dans le cycle annuel des plantes. Au printemps, les conditions climatiques devient le facteur dominant dans les zones tempérées. Le lien étroit existant entre températures et observations phénologiques font de ces dernières un excellent indicateur d'impact. En automne, le raccourcissement des journées, les sécheresses estivales et la diminution des températures contribuent au jaunissement des feuilles. Les observations phénologiques des hêtres et marronniers depuis 1951 montrent peu de changements. De manière générale, l'automne arrive légèrement plus tôt en montagne et légèrement plus tard sous les 800 mètres d'altitude. Un jaunissement très précoce des feuilles a été observé durant les étés caniculaires de 2003, 2015 et 2018. À certains endroits particulièrement secs, les feuilles du hêtre ont commencé à jaunir dès la fin juillet et en août.

Une grande variabilité d'un endroit à l'autre

Les divers réseaux d'observations phénologiques collectent des données de manière systématique et uniforme, facilitant ainsi la comparaison spatiale. Toute observation contient, cependant, un certain degré d'imprécision due aux caractéristiques génétiques propres à chaque plante, à des différences dans les conditions environnementales de

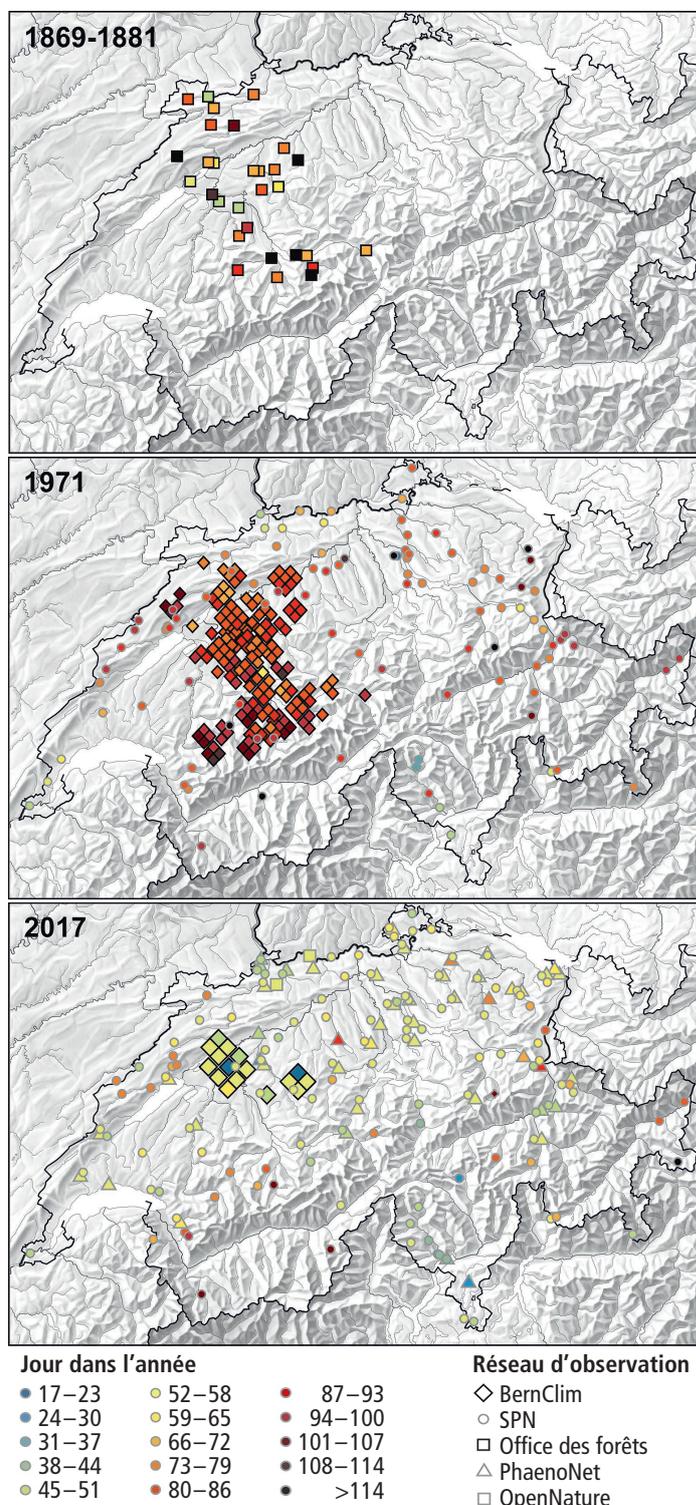


Fig. 2: Données relatives à la floraison du noisetier recueillies par les réseaux d'observations phénologiques suisses au 19^{ème} siècle (Office des forêts du canton de Berne), au 20^{ème} siècle (BernClim¹, MétéoSuisse/SPN²) et au 21^{ème} siècle (BernClim, MétéoSuisse/SPN, PhaenoNet³, OpenNature⁴). Jour 61 = 1^{er} mars.

Épine dorsale des réseaux d'observation

Le **Réseau d'Observations Phénologiques Suisse (SPN, Swiss Phenology Network)**², fondé par Bernard Primault en 1951, est géré par l'Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse. Il comprend de nos jours 160 stations réparties dans l'ensemble du pays et réparties entre 200 et 1933 mètres d'altitude. 26 espèces différentes sont observées pour déterminer le développement de la végétation. Les observatrices et observateurs bénévoles enregistrent jusqu'à 69 phases phénologiques par an. Une grande partie des données recueillies sont transmises électroniquement et sont immédiatement disponibles.

chaque lieu et aussi à une certaine subjectivité dans l'emploi de la méthodologie par l'observateur/trice. Plus le nombre d'observations est grand, meilleure sera l'interprétation des différences observées

Au 19^{ème} siècle, des forestiers bernois ont documenté le développement de la forêt sur tout le territoire cantonal, de l'Oberland au Jura bernois (en incluant des zones particulièrement exposées, fig. 2)⁵. On observe une grande variabilité dans les résultats d'un endroit à l'autre. L'emplacement joue donc un rôle important. En 1870, la floraison du noisetier s'étendait en moyenne de mi-février à fin mars, et dans certaines stations même après la mi-avril. Pour 1970, nous disposons de beaucoup plus de données. La plus grande densité de stations de **BernClim**¹ et de **MétéoSuisse (SPN, Swiss Phenology Network)**^{2,6-8} permet d'obtenir des relevés différenciés, en fonction de l'altitude notamment. Les couleurs rougeâtres dominantes indiquent une date moyenne de floraison à la mi-mars (fig. 2). Au nord du Jura, autour du Lac Léman et au Tessin, le noisetier est en fleurs plus tôt. Sur la carte de 2017, le nombre de stations **BernClim** diminue, mais cette perte est compensée par de nouvelles données provenant des plateformes de sciences citoyennes, **PhaenoNet**³ et **OpenNature**⁴ et une augmentation des stations **SPN**⁹. La date moyenne de floraison, en jaune-vert, est avancée d'environ un mois à fin février. Le SPN fournit des données à haute résolution spatiale pour 26 espèces végétales sur environ 160 stations.

MétéoSuisse procède à une analyse statistique de ces données et publie chaque année un indice moyen de développement phénologique en Suisse. Cet indice du printemps¹⁰ est calculé à partir des données collectées (date de floraison et/ou frondaison) sur 9 espèces végétales dans quelques 80 stations du réseau disposant de séries suffisamment longues (fig. 3). On observe de fortes fluctuations annuelles avec une tendance générale vers une floraison et une frondaison plus précoces.

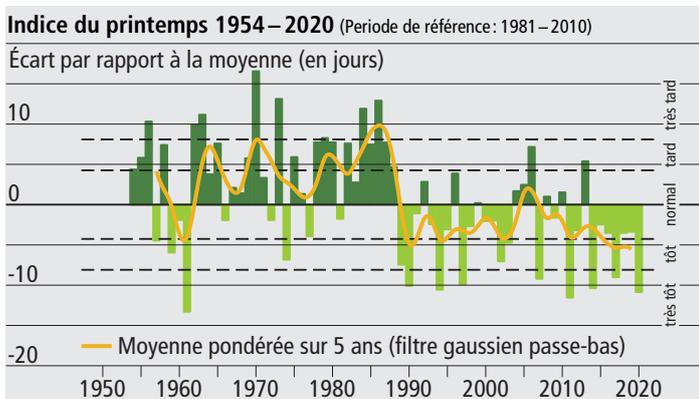


Fig. 3: L'indice du printemps¹⁰ indique le moment auquel la végétation se développe par rapport à la moyenne à long terme 1981-2010. Les couleurs vert foncé signalent un développement plus tardif que la moyenne et les couleurs vert clair un développement plus précoce.

Des informations spatiales à haute résolution sur le climat

Le programme d'observation du climat **BernClim**¹ a fêté ses 50 ans en 2020. Ce réseau d'observation du méso-climat a été fondé en 1970 par Bruno Messerli à l'Institut de Géographie de l'Université de Berne. Son objectif: documenter les saisons dans le canton de Berne en collectant des données à haute résolution spatiale sur le brouillard, la neige et l'apparition de certains stades de croissance des plantes. Ces données, à l'origine collectées à des fins d'aménagement du territoire, sont aujourd'hui très utiles dans l'analyse du changement climatique. En été, les bénévoles observent les différents stades de développement végétal et, en hiver, l'apparition et la durée de la neige et du brouillard. Les indicateurs végétaux sont les fleurs du noisetier, du pissenlit et du pommier, la récolte de céréales et le jaunissement des feuilles du hêtre. Ce réseau a compté jusqu'à 200 stations au début du projet.

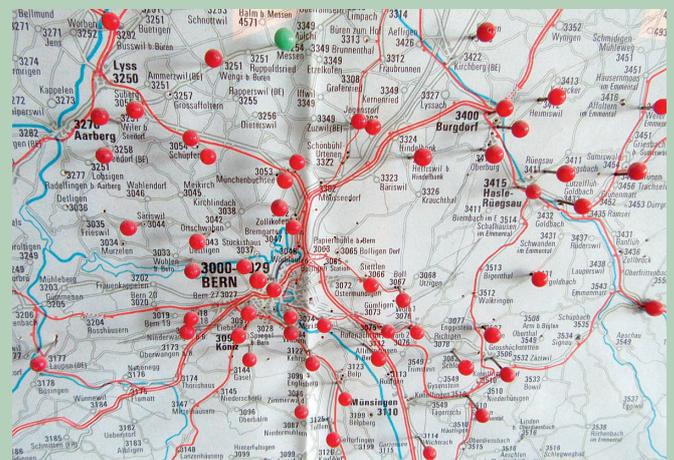


Fig. 4: Réseau d'observation **BernClim** dans la région de Berne¹.

UNIVERSITÄT BERN GEOGRAPHISCHES INSTITUT Klimaforschung		UNIVERSITÉ DE BERNE INSTITUT GÉOGRAPHIQUE Recherche climatologique		Beobachtungsstation Nr. 495/1 Poste d'observation no 495/1	
MELDEBLATT FÜR PHÄNOLOGISCHES EREIGNIS FORMULAIRE POUR PHÉNOMÈNE PHÉNOLOGIQUE				Apfelbaum Vollblüte Pommier pleine floraison 2004	
Standort Lieu	Koordinaten Coordonnées	Höhe Altitude	Exposition	Hangneigung Inclinaison	Sorte u. Berechnung Sorte et remarks Date
¹ Dorf / Korndorf	629 1675 1214 1275	710	Flach	—	Jauergg. / Berner, Dablog 19.5.
² Schulbühl	629 1575 1214 1175	720	NE	33%	Jauergg. / Berner, Dablog 19.5.
³ Löh	629 1290 1214 1350	750	NE	20%	Jauergg. / Berner, Dablog 19.5.
⁴ Bergg.	629 1700 1214 1225	760	S	40%	von Kien / Berner, Dablog 17.5.
⁵ Bündli	629 1700 1214 1350	720	S	40%	Jauergg. / Berner, Dablog 17.5.
⁶ Ober	629 1730 1214 1515	750	WSW	20%	Dablog / Berner, Dablog 17.5.
⁷ Sager, Garten	629 1825 1214 1200	740	W	20%	Jauergg. / Berner, Dablog 17.5.
⁸ Prauhawes	629 1830 1214 1160	740	W	25%	Jauergg. / Berner, Dablog 17.5.

ORIGINAL bitte bis am 1. Dezember an das Institut zurücksenden
à retourner à l'Institut jusqu'au 1er décembre

Ort und Datum
Lieu et date **Wuppenen, 19.5.04**

Unterschrift / Signature **A. Bommach**

Fig. 5: Exemple de fiche pour l'observation phénologique d'une espèce végétale dans le réseau **BernClim**¹.

Jusqu'en 1988, l'arrivée du printemps est restée plus ou moins inchangée. Depuis 1989, le printemps arrive clairement plus tôt.

Une perspective sur plusieurs décennies

Nous sommes en possession de deux longues séries d'observations en milieu rural et urbain actualisées chaque année. Ces séries remontent jusqu'au 19^{ème} siècle sans discontinuité⁶. À proximité de Liestal, la floraison d'un cerisier sauvage en lisière de forêt a été suivie depuis 1894

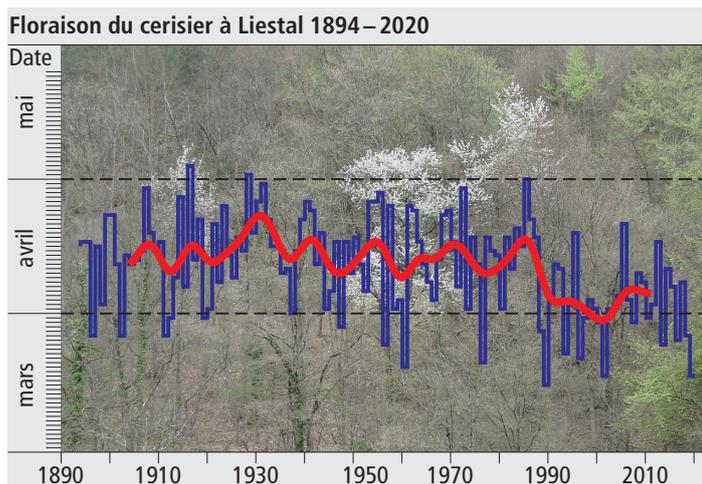


Fig. 6 : Floraison du cerisier près de Liestal 1894–2020 (à gauche) et apparition du premier bourgeon du marronnier d'Inde à Genève 1808–2020 (à droite)⁶.

(Fig. 6, cerisier Liestal). Jusqu'à la fin des années 80, on peut voir que les phases de floraison alternent autour du 14 avril, sans changements significatifs sur le long terme. Depuis 1989, cependant, le cerisier a souvent fleuri beaucoup plus tôt, en moyenne le 2 avril, soit environ deux semaines plus tôt.

À Genève, la date de débourrement du premier bourgeon d'un marronnier d'Inde a été inscrite dans un registre à partir de 1808 (fig. 6, marronnier, à droite). Au cours de ces 200 ans, il a fallu à quatre reprises trouver un nouvel arbre sur la **Promenade de la Treille**, à la suite de la mort de l'arbre observé, la dernière fois en 2015. Le climat, mais aussi les changements survenus en ville ont contribué à une évolution plus marquée qu'à Liestal vers des dates de débourrement précoces. En raison de constructions sur d'anciens espaces verts, la ville, en pleine croissance, s'est réchauffée plus rapidement que la périphérie, créant ce qu'on appelle un îlot de chaleur. Depuis quelques années, la tendance s'est cependant inversée pour des raisons encore inconnues. L'arbre lui-même, son environnement ou sa réaction aux températures pourraient tous être à l'origine de ce changement.

Des mécanismes de défense à la limite

Les données recueillies sur le long terme montrent un réchauffement continu accompagné d'un développement plus précoce de la végétation en Suisse^{7,12}. De nombreuses plantes réagissent à la hausse des températures en fleurissant ou en déployant leurs feuilles plus tôt. La plupart des végétaux sont dotés de mécanismes de protection les empêchant de débourrer ou de fleurir lors de redoux hivernaux. Pour qu'une plante réagisse à des températures plus élevées et active sa croissance, il faut au préalable un certain nombre de jours de froid (chilling, vernalisation).

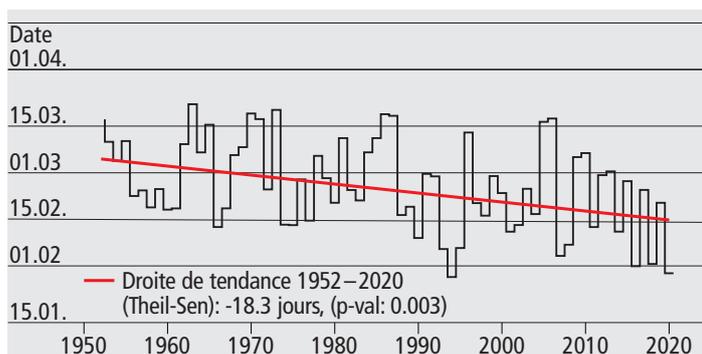
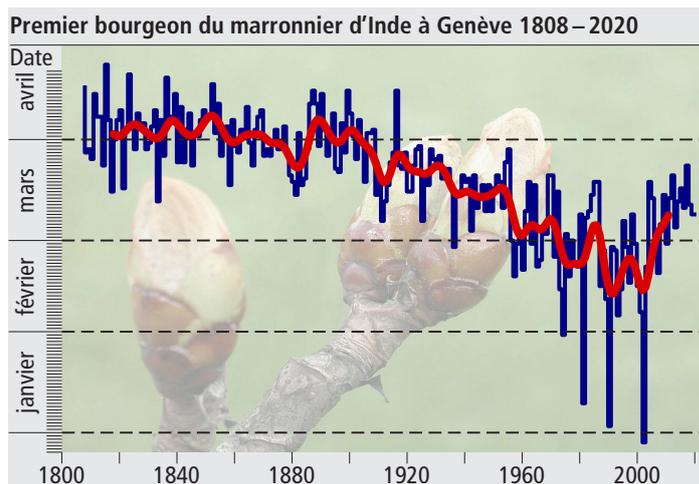


Fig. 7 : Évolution de la floraison du noisetier dans les stations de MétéoSuisse (SPN) au-dessous de 800 mètres d'altitude.



D'autres plantes ne commencent à se développer que lorsque les jours sont suffisamment longs. Ainsi, chez le hêtre, le moment de frondaison n'a pratiquement pas changé depuis 1951, il n'a actuellement que cinq jours d'avance. Le noisetier ne possède, en revanche, aucun mécanisme de protection et réagit principalement à la hausse des températures (fig. 7). Par rapport à 1952 et dans les stations de **MétéoSuisse** au-dessous de 800 mètres d'altitude, sa floraison a pris 18 jours d'avance, soit un peu plus que la floraison des pissenlits (14 jours) ou des cerisiers (11 jours).

Un bouleversement des lois de la nature

En 1920 déjà, l'entomologiste américain Andrew D. Hopkins¹³ avait remarqué que les phases phénologiques changent en fonction de la longitude, de la latitude et de l'altitude, selon certaines lois et gradients bien précis. Les feuillus, par exemple, bourgeonnent plus tard en altitude, en raison de températures moyennes plus basses. Les observations faites dans les Alpes suisses montrent, cependant, que la « loi de Hopkins » a changé au fil du temps et, avec elle, les gradients observés. Dans les années 1960, pour chaque 1000 mètres d'altitude supplémentaires, le débourrement des bourgeons étaient retardée de 34 jours en moyenne (observations effectuées sur 128 stations européennes). En 2016, ce décalage ne comportait plus que 22 jours¹⁴. La plus grande précocité en haute altitude est sans doute due à un réchauffement plus important à la fin du printemps et à des températures hivernales plus élevées. Les jours d'hiver vraiment froids (chilling days) ont également diminué en plaine durant la même période; les arbres en plaine ont donc connu moins de jours de froid pour satisfaire pleinement les besoins en froid pour lever la dormance.

La sensibilité des essences forestières aux changements de température s'est également modifiée. Un arbre réagit à une hausse des températures avec un débourrement plus précoce, mais les données récoltées sur 7 espèces d'arbres montrent que cette sensibilité à la température a diminué avec le temps. Sur la période 1980–2000, les arbres débourraient en moyenne 4 jours plus tôt pour chaque degré supplémentaire, alors que cette moyenne passe à 2,5 jours sur la période 1999–2013 (Fig.8)¹⁵. Les deux études réalisées sur la base des données d'observation phénologique illustrent à quel point il est difficile de faire des projections si les interrelations fondamentales changent au fil du temps.

Les nouvelles technologies en matière de capteurs satellitaires et d'analyse d'image ouvrent de nouvelles possibilités pour l'observation de plantes. Elles complètent les observations déjà réalisées jusqu'ici. Ces dernières continueront de servir de référence pour analyser les modifications à long terme.

Un printemps 2020 extrême

En 2020, après l'un des hivers les moins enneigés sur le Plateau, la végétation s'est développée extraordinairement tôt. Comme le montrent les observations de MétéoSuisse et de **BernClim**, le printemps ne s'était réveillé plus tôt qu'en 1961 et 2011. Le noisetier a fleuri en janvier et février avec un mois d'avance par rapport à la moyenne de 1981–2010 et le tussilage et l'anémone des bois en mars, avec trois semaines d'avance. Malgré une vague de froid en mars, les arbres fruitiers ont commencé à fleurir dès le début du mois d'avril. L'année 2020 arrive donc en tête par rapport à d'autres années similaires, avec une floraison des arbres fruitiers en avance de deux semaines. À partir du 10 avril, les forêts se sont rapidement parées de vert. Les feuilles du hêtre se sont développées onze jours plus tôt que la moyenne. Les fruits d'été comme les cerises et les fraises ont pu être récoltés à la fin mai déjà (normalement seulement partir de juin).¹⁶

Notre climat est en train de changer, ce qui nous donne de précieuses indications sur les facteurs et interactions ayant la plus grande influence sur le calendrier des plantes. Une chose est certaine : la production agricole et les fondamentaux de l'écologie continueront à être conditionnés par l'évolution des plantes. Les données phénologiques dépendent fortement du mode de vie des hommes.

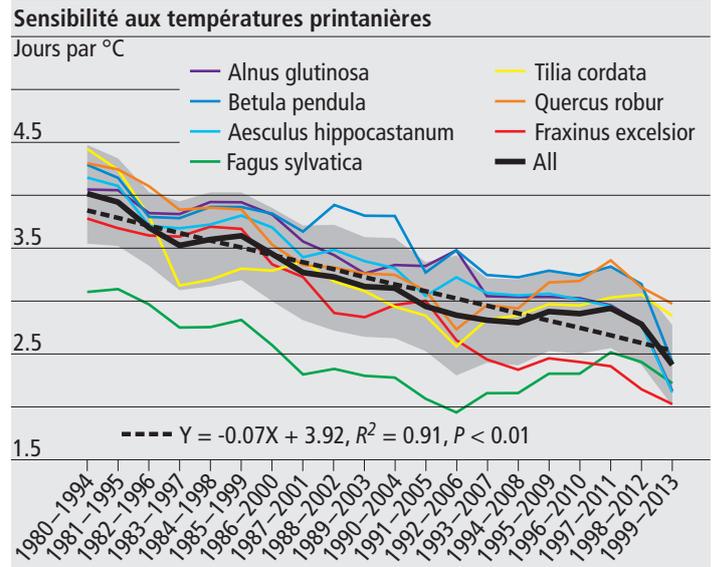


Fig. 8: La sensibilité à la température montre la réaction des plantes face aux changements de température. L'éclosion des feuilles de 7 espèces d'arbres passe de presque 4 jours pour chaque degré de réchauffement supplémentaire entre 1980–1994 à 2.5 jours entre 1999–2013.¹⁵



Fig. 8.1: Le printemps avec les cerisiers en fleurs et les pissenlits.

Phénologie des arbres forestiers – Comment les changements climatiques se manifestent en forêt

Dans la forêt, les plantes se répartissent, poussent et fleurissent sur différentes strates. Cette coexistence dans un espace restreint et sur plusieurs niveaux est bien rôdée. Le réchauffement climatique, cependant, remet cet équilibre en question.

Frederik Baumgarten, Yann Vitasse, This Rutishauser

Peu de manifestations de la nature illustrent l'impact du réchauffement climatique sur la forêt aussi clairement que le décalage des phases phénologiques. Ce phénomène est d'autant plus visible au printemps lorsque l'on observe le débourrement et la floraison qui ont tendance à être de plus en plus précoces. Sous nos latitudes, le développement des arbres dépend en grande partie de la température. Les observations phénologiques sont donc d'excellents indicateurs du changement climatique.

Pour survivre et se reproduire, les espèces doivent choisir une séquence favorable pour les différentes phases de leur développement. Grâce au processus d'évolution, les forêts se sont adaptées à leur milieu naturel et aux conditions climatiques qui y règnent. Les bourgeons sont programmés pour s'ouvrir au moment où les conditions sont les plus favorables permettant ainsi à l'arbre d'utiliser au mieux la lumière, les nutriments et l'eau, tout en étant protégée du gel (voir chapitre Gel). Les différentes espèces synchronisent également leur processus de développement afin de distribuer les ressources de façon optimale (p. ex. échelonnées dans le temps). Une bonne coordination entre espèces est non seulement essentielle pour les arbres, mais aussi pour tous les organismes formant la chaîne alimentaire de l'écosystème forestier, des champignons aux insectes en passant par les oiseaux et les mammifères (voir chapitre Animaux).

La réaction des arbres au changement climatique varie selon l'individu. Au sein d'une même espèce, la date d'émergence des feuilles se situe donc souvent à l'intérieur d'une large fourchette. Ces différences sont dues aux variations génétiques qui sont d'ailleurs fort utiles, car elles permettent d'augmenter la capacité d'adaptation d'une espèce aux facteurs de stress comme la sécheresse ou le gel. Les plantes ont de tout temps su diversifier leurs stratégies pour occuper une variété de niches dans leur habitat. La sylviculture est donc actuellement confrontée à un défi majeur, celui de s'adapter à un climat plus chaud et plus sec pour pouvoir préserver les services fournis par les écosystèmes forestiers sur le long terme.

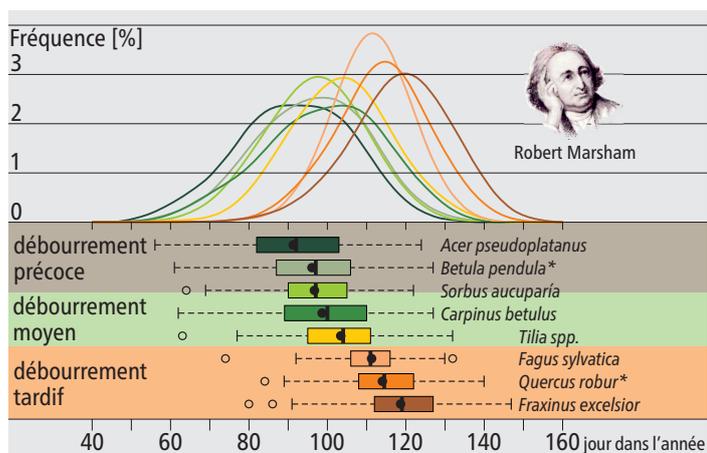


Fig. 9 : Date d'émergence des feuilles selon les relevés phénologiques de la famille Marsham pour huit espèces d'arbres de climat tempéré de 1736 à 1958 dans le Norfolk (UK)^{14,17}. Les diagrammes en boîte indiquent la moyenne (cercle noir), la médiane, les quartiles et les valeurs extrêmes des dates d'émergence des feuilles au cours de la période 1736-1758.



Fig. 10 : Tapis végétal montrant les anémones des bois en fleurs avant l'émergence des feuilles de la strate arborée. La courte période de végétation de l'anémone des bois lui permet ensuite de survivre en été sur un sol forestier devenu ombragé.

Croissance sur plusieurs strates

Les forêts sont des écosystèmes spéciaux d'un point de vue phénologique, car le milieu forestier nous permet d'observer les plantes sur plusieurs strates depuis le sol. Les plantes entrent en concurrence pour la lumière, l'eau et les nutriments, aussi bien au niveau de la strate du sol que de la strate herbacée et arborée. L'écosystème forestier se modifie en conséquence au fil des saisons. La strate herbacée, à ras du sol, est la première à se développer mettant à profit le court laps de temps disponible avant que l'apparition du feuillage ne plonge le sous-bois dans l'ombre et ne nuise à sa capacité de photosynthèse (fig. 10). L'anémone des bois et l'ail des ours sont deux exemples d'espèces très répandues de cette strate herbacée. Ces plantes géophytes puisent leur force dans leurs organes de stockage souterrains et sont capables de réagir très rapidement à un changement favorable des conditions météorologiques.

Des recherches expérimentales ont permis d'étudier la phénologie de différentes classes d'âge de la même espèce. Les chercheurs ont pu constater que les arbres plus jeunes poursuivaient une stratégie plus risquée : ils démarrent leur croissance beaucoup plus tôt pour obtenir

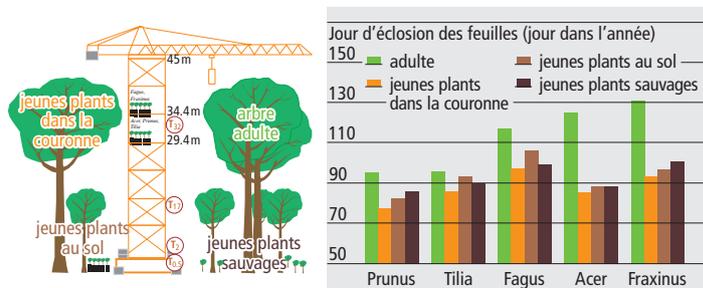


Fig. 11 : Gauche : Installation pour observer l'émergence des feuilles des jeunes arbres et les arbres adultes de la même espèce. Des jeunes arbres ont ainsi été placés à l'intérieur d'une grue pour les placer à hauteur de canopée afin de tester le développement des jeunes arbres et des arbres adultes dans des conditions microclimatique similaires. Les cercles indiquent la hauteur à laquelle les températures sont enregistrées. Droite : les jeunes arbres déploient leurs feuilles entre une semaine (cerisier, tilleul) et un mois (érable, frêne) plus tôt que les arbres adultes.¹⁸

suffisamment de lumière (de deux à quatre semaines plus tôt selon les espèces, fig. 11). Plus l'arbre vieillit, plus il aura conquis sa place au soleil. Sa stratégie consistera alors plutôt à réduire son risque d'exposition au gel tardif et ainsi démarrer sa croissance plus tard. L'expérience montre que les bourgeons des jeunes arbres placés au niveau de la canopée s'ouvrent légèrement plus tard en raison d'un microclimat plus frais (fig. 11). Pour étudier les arbres adultes, il est cependant possible d'utiliser des rameaux coupés et les placer dans des chambres climatiques

Changement abrupt du climat: Événements extrêmes et bouleversement

Le changement de climat rapide actuel affecte l'équilibre fragile qui règne au sein des écosystèmes forestiers. En réaction aux températures plus élevées, les feuillus adultes ont tendance à débourrer plus tôt et la canopée se referme plus vite ce qui prive les plantes des strates inférieures de lumière très tôt dans l'année. Ces processus ne sont pas toujours visibles, progressent lentement et sont encore peu étudiés, si bien qu'il est encore difficile de prédire comment la coordination entre les espèces va évoluer.

L'impact d'événements climatiques extrêmes est, en revanche, beaucoup plus visible. La longue et intense sécheresse de l'été 2018 a laissé de profondes traces en Suisse¹⁹. Le feuillage s'est décoloré de façon précoce dans certains cantons comme le Jura, Bâle-Campagne et Schaffhouse, montrant la pénurie aigüe en eau. La décoloration est en fait un mécanisme d'autoprotection de l'arbre.



Fig. 12: Après la sécheresse de l'été 2018, de nombreux feuillus ont réagi avec une décoloration précoce, comme ici dans le canton de Schaffhouse en juillet 2018.¹⁹

Depuis 2018, l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage surveille environ 1000 hêtres en Suisse afin de mieux comprendre ces processus et formuler des recommandations concrètes sur la façon de combiner les espèces et gérer les forêts. D'autres projets qui visent à tester l'adéquation de différentes essences fo-



Fig. 13: Exemple de chute prématurée des feuilles du hêtre (*Fagus sylvatica*) en août 2018 (à gauche), suivie par une absence de feuillage au printemps suivant (forêt de l'Hardwald près de Bâle).

restières le long de grands gradients environnementaux sont également en cours. Pour ce faire, des plantations expérimentales d'essences d'avenir sont en train de voir le jour dans toute la Suisse²⁰.

Les dommages dus au gel augmenteront également si la hausse des températures entraîne un débourrement toujours plus précoce. La probabilité de voir un épisode de gel au printemps reste en effet élevée comme le montre l'exemple du 11 mai 2020 où une perte importante du feuillage du hêtre a été observée sur les sommets de l'Arc jurassien (Fig. 14).



Fig. 14: Ces hêtres avec les nouvelles feuilles détruites par le gel restent sans feuillage jusqu'en été après un épisode de gel survenu le 11 mai 2020 (Weissenstein, 1380 mètres).

La forêt bernoise au 19^{ème} siècle

De 1869 à 1882, l'Office des forêts du canton de Berne dirigea un réseau d'observation climatologique et phénologique. Les forestiers recueillirent des données sur 48 espèces dans environ 70 stations – mais non sans lacunes – et effectuèrent des mesures pour mieux comprendre non seulement l'impact de la météo sur la forêt mais aussi l'impact de la forêt sur le changement climatique. Les forestiers devaient également observer le temps et la phénologie de diverses espèces végétales. Les données étaient publiées mensuellement dans le **Journal forestier suisse** et annuellement par la Direction de l'Office des forêts. Aujourd'hui, elles sont accessibles sous forme numérique. La carte montre la date moyenne de floraison du noisetier sur 30 sites de l'Oberland au Jura, en passant par l'Emmental et le Plateau. L'inclinaison et la distance par rapport à la lisière de la forêt diffèrent selon les sites, ce qui explique en partie la grande variabilité dans les données.

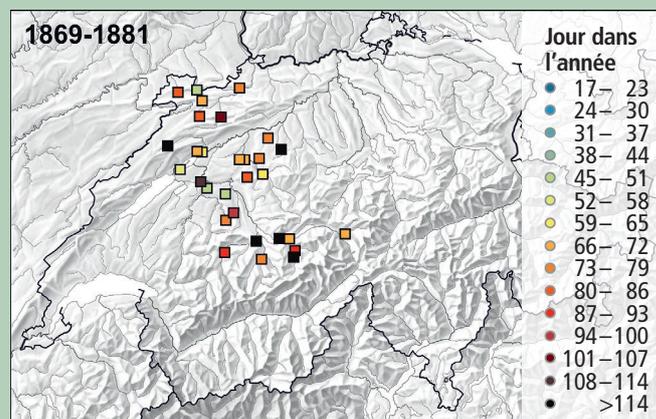


Fig. 15: Date moyenne de floraison du noisetier entre 1869 – 1881 relevée par le réseau d'observation de l'Office des forêts bernois⁵.

Calendriers phénologiques dans le monde animal

Les horloges biologiques des animaux sont réglées sur les conditions environnementales dans leur habitat. Chaque individu réagit donc de manière très différente au changement climatique. Un des grands défis de la recherche actuelle est donc de savoir comment ces différentes vitesses de réactions affecteront les interactions au sein d'un écosystème.

Sibylle Stöckli, This Rutishauser

Le développement animal au fil des saisons est influencé par les conditions météorologiques et le climat²¹. Certains signaux de la nature comme le raccourcissement des jours incitent les animaux à changer de comportement et à s'adapter aux conditions hivernales moins favorables (fig. 16). Ainsi, en automne, les animaux savent instinctivement quand s'envoler vers le sud, mettre leur développement en pause, entrer en hibernation ou faire des réserves de nourriture. Cela fait longtemps que des observatrices et observateurs attentifs se sont aperçus du comportement saisonnier des animaux et ont documenté certains phénomènes comme le début du vol des abeilles ou la première observation de l'année d'une hirondelle rustique. En agriculture, l'observation saisonnière des stades de développement des insectes nuisibles est un élément important de la lutte phytosanitaire durable. Ces observations sont par ailleurs incluses dans les bulletins de conseils phytosanitaires²². Nous disposons également de modèles capables de nous avertir bien à l'avance de la potentielle survenue d'un stade critique²³.

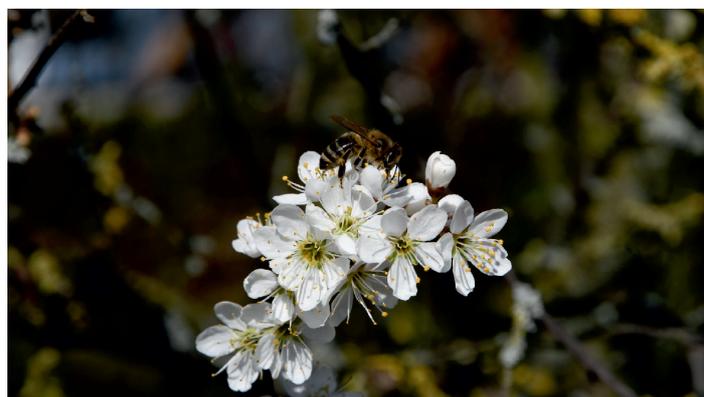


Fig. 16: La floraison du prunellier et le vol des abeilles sont bien coordonnés.

L'empreinte du changement climatique

Tout comme les plantes, les animaux adaptent leur phénologie aux conditions climatiques ambiantes²⁴⁻²⁸, un phénomène qui devient d'autant plus visible sous l'effet du réchauffement climatique actuel.

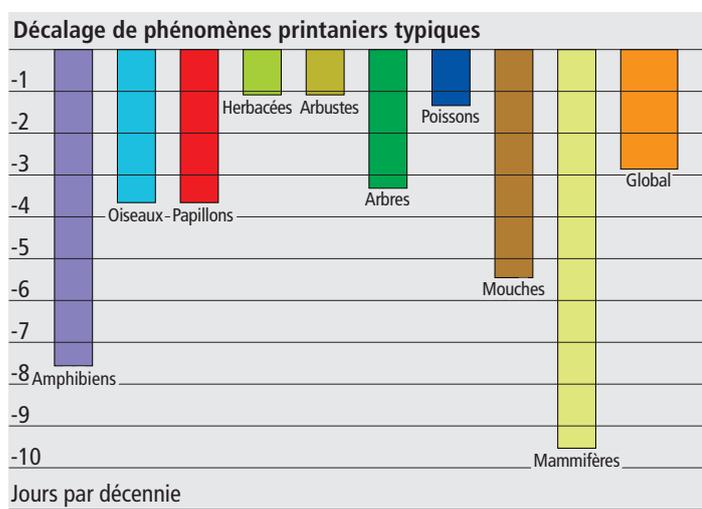


Fig. 17: Certains phénomènes typiques du printemps se décalent (ici en jours par décennie²⁴) chez les animaux et végétaux de l'hémisphère nord.

Les migrations des oiseaux sont un des exemples les plus connus. La migration annuelle est un impératif qui revêt une importance capitale pour les oiseaux, mais aussi pour les humains du fait de son caractère symbolique dans le calendrier annuel. On a ainsi pu observer que les oiseaux ont tendance à revenir plus tôt quand la période de végétation s'allonge. Le départ, en revanche, ne change guère, car les oiseaux s'orientent la plupart du temps sur la longueur des jours plutôt que sur les conditions climatiques. Les périodes de ponte au printemps ont également tendance à se décaler. De manière générale, on observe une plus grande précocité dans le développement phénologique des différentes espèces d'animaux (tableau 3.1⁸), même si les réactions phénologiques varient en fonction des espèces et des lieux²⁹ et que certaines espèces ne réagissent pas du tout aux changements. Les amphibiens montrent, par exemple, une plus grande précocité que d'autres espèces. En nombre de jours, leurs activités printanières se sont décalées deux fois plus que celles des papillons ou des oiseaux (fig. 17), bien qu'il existe, ici aussi, une grande diversité entre espèces d'amphibiens. De nombreux papillons au Royaume-Uni, en Espagne et en Californie commencent à voler plus tôt dans l'année. Les espèces exotiques semblent, en outre, avoir une meilleure capacité d'adaptation aux changements climatiques. De manière générale, on a pu observer que les différences entre espèces vivantes dans un même environnement sont souvent plus importantes que les différences entre individus de la même espèce dans différentes régions. Le fait que toutes les espèces ne réagissent pas de la même manière aux changements climatiques modifie les interactions au sein d'un écosystème³⁰. En agriculture, la pollinisation est une des fonctions écologiques les plus importantes. Le nombre de pollinisateurs, comme les abeilles, ainsi que la présence de plantes capables de nourrir ces dernières ne cessent, cependant, de diminuer. Ce déclin peut être attribué en grande partie au changement climatique ainsi qu'au changement d'affectation des sols^{31,32}.

Grands espaces, petits mondes de vie

Le succès de reproduction de la mésange charbonnière au fil des siècles est un exemple parmi tant d'autres illustrant l'impact des conditions météorologiques sur le développement phénologique des animaux (fig. 18)³³. Des indicateurs climatiques ont permis d'élaborer des modèles de circulation atmosphérique à large échelle qui décrivent la force et la direction des vents dominants sur l'Atlantique et l'Europe du sud-est, à l'aide de plusieurs indices. La circulation atmosphérique, elle-même, est étroitement corrélée avec le climat local au printemps mesuré en températures et précipitations. Ces facteurs ont à leur tour une influence sur le moment où les mésanges charbonnières construisent leur nid et pondent leurs œufs. Les conditions météorologiques ont également une influence sur le nombre d'œufs pondus et le nombre de poussins. Comme dernier maillon de la chaîne – et qui a aussi une importance capitale dans la chaîne alimentaire – on trouve le nombre de jeunes qui quittent le nid (fig. 18).

Conséquences du changement climatique sur les insectes nuisibles

Sous l'effet du réchauffement climatique, les insectes nuisibles se développent plus tôt et plus vite. Les espèces exotiques trouvent également de nouveaux habitats, s'y installent et se multiplient^{31,34}. Le change-

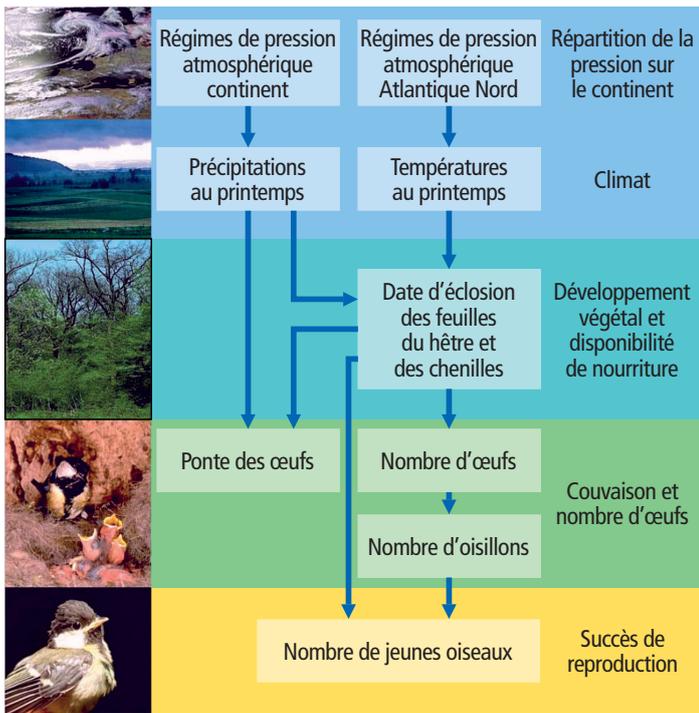


Fig. 18: Les facteurs climatiques globaux influencent le succès de reproduction de la mésange charbonnière par une chaîne complexe de cause à effets³³.

ment climatique favorise même la multiplication des générations annuelles d'insectes, comme c'est le cas pour le carpocapse (fig. 19)²⁷. Il faudra donc non seulement compter avec la présence prolongée de ce papillon dans nos vergers, mais aussi avec un plus grand nombre d'individus ce qui augmentera indéniablement le risque de dégâts. Le

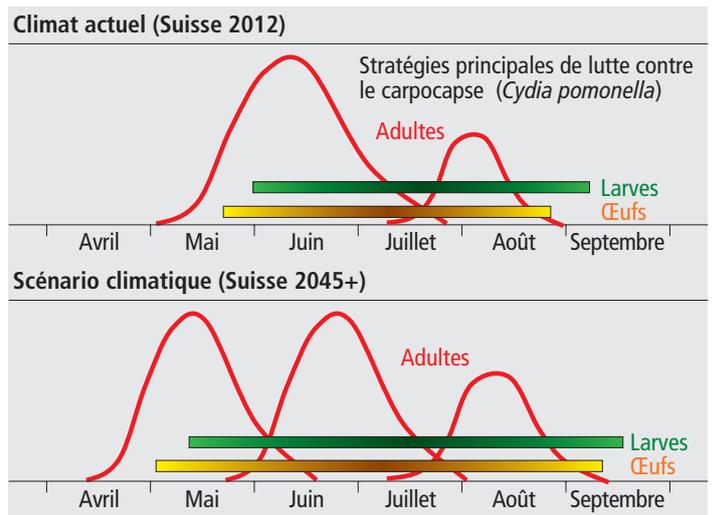


Fig. 19: Population de carpocapses sous le climat actuel et futur et stratégies de lutte les plus importantes²⁷.

carpocapse et d'autres insectes nuisibles devront donc être surveillés et contrôlés sur une plus longue période de l'année. Actuellement, les œufs et les larves apparaissent dans les vergers de fin mai à début septembre. Si les prévisions climatiques s'avèrent exactes, la saison commencera environ deux semaines plus tôt à partir de 2045 et durera environ trois semaines de plus en automne. Ce laps de temps permettra à trois générations de carpocapses adultes de se développer.

Le changement climatique n'a toutefois pas que des effets négatifs. La chaleur attendue pour les mois d'été sera difficile à supporter pour un certain nombre d'insectes nuisibles comme la punaise marbrée²⁶. Quoiqu'il arrive, il est prévu de développer dès à présent des stratégies de contrôle durable couvrant tous les scénarios climatiques futurs.



Fig. 19.1: Les hirondelles s'envolent ensemble.

Un millénaire de chroniques météorologiques et saisonnières

Les extrêmes climatiques, aussi bien chaud que froid, ont été documentés à l'aide de données phénologiques depuis le haut Moyen Âge. Grâce à ce travail, nous pouvons estimer la température saisonnière avec fiabilité. Nous disposons notamment d'une série de 664 années de données sur les vendanges à Beaune (Bourgogne) qui montre que les températures extrêmes enregistrées entre 1354 et 1987 sont aujourd'hui devenues la norme.

Christian Pfister

Dans l'Europe médiévale, les phénomènes météorologiques furent pendant longtemps attribués à l'influence de pouvoirs magiques. Ce n'est que grâce à la redécouverte d'écrits longuement disparus de philosophes et scientifiques de la Grèce antique que les fondements de l'observation empirique de la nature ont été posés. Ces écrits furent d'abord traduits en arabe au 8^{ème} et 9^{ème} siècle dans le cadre d'un vaste programme de recherche mené depuis Bagdad. Ils furent ensuite, à partir du 12^{ème} siècle, traduits en latin et en grec au sein de l'Espagne musulmane³⁵. Ces écrits initièrent un processus de réorientation intellectuelle fondamentale en Europe occidentale et centrale, qui se vit également reflété dans les chroniques météorologiques. Alors que la plupart des anciens récits se limitaient à des descriptions quelque peu laconiques du type «été chaud», à partir de la fin du 12^{ème} siècle, les chroniqueurs météorologiques s'efforcèrent de fournir des descriptions plus détaillées des extrêmes climatiques, en utilisant des références quasi-objectives à certains phénomènes naturels, rendant ainsi les observations comparables dans le temps. Les observations phénologiques des principales cultures, telles que les céréales et la vigne, servirent de point de référence. On peut trouver plus de 400 passages de texte se référant à ces cultures dans les chroniques du haut et bas Moyen Âge³⁶.

Pionniers et bureaucrates

Au 18^{ème} siècle, plusieurs pionniers se lancèrent dans une observation plus systématique. En premier lieu, Hans-Rudolf Rieter, un boulanger et vigneron de Winterthur, qui de 1721 à 1738 consigna l'évolution des conditions climatiques et de ses effets sur les plantes. Rieter prit des notes sur la chronologie de 19 phases phénologiques, entre autres la pleine floraison du cerisier, les premiers épis de seigle et la coloration rouge du raisin. Le programme d'observation du pasteur bernois Johann Jakob Sprüngli entre 1760 et 1802 fut encore plus vaste, comprenant environ 4000 observations phénologiques individuelles de plantes et d'animaux, dont certaines sous forme de tableaux³⁷.

La création d'une union internationale entre les réseaux météorologiques nationaux à la fin du 19^{ème} siècle donna lieu à une certaine uniformisation. C'est ainsi que les bureaucrates de la météo décrétèrent que seules les mesures météorologiques pouvaient être incluses dans les annuaires officiels, excluant les phénomènes concomitants comme la couverture neigeuse et le développement de la végétation. Des observateurs motivés, pour la plupart des enseignants, poursuivirent cependant leurs activités d'observation phénologique dans trois stations météorologiques

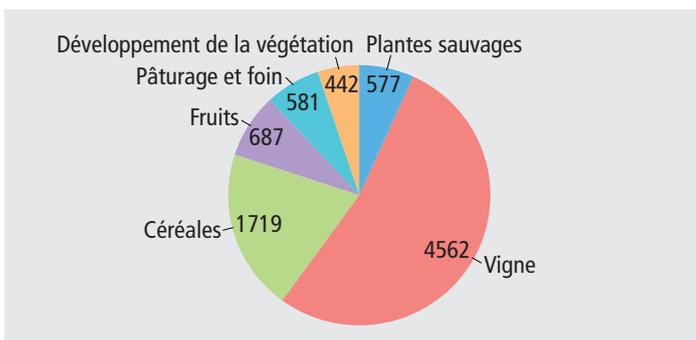


Fig. 20: Euro-Climhist contient surtout des données sur la floraison et la récolte de la vigne et des céréales et la floraison des arbres fruitiers.³⁹

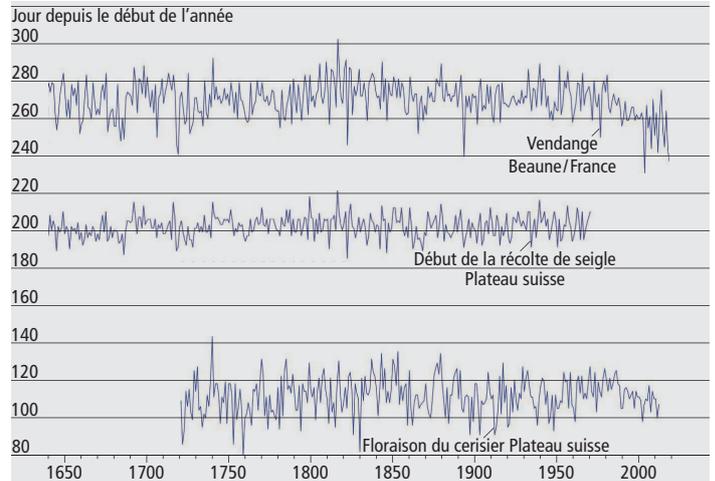


Fig. 21: La comparaison entre plusieurs séries phénologiques longues nous permet de tirer de nouveaux enseignements sur le changement climatique.

du canton de Schaffhouse, à partir de 1876. Leurs observations furent publiées dans la gazette cantonale jusqu'en 1950³⁸, date à partir de laquelle le programme d'observation de MétéoSuisse fut mis en place.

La base de données Euro-Climhist contient actuellement 8568 données phénologiques. La plupart d'entre elles proviennent de Suisse et remontent jusqu'aux années 1500³⁹. Les données les plus fréquemment enregistrées portent sur le développement de la vigne (floraison, coloration rouge, récolte), suivies de données sur le développement des céréales (d'hiver) – épis, floraison, début de la récolte. La base de données contient aussi des informations sur la floraison des cerisiers pour les fruits, sur la fenaison et le pacage et sur les plantes sauvages, en particulier la floraison pendant certains hivers particulièrement doux et l'éclosion des feuilles du hêtre (fig. 20). De nombreuses données tangibles attendent encore d'être incluses et analysées.

Seules quelques données phénologiques peuvent être présentées sous forme de séries chronologiques longues (fig. 21). La plupart d'entre elles proviennent de la comptabilité de monastères, d'hôpitaux et de municipalités et portent sur le début de la récolte de céréales et sur les vendanges.

664 années de données sur les vendanges

Dès le Moyen Âge, la date de début des vendanges a été scrupuleusement consignée dans la comptabilité des grands domaines viticoles. Les administrateurs des Hospices de Beaune, capitale du vin de la Bourgogne, notaient, par exemple, chaque soir combien ils avaient payé leurs journaliers et pour quel travail. De ces données, nous pouvons déduire la date de début des vendanges (fig. 23). Plus tard, la méthode de comptabilité changea, mais nous avons connaissance des dates auxquelles les chanoines commençaient avec les préparatifs plutôt complexes des vendanges. Les autorités municipales fixèrent par la suite une date officielle de vendange, en consultation avec les viticulteurs. Un gardien armé d'un fusil veillait au respect de l'ainsi dénommé ban des vendanges et personne, ni même les viticulteurs devant payer leurs tributs à l'Église ou aux propriétaires des grands domaines, n'était auto-

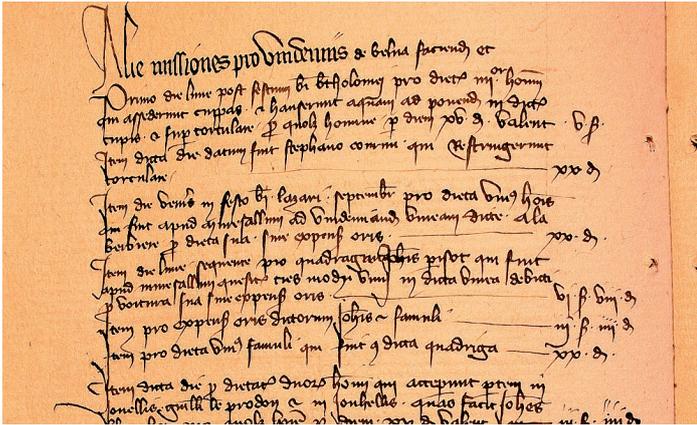


Fig. 22: La comptabilité des Hospices de Beaune a consigné les salaires payés aux vendangeurs et nous livre ainsi des données sur le début des vendanges, au jour près. Ici un extrait datant de 1506.

risé à commencer les vendanges avant la levée du ban⁴⁰. En rassemblant toutes ces données, il est possible d'obtenir des séries chronologiques portant sur plusieurs siècles. Ces séries nous livrent de précieuses informations sur les fluctuations dans les températures estivales.

Avoir une bonne connaissance des textes anciens n'est, cependant, pas suffisant. Pour obtenir des données fiables et solides, il faut disposer d'un grand nombre de connaissances approfondies. C'est aussi le constat fait par un collectif d'auteurs qui en 2004 avait annoncé dans la prestigieuse revue *Nature* que l'été 2003 avait été, et de loin, l'été le plus chaud depuis le Moyen Âge. Pour faire cette déclaration, les chercheurs s'étaient appuyés sur une longue série de données de vendanges à Dijon, publiées au 19^{ème} siècle, qu'ils avaient complétées par des données provenant d'autres régions de Bourgogne⁴¹. En examinant méticuleusement les archives utilisées, les deux historiens Thomas Labbé et Fabien Gaveau se sont rendu compte que la « série de Dijon » utilisée était truffée de 132 erreurs d'impression et de copie. À sept reprises (années), l'écart entre les dates dans la série et les dates réelles dépasse les 20 jours, et même 30 jours durant l'été de 1540, le plus chaud du millénaire. Les chercheurs de l'article publié dans *Nature* avaient complété la série de Dijon avec des données provenant du sud de la Bourgogne, mais sans apporter les corrections nécessaires⁴². Labbé a compilé une nouvelle série pour Beaune allant de 1354 à 2018. En comparant cette série avec la série disponible pour Paris, Labbé a pu constater qu'à partir des années 1720 les administrateurs des Hospices de Beaune laissèrent mûrir leur raisin sept jours de plus afin d'améliorer la qualité de leur vin et ainsi contrer la concurrence des vins de masse bon marché.

La longue série homogénéisée de Beaune est clairement corrélée avec les températures entre avril et août (Fig. 23)⁴⁰. Elle est divisée en deux parties. De 1354 à 1987, le raisin était récolté le 28 septembre. Cette date s'est avancée de 13 jours dans les 31 dernières années. L'envolée

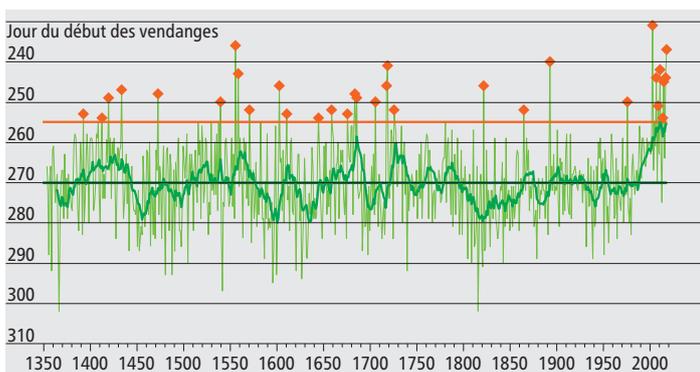


Fig. 23: Depuis 1988, la récolte de raisin a pris 13 jours d'avance en Bourgogne par rapport aux six siècles précédents⁴⁰

des températures dès la fin des années 80 et l'accélération du changement climatique anthropique sont clairement perceptibles : sur les 33 récoltes les plus précoces des 664 dernières années, huit ont eu lieu après 1988 et cinq après 2011. Des périodes de végétation autrefois considérées comme exceptionnellement chaudes sont aujourd'hui devenues la norme. Les méga-sécheresses de 1473 et 1540 donnent une idée de ce à quoi pourraient ressembler les extrêmes du futur.^{43,44}



Fig. 24: Grappes de raisin en Franconie

Quelles seront les régions viticoles du futur ?

Les simulations climatiques permettent de créer des scénarios. Ci-dessous, une modélisation de la façon dont les régions viticoles pourraient se déplacer d'ici 2050. Les dates de floraison et de maturation des fruits sont utilisées pour le calcul des variations spatiales. Certaines des régions viticoles actuelles, autour de Bordeaux et du Rhône par exemple, ne seront plus propices à la viticulture. Les domaines viticoles d'altitude seront moins touchés. La viticulture se déplacera vers le nord et l'est où les conditions climatiques se montreront plus favorables.

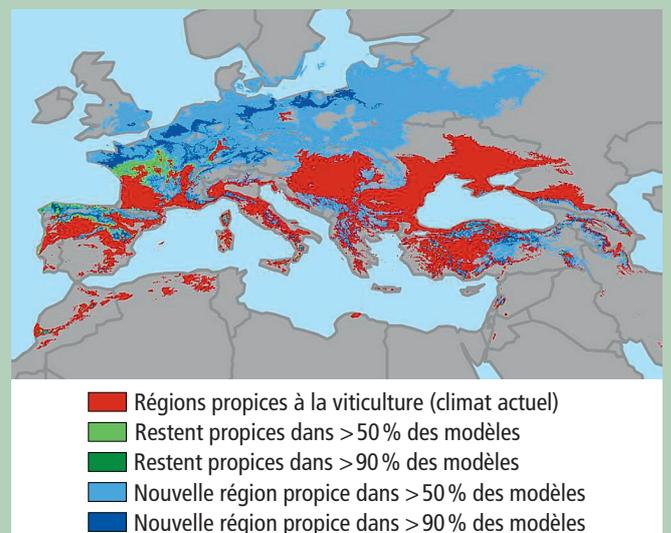


Fig. 25: Zones propices à la viticulture sous le climat actuel et futur de 2050 (rouge = moins propice à l'avenir, vert = propice sous le climat actuel et futur, bleu = nouvelles zones viticoles potentielles).¹² (Carte: Nightstallion/Wikimedia Commons, S. Egts)

Des hivers plus courts et des étés plus longs

Les saisons météorologiques sont en train de changer en Suisse. La période de croissance s'est allongée et les hivers se sont raccourcis au cours des 50 dernières années. Cette tendance va se poursuivre et même s'accélérer d'ici jusque'en 2070.

Stefan Brönnimann

Sous l'effet du changement climatique, le début du printemps s'est clairement décalé: les plantes poussent et fleurissent plus tôt. Les changements de saisonnalité se manifestent également dans les phénomènes météorologiques, comme le moment des premières chutes de neige ou celui de la dernière gelée. Nous disposons pour la Suisse de données de températures et de précipitations reconstituées remontant jusqu'en 1864, ainsi que de scénarios climatiques allant jusqu'à la fin du 21^{ème} siècle. Ces informations permettent de calculer un certain nombre d'indicateurs et d'observer leur évolution.

La météo – facteur déterminant pour la croissance

Les données météorologiques permettent, par exemple, de déterminer des indicateurs quantifiant le développement végétal. Les degrés-jours de croissance (en anglais « growing degree days ») sont une mesure fréquemment utilisée à cette fin. Ils se calculent en additionnant, pour chaque jour depuis le début de l'année, l'excédent de température observée au-dessus d'un certain seuil (par exemple, 4°C).

Seuls les écarts positifs par rapport au seuil sont pris en compte dans les calculs. Les degrés-jours de croissance nous permettent de mesurer les changements de saisonnalité en observant, par exemple, le moment auquel le palier de 100 ou 1000 degrés-jours est franchi. Le premier palier correspond approximativement à la floraison, le second à la maturité de nombreuses plantes. Nous avons utilisé les données annuelles pour ces deux paliers et calculé une moyenne sur quatre périodes: 1869–1878, 1969–1978, 2010–2019 et 2069–2078 (ci-dessous). Autrement dit, nous examinons la situation d'il y a 150 ans, d'il y a 50 ans, d'aujourd'hui et celle dans 50 ans (cf. encadré « Données matricielles pour la Suisse » et « Scénarios climatiques pour la Suisse »).

Les résultats (fig. 26) montrent que le seuil de 100 degrés-jours (rangée du haut) était franchi, dans le passé, à la fin du mois d'avril sur le Plateau et en mai ou juin en altitude. Il n'y a guère de différence entre les résultats d'il y a 150 ans et ceux d'il y a 50 ans. Depuis lors, les dates se sont, cependant, clairement avancées. Elles se situent actuellement entre fin mars et début avril. Dans 50 ans, le seuil des 100 degrés-jours sera probablement franchi avant la fin du mois de mars sur le Plateau. Des résultats similaires peuvent être observés pour le

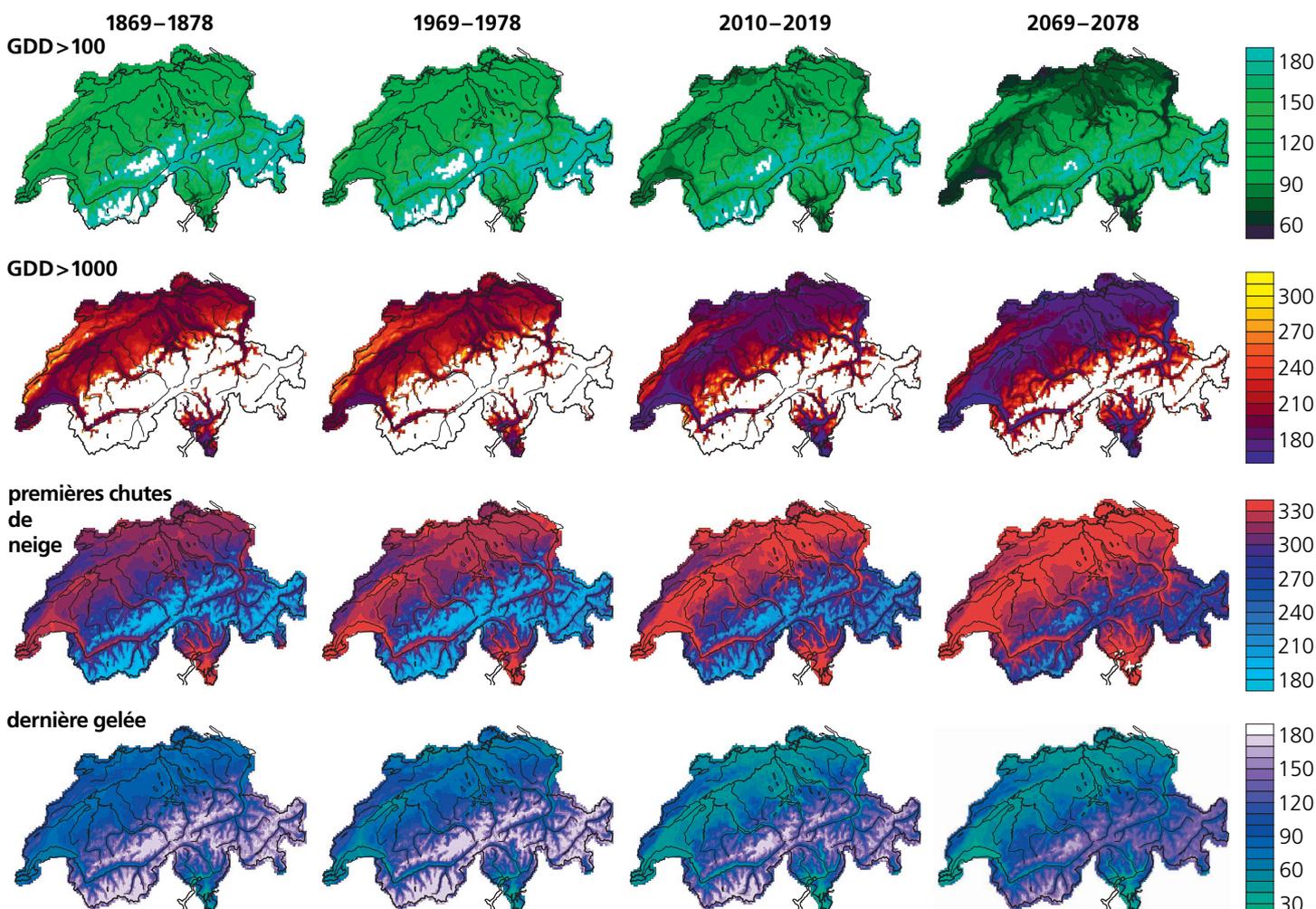


Fig. 26: Décalage des saisons météorologiques: jour de l'année où le seuil des 100 (en haut) et 1000 (2^{ème} rangée) degrés-jours de croissance (somme des degrés de température supérieure à 4°C) est franchi. Moyenne pour les trois premiers jours de neige (3^{ème} rangée) et les trois derniers jours de gel (en bas) pour les périodes 1869–1878, 1969–1978, 2010–2019 et 2069–2078. Pour 2069–2078, la moyenne de toutes les combinaisons de modèles de l'EUROCORDEX-11 pour le scénario RCP45 a été utilisée.^{46,47}

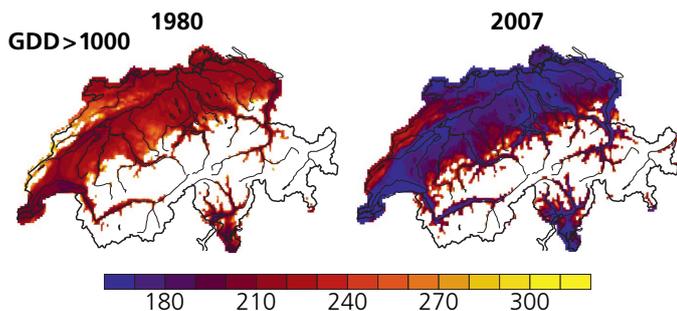


Fig. 27: Jour de l'année où le seuil de 1000 degrés-jours (somme des degrés de température supérieure à 4 °C) a été franchi pour les années 1980 et 2007.

seuil des 1000 degrés-jours (deuxième ligne), qui s'est décalé de fin à début juillet entre 1869 et 2019. Dans 50 ans, les 1000 degrés-jours seront franchis en juin sur l'ensemble du Plateau. L'altitude à laquelle ce seuil est atteint en moyenne chaque saison augmente également.

Si l'on examine les années individuellement, on peut constater qu'en réalité ces seuils sont franchis à des moments très différents. La figure 27 compare les étés de 1980 et 2007, à titre d'exemple. En 1980, le seuil de 1000 degrés-jours n'a été atteint qu'à la fin du mois de juillet sur le Plateau, comme cela aurait typiquement été le cas au 19^{ème} siècle. En 2007, le seuil a été franchi à la mi-juin, ce qui correspond au contraire aux prédictions pour la fin du siècle.

Des hivers plus courts – voire plus d'hiver du tout

Les deux indicateurs présentés dans la figure 26 – date des premières chutes de neige (3^{ème} rangée) et du dernier gel (en bas) – illustrent la façon dont l'hiver se décale. Les données matricielles ne permettent pas de savoir si les précipitations sont tombées sous forme de neige ou de pluie. Nous avons donc émis l'hypothèse suivante: il s'agit de neige si les précipitations sont supérieures à 0.1 mm et que la température moyenne quotidienne est inférieure à 2 °C.⁴⁹ Par « gel », nous entendons des températures moyennes quotidiennes inférieures à 0 °C. Étant donné que ces deux indicateurs fluctuent beaucoup, nous avons en outre calculé une moyenne pour les trois premiers jours de neige et les trois derniers jours de gel. Ces mesures supplémentaires permettent d'affiner l'analyse.

À la différence des indicateurs de croissance, les mesures de neige et de gel attestent de certains changements climatiques entre la période d'il y a 150 et celle d'il y a 50 ans. On remarque également, comme pour les autres indices, que le rythme des changements s'est accéléré ces 50 dernières années, une tendance qui va se renforcer à l'avenir.



Fig. 28: Selon le nombre de degrés-jours de croissance, le colza illumine la nature de son jaune éclatant en mai déjà ou seulement en juin

Données matricielles pour la Suisse

Nous disposons de données journalières de température (TabsD) et de précipitation (RhiresD) sur une grille de 2x2 km et remontant jusqu'en 1961⁴⁶. Ces données sont obtenues en interpolant les mesures provenant des différentes stations météorologiques. Pour pouvoir remonter plus loin dans le temps, nous avons utilisé une méthode analogique⁴⁷: chaque jour avant 1961 a été couplé avec le jour qui lui ressemblait le plus après 1961. Pour ce faire, nous avons comparé les données historiques des stations avec les mesures actuelles de température, de pression atmosphérique et de précipitations. Nous avons ensuite, sur la base des mesures historiques, procédé à des corrections supplémentaires dans les champs de la grille de ce « jour analogue ». Nous avons ainsi pu reconstruire la météo journalière pour la Suisse depuis 1864.

Scénarios climatiques pour la Suisse

Les nouveaux scénarios climatiques pour la Suisse **CH2018** ont été présentés en automne 2018.⁴⁸ Ils sont basés sur une chaîne de modèles: des simulations au niveau global ont servi de cadre général pour élaborer des modèles climatiques régionaux, notamment pour l'Europe. La dernière étape de ce processus – la réduction à l'échelle de 2x2 km pour la Suisse – a ensuite été réalisée à l'aide de méthodes statistiques. De nombreuses combinaisons de modèles globaux et régionaux ont été utilisées pour valider les résultats.⁴⁸ Dans l'exemple de la figure 26, la moyenne de toutes les combinaisons de modèles **EUR11** de l'**EUROCORDEX** a été choisie. L'EUR11 correspond à une résolution spatiale d'environ 12,5 km. Le scénario climatique sélectionné est le **RCP45**, un scénario intermédiaire. À noter que des écarts systématiques peuvent se produire, étant donné qu'il s'agit de données de simulations, comme le mentionne aussi le rapport **CH2018**. Ce rapport contient également des représentations graphiques d'autres indices, tels que les nuits tropicales, les jours d'été, les jours de glace, les jours de gel, les maxima annuels pour les précipitations journalières et le nombre de jours consécutifs de sécheresse, entre autres.⁴⁸

Les hivers existeront-ils encore d'ici la fin du siècle? Sur le Plateau, la neige ne fera souvent son apparition que vers la fin de l'année et le gel se terminera au cours du mois de février. Dès lors, parler d'hiver ne fait plus beaucoup de sens et les indicateurs utilisés jusqu'à présent deviendront obsolètes. En altitude, le changement se poursuivra à grand pas.

Impacts des changements de saisonnalité sur l'agriculture

L'augmentation des températures accélère le développement phénologique des plantes cultivées. Ces dernières germent et fleurissent plus tôt les rendant plus vulnérables au gel. En même temps, une plus grande précocité permet d'échapper aux chaleurs et sécheresses extrêmes de l'été. Le « timing » des phases critiques de développement diffère souvent considérablement d'une espèce et variété à l'autre. Dans la course au maintien de la productivité agricole face au changement climatique, il faudra donc choisir des espèces et des variétés ayant un cycle de croissance adapté aux nouvelles conditions climatiques.

Annelie Holzkämper, Andreas Hund, Dario Fossati

La sensibilité des cultures agricoles varie selon la phase de croissance dans laquelle elles se trouvent. Les périodes de développement particulièrement « critiques » sont celles où le risque de dommages sur la croissance et le rendement des plantes à la suite d'un phénomène climatique extrême est le plus élevé. Les valeurs seuils des facteurs climatiques ayant une influence sur le développement phénologique et la durée des phases critiques varient substantiellement d'une espèce à l'autre.

Les cultures pérennes comme la vigne sont relativement insensibles au gel durant leur dormance hivernale. Si le gel survient, en revanche, au printemps pendant la phase d'éclosion des bourgeons ou plus tard, les plantes peuvent subir de graves dégâts^{50,51}. Une perte de rendement est alors souvent inévitable, car les dommages causés aux bourgeons floraux sont irréversibles. En avril 2017, une conjonction de gelées tardives, chaleur estivale et tempêtes de grêle a ainsi causé une perte de rendement considérable. En Suisse romande, seuls 72 % de la quantité de raisin (par rapport à 2016) ont pu être récoltés à la suite de ces conditions climatiques extrêmes. En Suisse alémanique et italienne, les dégâts ont été légèrement moins importants avec une quantité récoltée de 81 % et 77 %, respectivement⁵².

Gel et chaleur provoquent des retards de croissance et des pertes de rendement

Les cultures arables telles que le maïs et le blé sont également très sensibles au gel lors de la phase d'allongement de la tige, appelée montaison. Avant cela, la zone apicale et la zone d'où partent les jeunes pousses sont proches du sol et donc relativement bien protégées des dégâts causés par le gel. Dans l'idéal, les jeunes pousses ne devraient donc commencer à s'allonger qu'une fois le risque de gel passé. Le blé, par exemple, n'entame sa phase de montaison que lorsque la probabilité d'être exposé à une période prolongée de températures inférieures à -4°C est faible⁵³. Pour le maïs, un épisode de gel durant la montaison est capable, dans des cas extrêmes, de détruire toute une récolte.

La plupart des cultures sont particulièrement vulnérables au moment de la floraison. C'est pourquoi cette phase sensible se situe généralement à un moment de l'année où le risque de températures extrêmes est minime (Fig. 29). Pour le blé, une des phases les plus sensibles commence avec la méiose. La division méiotique débute au moment où la dernière feuille se déploie et bien avant l'apparition de l'épi. Pendant cette période, les températures sont généralement comprises entre 0°C et 25°C (Fig. 29). Des phénomènes climatiques extrêmes au moment de la floraison et au début de la formation des grains peut avoir un impact majeur sur le rendement⁵⁴⁻⁵⁸. Dans l'idéal, les températures devraient être aux alentours des 21°C et ne pas dépasser les 31°C au moment de la floraison⁵⁷. Le blé fleurit en général avant que le risque de chaleur extrême ne devienne trop élevé, car le stress thermique peut entraîner des réductions significatives dans les rendements⁵⁹. Ainsi, une température de 35°C pendant la phase de floraison peut réduire le poids des grains d'environ 45%⁶⁰. Lors de la méiose et dans des cas extrêmes, la chaleur peut même rendre le pollen stérile: les anthères s'atrophient alors et les éléments mâles de la plante perdent en fertilité⁶¹. Une vague de chaleur extrême pendant la phase de formation des grains peut également provoquer un

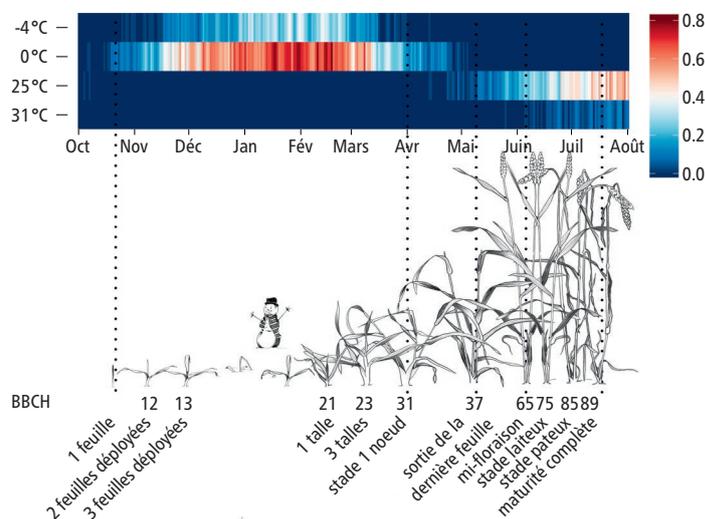


Fig. 29: Interactions entre les extrêmes de température et la phénologie du blé. Les barres de couleurs (échelle à droite) montrent la proportion de jours où la température s'est située pendant au moins une heure en dessous ou en dessus de certaines températures critiques (températures extrêmes) pour le blé ($\leq -4^\circ\text{C}$, $\leq 0^\circ\text{C}$, $\geq 25^\circ\text{C}$, $\geq 31^\circ\text{C}$). Les mesures de température pour les années 1981–2018 proviennent du site de Zurich-Affoltern (MétéoSuisse, station REH). Chaque barre verticale représente un jour. Une valeur de 1 (rouge) signifie que le thermomètre a indiqué une température extrême pour au moins une des moyennes horaires de la journée en question et ce pour toutes les années de l'échantillon.

Le dessin illustre les stades phénologiques du blé d'hiver avec une date de semis en octobre selon l'échelle BBCH⁶³: de la première feuille à la floraison en passant par la première talle visible et les différents stades de maturité. Les lignes en pointillés marquent les positions approximatives des stades les plus importants dans le cycle de croissance du blé pour le site d'Eschikon sur le Plateau suisse (Figure modifiée)⁶⁴.

ratatinement des grains et donc une diminution du rendement et de la qualité du blé⁶².

Accélération, précocité et sélection de nouvelles espèces

Le développement phénologique de toute plante est en grande partie déterminé par la température. À mesure que la planète se réchauffe, le développement phénologique s'accélère. Les plantes cultivées atteindront donc leurs stades phénologiques plus tôt. La période de croissance jusqu'à maturité complète se raccourcira également. Dans le cas de la vigne, on peut s'attendre à un débournement précoce et donc à une augmentation des risques de dommages dus au gel tardif. Pour de nombreuses cultures arables, on peut également s'attendre à un raccourcissement de la phase de formation des grains ce qui entraînera une réduction des rendements. L'augmentation des températures n'a pourtant pas que des effets négatifs. Ainsi, on assistera sans doute à une réduction des phénomènes climatiques extrêmes durant les premières phases critiques du cycle de croissance.

Sous l'effet d'un climat en pleine transformation, les plantes devront donc d'une part adapter leur phénologie, par exemple en fleurissant ou en s'allongeant plus tôt et d'autre part apprendre à tolérer de nouvelles sources de stress comme la chaleur. La sélection de variétés selon le critère de « résistance à l'hiver » perdra de son importance. Le risque de gel tardif reste, cependant, bien réel et doit être pris en compte si le développement phénologique des plantes s'accélère. Dans les paragraphes qui suivent, nous examinerons les stratégies d'adaptation plus en détail.

Stratégies d'adaptation au changement climatique dans le secteur agricole

Les variétés actuellement cultivées sont généralement bien adaptées aux conditions climatiques de leur milieu. Leurs besoins en chaleur et humidité, qui dépendent de la phase de croissance, coïncident avec l'évolution saisonnière des températures et la répartition des précipitations sur le lieu de culture, comme le montre la figure 29. La répartition des types de blé en Europe illustre également très bien ce phénomène⁶⁵⁻⁶⁷. La résistance au froid des cultures d'hiver de blé panifiable augmente du sud-ouest au nord-est : blé de printemps (Espagne), blé alternatif⁶⁸ (nord de l'Espagne, sud-ouest de la France) et blé d'hiver (Suisse, nord de la France et Allemagne). Plus au nord encore, le blé ne passe pas l'hiver. Dans les régions septentrionales de Finlande et Russie, le blé est dès lors semé au printemps en utilisant des variétés à courte période de végétation.

Ces zones de culture vont se déplacer sous l'effet du changement climatique. En Suisse par exemple, la culture du blé alternatif deviendra une option intéressante. Les nouvelles conditions climatiques peuvent, toutefois, aussi entraîner des décalages problématiques de certaines phases sensibles du cycle de croissance. On devra ainsi s'attendre à une plus grande variabilité dans les rendements ou à des pertes de rendement chez des variétés qui étaient jusqu'alors bien adaptées à leur milieu. Il est vrai que les plantes ont la capacité de s'adapter dans une certaine mesure au changement climatique et ont une certaine résistance à la chaleur et au froid. Certains ajustements, notamment dans la sélection des variétés, seront néanmoins nécessaires pour contrecarrer l'impact du changement climatique sur la productivité agricole.

Une stratégie d'adaptation judicieuse pourrait consister à choisir des variétés plus tardives. Ces dernières permettent de mieux profiter des saisons de végétation plus longues. Les variétés tardives sont en effet capables d'absorber une plus grande quantité de rayonnement sur une plus longue période et ont donc un potentiel de rendement plus élevé^{69,70}. Ces variétés fleurissent cependant aussi plus fréquemment pendant les périodes à haut risque de sécheresse ou de chaleur extrême. En choisissant des variétés plus précoces, on évitera d'exposer les cultures aux extrêmes climatiques de plus en plus fréquents⁷¹. C'est aussi ce qu'a constaté une équipe de chercheurs en analysant des données du blé en Allemagne⁷². Les essais menés sur les variétés de blé en Suisse confirment la tendance.

Des semis plus tardifs

La date des semis joue également un rôle à l'heure de savoir quelle variété – tardive ou précoce – s'adaptera mieux aux nouvelles conditions climatiques. Sous l'effet du réchauffement, les cultures d'été jouiront d'une période de végétation plus longue, une situation qui sera propice au semis précoce. Pour les cultures d'hiver, le plus judicieux sera de semer plus tard afin d'éviter que la plante ne pousse trop avant l'arrivée de l'hiver.

Au-delà des adaptations au niveau du cycle de croissance, on peut également envisager de choisir des variétés plus résistantes au stress abiotique. Une étude menée sur la base d'essais à long terme montre que la

tolérance à la chaleur des variétés européennes de blé varie fortement en fonction de la région où le blé est cultivé : les variétés des régions méridionales de l'Europe présentent ainsi une plus grande tolérance à la chaleur⁷³. L'adaptation au réchauffement peut donc en partie s'accomplir sur la base de la variabilité génétique existante. Les cultures du futur devront faire preuve d'une plus grande tolérance aux facteurs de stress abiotique.

Conclusion

Chaque culture est affectée et réagit de manière différente aux conditions climatiques extrêmes ou changeantes, aussi bien au niveau de son cycle de croissance qu'au niveau de sa vulnérabilité à différents stades de son développement phénologique. Les risques de perte de rendement dépendent donc fortement de la probabilité qu'un extrême climatique coïncide avec une phase phénologique critique. Si l'augmentation des températures entraîne une plus forte précocité des phases critiques, le risque de dommages dus à un événement climatique extrême comme le gel tardif, augmente. Un thermomètre à la hausse peut, cependant, aussi avoir des effets bénéfiques. Si le développement phénologique prend de l'avance, la plante sera moins susceptible de souffrir d'un événement de chaleur ou de sécheresse extrême. Les stratégies d'adaptation pour l'agriculture sont donc multiples. La sélection de variétés plus précoces en particulier pourrait avoir un impact favorable sur la stabilité des rendements.



Fig. 30 : Lutte antigel par aspersion dans le Tyrol du Sud.



Fig. 31 : Lutte contre le gel tardif à l'aide de bougies antigel dans la région viticole allemande de Nahe.

Gelées tardives et changement climatique – Quels risques?

La planète se réchauffe sous l'effet du changement climatique. Les températures en-dessous de zéro degré deviennent par conséquent de plus en plus rares. Les plantes aussi se développent et fleurissent plus tôt au printemps. Quelles implications ces phénomènes ont-ils sur le risque de dégâts dus au gel des cultures agricoles?

Stefan Brönnimann, Annelie Holzkämper, Michael Meier

Les gelées tardives provoquent régulièrement des dégâts importants aux cultures agricoles. Parmi les exemples récents, on peut citer l'épisode de gel d'avril 2017⁷⁴, qui a en grande partie détruit les récoltes d'abricot, ou la gelée de mai 2019, lorsque la température au sol à Berne-Zollikofen est tombée à $-7,7^{\circ}\text{C}$. La tendance est-elle à la multiplication des gelées tardives? Compte tenu du réchauffement climatique rapide, cela semble contre-intuitif au premier abord, car avec le réchauffement, le dernier gel se produira également plus tôt dans l'année (cf. chapitre Indices). Pourtant, le début du printemps est également plus avancé en ce qui concerne le développement des plantes (cf. chapitre plantes).

Les gelées tardives, considérées comme l'apparition de gel après le début de la reprise de végétation, pourraient donc se produire plus fréquemment. Divers facteurs jouent un rôle, dont l'interaction détermine en fin de compte si les gelées tardives sont plus fréquentes ou non.

Le réchauffement favorise les gelées tardives

Considérons tout d'abord uniquement les facteurs météorologiques. Dans ce qui suit, nous partons de l'hypothèse, assez basique, que le printemps commence lorsque la courbe lissée des températures dépasse une certaine valeur, dans notre cas 4°C . Les gelées sont des chutes de température sous la barre des zéros degrés. La figure 32 montre la fréquence des gelées tardives, pour une année donnée, sous l'influence du climat actuel (courbe bleue). Actuellement, le début du printemps, c'est-à-dire l'intersection de la courbe bleue et de la ligne noire, se situe au début du mois de mai. Juste après cette intersection, on observe une chute des températures, il s'agit en fait d'une gelée tardive. Si nous déplaçons maintenant toute la courbe de températures de quelques degrés vers le haut, illustrant ainsi la situation climatique future, le début du printemps se déplace au début du mois de mars (intersection avec la ligne noire). Dans ce scénario, on peut voir que le nombre de gelées tardives, entre mars et début avril, s'élève désormais

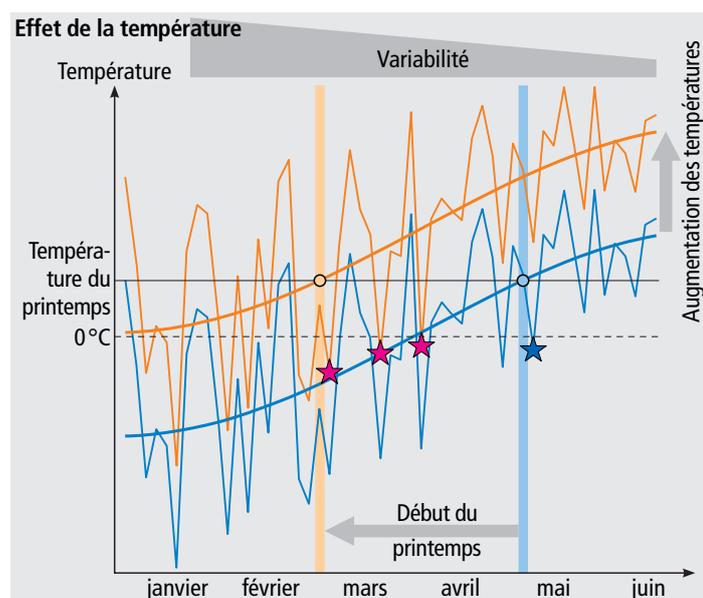


Fig. 32: Schéma représentant l'évolution du printemps et du gel tardif. Bleu: climat actuel. Orange: climat futur. Le printemps commence lorsque la courbe lissée des températures dépasse la température du printemps (ligne noire). Les étoiles indiquent les épisodes de gel tardif.

à trois. Même si, de manière générale, les épisodes de gel deviennent plus rares, la probabilité de gel tardif augmente sous l'effet du réchauffement (si les températures évoluent comme dans la fig. 32).

L'augmentation des gelées tardives s'explique par le fait que les fluctuations de température d'un jour à l'autre sont beaucoup plus importantes en hiver qu'en été. Le printemps est donc en train de se décaler d'un moment de l'année où la variabilité est faible à un moment où la variabilité est forte, autrement dit la variation autour de la moyenne augmente. Pour une température moyenne identique (température du printemps définie comme telle et représentée par la ligne noire dans la fig. 32), on observe donc une augmentation du nombre de fois où le thermomètre passe au-dessous du zéro. Les modèles de simulation climatologiques pour la Suisse confirment cette hypothèse. Selon les scénarios, le printemps se décalera de 3 à 6 semaines jusqu'à la fin du siècle et le phénomène sera accompagné d'une augmentation des gelées tardives, surtout vers la fin du siècle.

Davantage de dégâts dus au gel après le redoux

Le printemps défini en fonction de la température ne coïncide pas forcément avec le printemps phénologique. Suivant les espèces, les plantes sont plus ou moins sensibles au gel tardif. Divers facteurs jouent un rôle important à cet égard. Chaque espèce présente, par exemple, une résistance différente au gel qui lui permet ou non de survivre sans dommages à des températures en-dessous du point de congélation. La vulnérabilité au gel tardif dépend aussi du stade de développement phénologique de la plante. Plus une plante est développée au printemps, plus les dégâts dus au gel seront importants. Les cultures pérennes, comme les arbres fruitiers et la vigne, subissent un premier «endurcissement» face au gel au début de l'hiver, lorsque les températures baissent et les jours raccourcissent. Une plante ainsi endurcie peut survivre à des températures allant jusqu'à -20°C .⁷⁵ Après le redoux printanier et surtout après l'éclosion des bourgeons, la résistance des plantes au gel devient très faible. Les dommages causés aux bourgeons peuvent avoir un effet dramatique sur le rendement des récoltes.

L'éclosion des bourgeons de même que l'apparition d'autres stades phénologiques sont en grande partie déterminée par la température. Plus il fait chaud, plus les plantes bourgeonnent, fleurissent et mûrissent leurs fruits tôt. D'autres facteurs, tels que l'exposition au froid ou l'approvisionnement en eau, peuvent également accélérer ou retarder le développement phénologique. Pour de nombreux végétaux, la durée du jour est également importante. Elle peut limiter la réaction des plantes aux températures et donc l'éclosion précoce des bourgeons. On observe, cependant, de grandes disparités dans l'influence de la durée du jour sur diverses variétés de plantes au sein d'une même espèce.

La question de savoir si le risque de dommages aux cultures dus au gel diminue ou augmente avec le changement climatique dépend donc d'une part de la réaction phénologique à l'augmentation des températures, c'est-à-dire de la précocité des stades les plus sensibles au gel (p.ex. l'éclosion des bourgeons de vigne) et d'autre part de la durée du jour qui joue un rôle à la fois moteur et régulateur. Une analyse des données phénologiques sur l'ensemble de l'Europe montre une augmentation du risque de gel tardif pour les espèces d'arbres dont la phénologie réagit de manière très sensible à l'augmentation des températures – en particulier dans les régions côtières.⁷⁶ Pour les feuillus

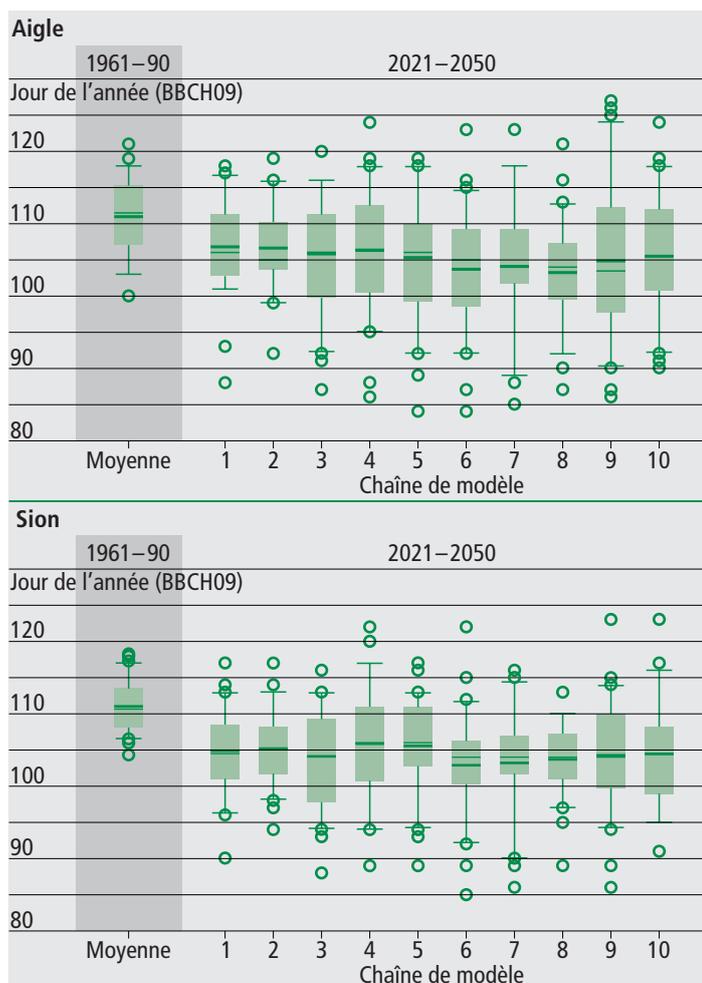


Fig. 33: Jour d'éclosion des bourgeons de vigne à Aigle et Sion pour la période de référence 1961–1990 et la période de simulation 2021–2050 (différentes chaînes de modèle). Les cases montrent la moyenne (ligne épaisse), la médiane (ligne fine), le 25^e/75^e centile et le 10^e/90^e centile (barres supérieures et inférieures). Les données aberrantes sont signalées par des cercles⁷⁸.

de l'Illinois (États-Unis), Augspurger⁷⁷ a également observé une augmentation significative de la probabilité annuelle de dommages liés au gel. Par rapport à la première moitié du 20^e siècle, cette probabilité s'est multipliée par sept pour la période 1980–2012. Alors qu'auparavant trois printemps sur cent étaient touchés par le risque de gel, ce chiffre est passé à un sur cinq à partir des années 1980.

Davantage de variabilité à l'avenir

L'estimation du risque de dommages dus au gel varie considérablement en fonction des projections climatiques, des modèles phénologiques, des espèces végétales et des régions étudiées. Pour les vignes de Chasselas situées dans la vallée du Rhône en Suisse, le risque de dommages pourrait ainsi augmenter ou diminuer d'ici à 2050, selon l'emplacement et les projections⁷⁸ (fig. 33). En moyenne, les bourgeons éclosent cinq à dix jours plus tôt à l'horizon 2021–2050 et par rapport à la période de référence 1961–1990. Il est frappant de constater que la variabilité augmente d'année en année sur les deux sites valaisans d'Aigle et de Sion, et ce, quels que soient les projections, les modèles de croissance et les cépages utilisés dans les calculs. La variabilité ne se manifeste pas seulement par une arrivée de plus en plus précoce du printemps, mais aussi par des années où le printemps se présente encore plus tard que dans le deuxième tiers du 20^e siècle.

Les résultats de ces estimations coïncident avec les études sur le risque de gel tardif menées sur les arbres fruitiers et forestiers. En Suisse, au cours des dernières décennies, le risque est resté inchangé en plaine, mais a augmenté en altitude.

Pour le nord-est de l'Allemagne, Hoffmann et Rath⁷⁹ s'attendent à une diminution du risque de dégâts causés par le gel aux pommiers. Pfliederer et al.⁸⁰ prévoient, en revanche, une augmentation du risque de dommages aux pommiers en Allemagne, jusqu'à dix pourcents, pour un réchauffement de 2 °C. Les résultats de cette étude montrent cependant une grande hétérogénéité spatiale dans les tendances avec un degré d'incertitude élevé résultant de projections climatiques également incertaines.

Les saints de glace

La météorologie populaire prend souvent l'année agricole comme référence. Les « saints de glace » (aujourd'hui du 11 au 15 mai, dans l'ancien calendrier julien huit jours plus tard) symbolisent la fin du risque de gel pour l'agriculture. On a souvent fait valoir que les poussées d'air froid sont plus fréquentes à cette époque. Cependant, les données météorologiques de la Suisse ne font pas état d'une augmentation des gelées autour des saints de glace, même si un épisode de gel peut très bien se produire, comme ce fut le cas en mai 2019.

La gelée tardive de 1974

Les dommages causés par le gel tardif de 1974^{1,81} ont fait l'objet d'une analyse et d'une cartographie détaillée menées par le programme climatique bernois (voir encadré **BernClim**, p. 5). Cette cartographie permet une interprétation climatique en fonction de la topographie. L'analyse montre que différents phénomènes (poussées d'air froid, rayonnement) jouent un rôle différent suivant l'emplacement. La section de carte ci-dessous illustre également l'importance des conditions topographiques locales.

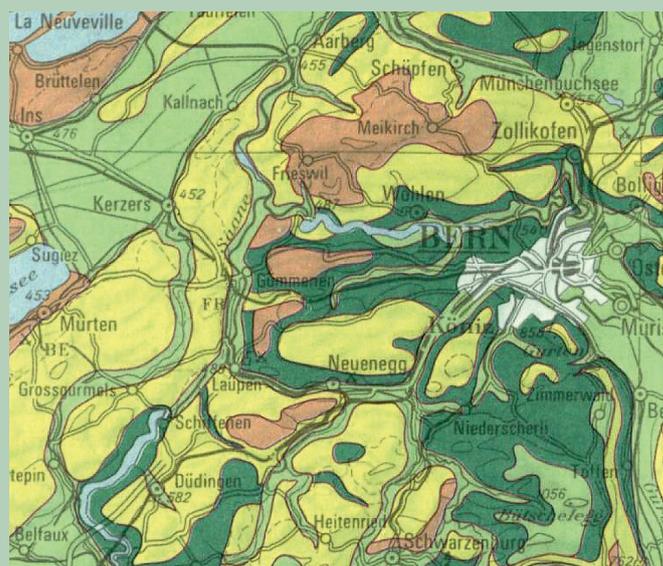


Fig. 34: Section d'une carte représentant la répartition des dommages causés par le gel tardif en 1974 (basée sur l'observation des noyers)⁸¹ Orange: aucun dommage. Jaune: légèrement endommagé. Vert foncé: modérément endommagé. Vert clair: gravement endommagé.

Les cours d'eau au fil des saisons

L'hydrologie de la Suisse est fortement influencée par les variations saisonnières dans les débits. Les caractéristiques hydrologiques et les régimes d'écoulement présentent donc une forte composante régionale, tant pour les débits mensuels moyens que pour les situations d'étiage et de crue.

Rolf Weingartner

En hydrologie, les fluctuations saisonnières dans les débits moyens mensuels sont désignées sous le nom de « régimes d'écoulement ». Ils fournissent des informations cruciales sur le comportement hydrologique de différents bassins versants. Les bassins du nord des Alpes sont divisés en deux catégories principales selon leur régime d'écoulement : « alpin » et « Plateau et Jura ». En utilisant les exemples du bassin versant alpin de la Kander dans l'Oberland bernois et du bassin versant jurassien de l'Ergolz dans le canton de Bâle-Campagne, nous pouvons faire une comparaison de deux représentants assez caractéristiques de ces catégories de base. Nous comparons le débit mensuel moyen théorique

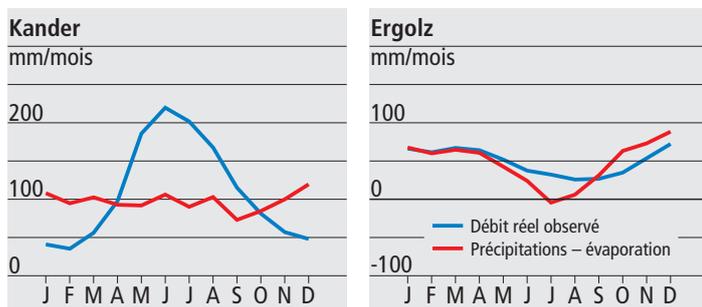


Fig. 35: Débit observé et théorique (précipitations – évaporation) des rivières Kander et Ergolz.

à long terme avec l'écoulement réel observé (Fig. 35). En hydrologie, l'« écoulement théorique » est défini comme le débit maximum possible si l'on soustrait uniquement l'évaporation aux précipitations (précipitations – évaporation). Tous les autres processus participant à la formation d'un écoulement d'eau, tels que la fonte des glaces et de la neige et l'exfiltration du sol et des nappes phréatiques ne sont pas pris en compte.

Neige et glace comme réservoir temporaire

Dans le bassin versant alpin de la Kander qui présente un taux de glaciation d'environ cinq pour cent, les deux hydrogrammes saisonniers diffèrent considérablement. Alors que l'hydrogramme théorique

Type de régime	a-glaciaire	b-glaciaire	a-glacio-nival
Courbe de régime			
Classement	Juil. / Août / Juin / Sep.	Juil. / Août / Juin / Sep.	Juil. / Juin / Août / Mai
Classification spatiale	$Am > 2400$ $tg \geq 36$	$Am > 2100$ $22 \leq tg < 36$	$Am > 2400$ $12 \leq tg < 22$
Type de régime	b-glacio-nival	nivo-glaciaire	nival
Courbe de régime			
Classement	Juin / Juil. / Août / Mai	Juin / Juil. / Mai / Août	Juin / Mai / Juil. / Août
Classification spatiale	$1900 < Am < 2300$ $6 \leq tg < 12$	$1550 < Am < 1900$ $3 \leq tg < 6$	$1550 < Am < 1900$ $0 \leq tg < 3$

Fig. 36: Types de régime de débit alpin. Am: altitude moyenne du bassin versant [en mètres], tg: taux de glaciation [%].⁸²

ne fluctue que légèrement, les débits réels observés montrent une variation saisonnière prononcée. Cette variation est due au fait que la neige et les glaciers fonctionnent comme réservoirs d'eau. La neige, comme réservoir temporaire en hiver, fond en mai et juin et les glaciers entre juillet et septembre. Suivant l'importance de la neige et de la glace, on peut distinguer entre six types de régimes d'écoulement alpins (fig. 36). Dans les bassins versants avec beaucoup de glaciers, les débits mensuels moyens les plus élevés apparaissent en juillet et en août. Dans les zones nivales à faible glaciation, le débit le plus élevé se situe en mai et en juin.

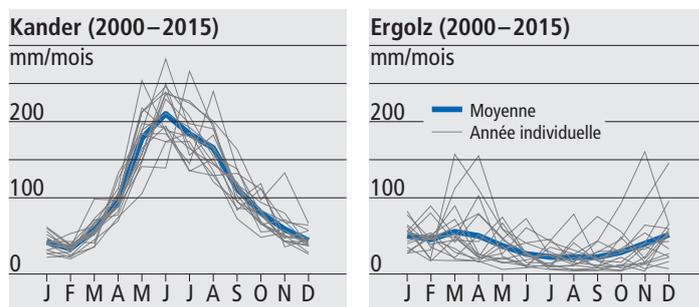


Fig. 37: Comparaison entre le régime d'écoulement moyen à long terme et les régimes d'écoulement d'années prises individuellement.

La saisonnalité des bassins versants alpins est donc façonnée par l'influence plus ou moins marquée de la glace et de la neige. Si l'on connaît l'altitude moyenne d'une zone et le taux de glaciation, on peut donc estimer le régime d'écoulement d'un bassin versant (fig. 36). Dû à l'influence dominante de la neige et de la glace, le régime d'écoulement moyen à long terme présente plus ou moins les mêmes caractéristiques que les régimes d'écoulement des années prises individuellement (fig. 37). Cette stabilité des débits saisonniers couplée à de grands volumes d'eau et des reliefs marqués explique l'attractivité des Alpes pour l'exploitation hydroélectrique et permet à la zone alpine d'être le « château d'eau » d'Europe centrale.

Une grande variabilité d'une année à l'autre

La saisonnalité dans le Jura est très différente, comme le montre l'exemple du bassin versant de l'Ergolz. Les écarts entre l'hydrogramme saisonnier théorique et l'hydrogramme réel observé sont minimes. Le faible débit théorique en été (juin à août) est dû à l'évaporation. En effet, l'évaporation moyenne en été (315 mm) ne diffère que légèrement du niveau moyen de précipitations (340 mm)⁸³. Il n'y a donc que peu d'eau disponible pour l'écoulement. L'hydrogramme saisonnier observé est un peu plus équilibré que l'hydrogramme théorique grâce à l'effet régulateur de la nappe phréatique qui se remplit en automne et en hiver et se vide au printemps et en été. Le régime d'écoulement des années prises individuellement s'écarte considérablement du régime d'écoulement moyen. Ceci est dû à l'évolution saisonnière des précipitations qui change d'année en année (fig. 37). La saisonnalité des bassins versants du Plateau et du Jura est donc déterminée par des précipitations qui varient dans le temps et une évaporation qui ne varie guère d'une année à l'autre.

Le changement climatique est en train de modifier la saisonnalité des régimes d'écoulement. Dans la région alpine, sous l'effet du réchauf-

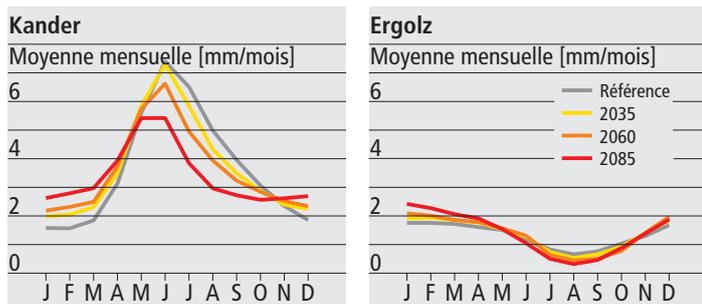


Fig. 38: Modification du régime d'écoulement saisonnier – scénario « sans protection du climat »; médiane sur plusieurs simulations.⁸⁴

fement, l'influence de la neige et de la glace sera moins marquée et les précipitations sous forme de pluie augmenteront en hiver. Les débits diminueront, par conséquent, à la fin du printemps et en été et augmenteront en hiver (fig. 38). Les débits annuels ne changent que très peu. Donc pour la Kander dans les Alpes, on observe une redistribution saisonnière du débit. Pour l'Ergolz dans le Jura, la saisonnalité existante est renforcée: les précipitations estivales diminuent, tandis que les précipitations hivernales augmentent⁴⁸. La sécheresse estivale deviendra donc un défi de plus en plus important (Fig. 38).

Périodes d'étiage de plus en plus tôt dans l'année

En ce qui concerne les périodes d'étiage, on observe également une saisonnalité différente selon les régions. L'étiage est défini comme un débit exceptionnellement faible. L'étiage correspond au moment de l'année (civile) où le débit, mesuré sur une période de 7 jours, a été le plus faible. Les différences régionales s'expliquent par divers facteurs. Dans la région alpine, les périodes d'eaux basses se produisent lorsque les précipitations sont temporairement stockées sous forme de neige. L'étiage survient donc caractéristiquement en hiver. Sur le Plateau et dans le Jura, les eaux basses sont plutôt dues à l'absence de précipitations, souvent en combinaison avec une forte évaporation. Cette situation est caractéristique de la fin de l'été et de l'automne.

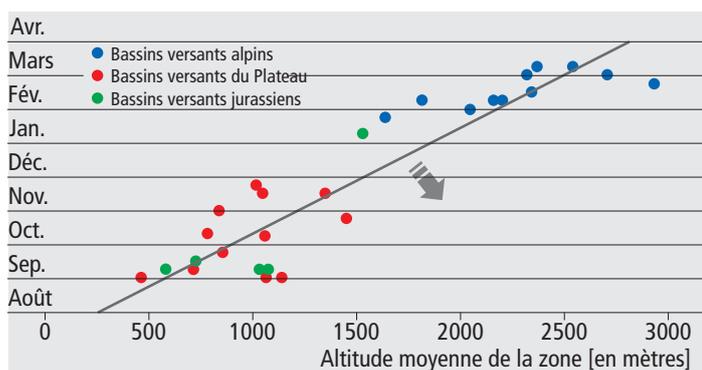


Fig. 39: Date moyenne (D_m) du plus petit débit annuel sur sept jours en fonction de l'altitude moyenne du bassin (A_m). Flèche: modification de la relation entre D_m et A_m sous l'effet du changement climatique.⁸⁵

Nous pouvons donc estimer la date à laquelle le débit d'eau est au plus bas pour un point correspondant à l'altitude moyenne d'un bassin versant (Fig. 39). Si l'on examine les années individuellement, on observe des dates d'étiage qui s'écartent plus ou moins de la moyenne. Dans les zones alpines, ces écarts sont faibles. Les dates varient seulement de 10 à 15 jours autour de la moyenne grâce à l'effet régulateur de la neige et de la durée d'enneigement⁸⁶. Sur le plateau, les périodes d'étiage sont liées aux précipitations. Les écarts par rapport à la moyenne sont par conséquent beaucoup plus importants et peuvent aller de 50 à 100 jours.

Sous l'effet du changement climatique, la date moyenne du plus petit débit annuel se modifie. En simplifiant quelque peu, on peut s'imaginer que la ligne (fig. 39) se déplace parallèlement vers le bas dans le sens de la flèche. En moyenne, la période d'étiage « arrive donc plus tôt ». Ce phénomène est dû à la diminution de l'influence de la neige et à l'augmentation de la sécheresse estivale.

Saison des crues: plus longue, mais à la même époque

Pour qu'une importante crue (pics élevés et/ou grands volumes d'eau) se produise, deux conditions principales doivent être remplies: Les précipitations doivent être abondantes et la limite des zéros degrés doit être aussi élevée que possible. L'isotherme zéro est un facteur particulièrement important pour les bassins versants alpins: plus la limite du zéro est élevée, plus la surface d'un bassin versant recevant des précipitations abondantes et contribuant ainsi à l'écoulement est grande. En Suisse, ces deux conditions sont généralement remplies entre mai et septembre. Il n'est donc pas surprenant que la majorité des grandes crues se produit pendant cette période (fig. 40). Le réchauffement climatique prolongera quelque peu la saison des inondations, mais sa saisonnalité ne changera pas fondamentalement. L'intensité des inondations s'accroîtra, en revanche, car le réchauffement augmentera la teneur en eau de l'air ce qui engendrera des précipitations plus abondantes (formule de Clausius-Clapeyron). La limite du zéro degré continuera également à monter.

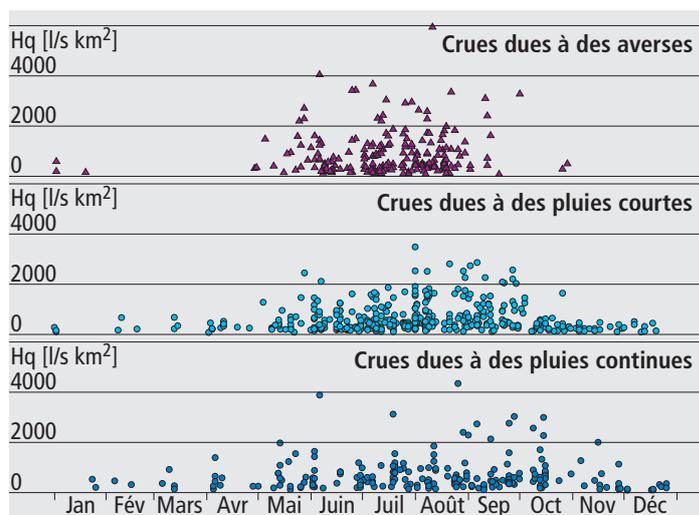


Fig. 40: Moment auquel se produit la plus forte crue annuelle (H_q) dans les bassins versants suisses, classé par type de crue.⁸⁷

Neige: changements actuels et futurs

Lors de ces dernières décennies, on a pu observer une faible tendance à un enneigement plus tardif et une tendance claire à une fonte des neiges plus précoce en Suisse. Cette évolution a des conséquences pour les humains et la nature et est un signe avant-coureur de la forte diminution des jours enneigés dans le futur.

Moritz Buchmann

Un Noël blanc et des vacances sportives, voilà ce qu'évoque souvent pour nous la neige. Et pourtant, l'importance de la neige va bien au-delà. La couverture neigeuse, ou plutôt sa durée, est en fait essentielle pour les êtres humains et la nature. En raison de ses propriétés isolantes, le manteau neigeux protège, par exemple, les plantes contre le gel⁸⁸. Une couverture neigeuse continue réfléchit également la lumière du soleil et empêche ainsi le réchauffement du sol grâce à la rétroaction de l'albédo de la neige⁸⁹. La fonte des neiges marque le début du développement des plantes et donc une plus grande disponibilité de nourriture pour divers animaux⁹⁰. La neige fournit également un habitat et un lieu de reproduction à certains animaux alpins, tels que les lagopèdes et les lièvres variables^{91,92}. De plus, la neige remplit la fonction importante de réservoir naturel et fait ainsi partie intégrante du cycle de l'eau. Toutefois, la neige est aussi un danger naturel et les avalanches sont courantes en montagne. Pour le tourisme d'hiver, la neige entre Noël et Nouvel-An est une condition essentielle pour une saison réussie, surtout en plaine⁹³.

L'enneigement et la fonte des neiges peuvent, de prime abord, paraître comme de simples points de référence temporels. Ce jugement s'avère, toutefois, erroné. Que signifient, en fait, «enneigement» et «fonte des neiges»? Le Larousse définit «enneigement» comme «l'état d'un endroit couvert de neige». La «fonte des neiges» signifie généralement une «transformation de la neige en eau de ruissellement». Dans la pratique, on parle souvent d'une date d'enneigement et d'une date de fonte des neiges, compris comme le début et la fin d'une couverture neigeuse continue. Il est surprenant de constater qu'il n'existe pas de définition plus précise. En réalité, demander que la couverture neigeuse soit continue pour pouvoir parler d'enneigement a peu de sens dans la zone d'altitude du Plateau Suisse, là où cette couverture ne l'est presque jamais. L'expérience montre que l'analyse des données d'enneigement et de fonte des neiges n'est pertinente que pour les stations de mesure situées à plus de 1000 mètres. Et même à ces altitudes, la neige peut faire défaut à certains moments de l'hiver. Ces années-là, la couverture neigeuse est intermittente et on observera plusieurs périodes d'enneigement (voir fig. 41). Face à une telle situation, le plus simple est de se référer à la période présentant la plus longue continuité de la couverture neigeuse pour déterminer une date de début et de fin d'enneigement qui fasse sens.

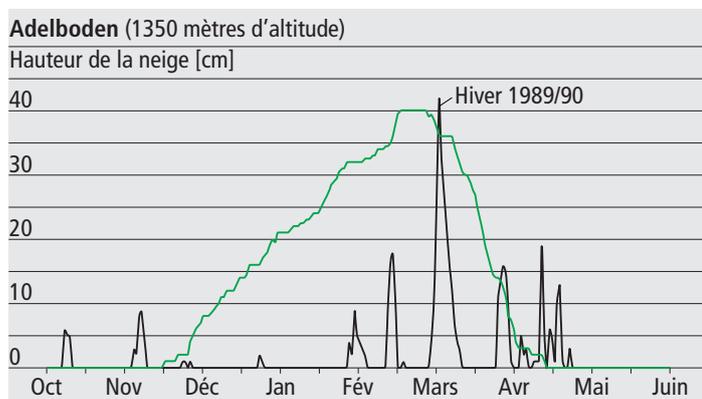


Fig. 41: Hauteur de neige à Adelboden (1350m). Hiver 1989/90 (noir); moyenne sur les 50 dernières années (vert). A quand la date d'enneigement ou de fonte des neiges en 1989/90?

Signification

Le fait que l'enneigement et la fonte des neiges aient été considérés très tôt comme des indicateurs clés est illustré par la publication⁹⁴ en 1909 déjà d'un texte sur l'enneigement et la fonte des neiges en Haute-Engadine, écrit par le directeur de l'institut suisse de météorologie de l'époque.

Évolution dans le temps

Le tableau 1 donne un aperçu des dates d'enneigement et de fonte des neiges pour trois stations connues de Suisse. Il est frappant de constater que les dates moyennes d'enneigement ne diffèrent guère, alors que les dates moyennes de fonte des neiges varient sur deux semaines. Ceci s'explique par le fait que la fonte de la neige dépend d'un plus grand nombre de facteurs et varie donc beaucoup plus.

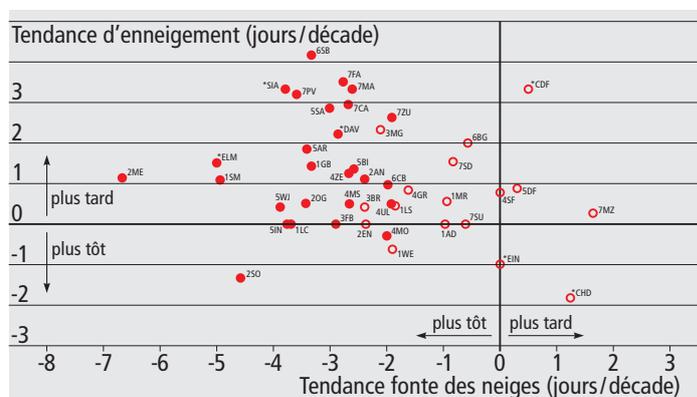


Fig. 42: Évolution de la date d'enneigement et de fonte des neiges pour 45 stations du SLF et de MétéoSuisse entre 1955 et 2014. Les stations montrant une tendance de fonte des neiges statistiquement significative (niveau: 10%) sont indiquées par des cercles remplis.

En ce qui concerne les tendances à long terme, deux études^{95,96} indiquent une faible tendance vers un enneigement plus tardif et une tendance relativement claire vers une fonte des neiges plus précoce. La figure 42 montre une analyse effectuée sur 45 stations dont les mesures entre 1955 et 2014 couvrent 60 années. Les stations dont les tendances sont statistiquement significatives indiquent toutes une fonte des neiges plus précoce. La grande majorité des stations montrent également un enneigement plus tardif. Cependant, cette tendance est moins marquée. L'analyse ne montre pas de relation significative entre l'altitude et l'amplitude des changements.

Scénarios pour l'avenir

Pour les Alpes, on s'attend à une réduction drastique du nombre de jours enneigés d'ici 2100, ce qui aura une influence directe sur la durée d'enneigement et donc aussi sur la date d'enneigement et de fonte des neiges. Ce phénomène concerne tous les niveaux d'altitude (fig. 43). Les altitudes inférieures à 1500m doivent s'attendre à une réduction des jours enneigés allant jusqu'à 80 pour cent pour des valeurs limites entre 5 et 50cm. Avec 30 pour cent de réduction, la situation est nettement moins accentuée en altitude (au-dessus de 2000m) mais reste néanmoins sérieuse^{48,97,98}.

L'augmentation des températures estivales favorise une fonte des

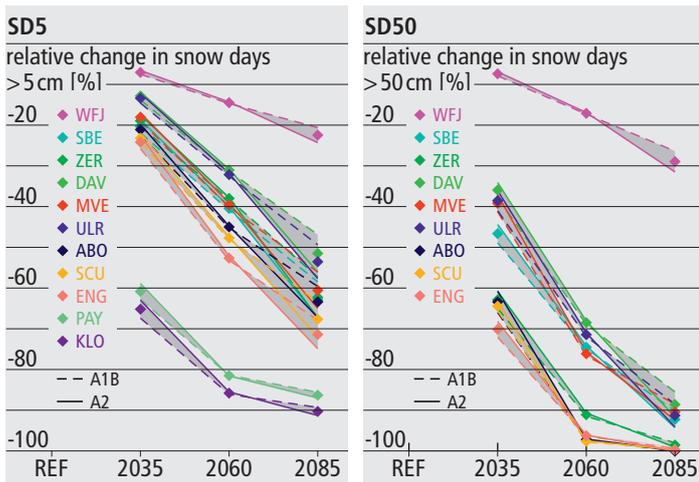


Fig. 43: Changement relatif prévu du nombre de jours enneigés sous 5 ou 50 cm pour divers endroits et deux scénarios différents: ligne continue (2,8 degrés de réchauffement d'ici 2100); en pointillés (3,4 degrés). Les stations sont classées par altitude (WFJ: la plus élevée, KLO: la plus basse).⁹⁷

neiges plus précoce. L'enneigement, quant à lui, est en grande partie déterminé par les précipitations hivernales qui sont très variables, ce qui rend le pronostic difficile. Par conséquent, le signal d'enneigement est accompagné de plus d'incertitudes que le signal de fonte des neiges.

Explications possibles

Les facteurs déterminants du changement sont donc l'augmentation de la température et la répartition saisonnière des précipitations. Au début de l'hiver (novembre, décembre), les températures moyennes sont suffisamment froides. L'enneigement est, par conséquent, déterminé par le comportement des précipitations. La fonte des neiges au printemps est, quant à elle, plutôt déclenchée par des températures en hausse.

L'augmentation de la température de l'air est clairement démontrée.^{48,98,99} En revanche, aucune tendance claire ne se dégage pour les précipitations qui varient fortement d'une année à l'autre.¹⁰⁰ On observe donc peu de changement quant à l'enneigement, au contraire d'une fonte des neiges plus variables. De plus, l'augmentation des températures en hiver n'est pas aussi marquée qu'au printemps, ce qui contribue à une influence plus faible sur l'enneigement.

Conséquences et conclusion

Les effets du changement climatique se feront sentir à plusieurs niveaux. Les stations de ski de basse altitude peineront, par exemple, à investir dans leurs installations si la neige fait de plus en plus souvent défaut. La fonte des neiges précoce entraînera également une modification des sols et des conditions de développement de la faune et de la flore. Ainsi, le lagopède qui dépend d'un milieu enneigé, sera sans doute poussé vers des altitudes plus élevées, ce qui restreindra son habitat⁹¹.

La fonte précoce des neiges à haute altitude entraînera également une réduction de la capacité de stockage hydrologique et donc un écoulement plus important. Ceci engendrera davantage d'inondations, et ce même si les précipitations restent modérées.

Les hivers plus courts s'expliquent plutôt par une fonte des neiges plus précoce qu'un enneigement plus tardif. Comparé à 1955, l'enneigement a lieu aujourd'hui en moyenne une semaine plus tard et la fonte des neiges deux semaines plus tôt. Avec l'augmentation des températures hivernales et printanières, les hivers seront encore plus courts à l'avenir.

	Andermatt 1440 m	Davos 1560 m	Samedan 1710 m
Date moyenne enneigement	16 novembre	20 novembre	19 novembre
Enneigement précoce	6 octobre 1974	15 octobre 1974	22 octobre 1981
Enneigement tardif	3 janvier 2015	26 décembre 2015	6 février 2002
Date moyenne de la fonte	1 ^{er} mai	25 avril	13 avril
Fonte précoce	31 mars 2011	17 mars 1991	21 mars 2002
Fonte tardive	3 juin 1975	18 mai 1970	9 mai 1979
Hiver 2019/20	8 nov. 2019 – 10 avril 2020	12 nov. 2019 – 15 avril 2020	4 nov. 2019 – 10 avril 2020

Tab. 1: Dates moyennes (1981–2018), précoces et tardives d'enneigement et de fonte des neiges dans trois stations entre 1400 et 1700 m d'altitude, comparaison avec l'hiver 2019/20.

Peu de neige pendant l'hiver 2019/20 qui bat des records de chaleur

Universität Bern
Geographisches Institut
Klimaforschung

Messblatt für Winterbeobachtungen
Beobachtungsposten 3646
Winter 2019/20

SCHNEE

A: Horizontal: Schneehöhe in cm
B: N-Exposition: Schneebedeckung
C: S-Exposition: Schneebedeckung

* Schneebedeckung
o kein Schnee
- keine Beobachtung

Ortsname	Koordinaten	Höhe	Exposition	Hangneigung	Bemerkungen
A: Engen	815 900 / 173 900	965 m	Ebene	keine	Karstweissen
B: Engen	819 700 / 173 400	975 m	Nord	10 Grad	-----
C: Engen	819 800 / 173 400	980 m	Süd	4 Grad	-----

	Oktober	November	Dezember	Januar	Februar	März	April
A							
B							
C							
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							
Total	o	o	o	o	o	o	o

Total der Schneebedeckungstage: A: 2 B: 2 C: 2

Datum: 01.05.2020 Der Beobachter: Peter Bangerter

Fig. 44: Formulaire d'observation de la neige du réseau BernClim quasi vide pour l'hiver 2019/20

Des températures qui ont, pour certains jours, battu des records de chaleur et des précipitations fréquemment en dessus de la moyenne ont fait de l'hiver 2019/20 l'un des moins enneigés en dessous de 1000 mètres. Les précipitations sont en grande partie tombées sous forme de pluie au lieu de neige qui, si déjà, n'est restée au sol qu'un maximum de quelques heures ou jours. Pour la première fois depuis le début des mesures en 1883, les stations d'Altdorf, de Stans et de Lucerne n'ont enregistré aucun jour enneigé de l'hiver. En fait, jusqu'à 1700 mètres, la hauteur de neige a été inférieure à la moyenne presque partout et pour la plupart du temps. Mais le SLF et MétéoSuisse ont également enregistré des hauteurs supérieures à la moyenne, dues en grande partie à de fortes chutes de neige dans certaines régions en début d'hiver. Parmi les caractéristiques les plus frappantes de cet hiver, on peut citer les épisodes répétés de pluie jusqu'en dessus de la limite de la forêt qui ont entravé un accroissement de la couverture neigeuse en-dessous de 2000 mètres. Il a également été frappant de voir à quel point les chutes de neige ont été faibles sur le versant sud des Alpes et en Engadine. Cela dit, en janvier les précipitations ont été peu abondantes et le temps très ensoleillé dans toute la Suisse.

Bibliographie

- 1 www.berncim.ch. Rutishauser, T., F. Jeanneret, R. Brügger, Y. Brugnara, C. Röthlisberger, A. Bernasconi, P. Bangertner, C. Portenier, L. Villiger, D. Lehmann, L. Meyer, B. Messerli, S. Brönnimann (2019) The BernClim plant phenological data set from the Canton of Bern (Switzerland) 1970–2018, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 1645–1654. doi.org/10.5194/essd-11-1645-2019.
- 2 Réseau d'observations phénologiques. www.meteosuisse.admin.ch/home/systemes-de-mesure-et-de-prevision/stations-au-soll/reseau-d-observations-phenologiques.html
- 3 PhaenoNet. www.phaenonet.ch/fr/
- 4 OpenNature. www.geography.unibe.ch/research/climatology_group/research_projects/open_the_book_of_nature/index_eng.html
- 5 Vassella A. (1997) Phänologische Beobachtungen des Bernischen Forstdienstes von 1869 bis 1882: Witterungseinflüsse und Vergleich mit heutigen Beobachtungen, *Umwelt-Materialien*, 73, Phänologie von Waldbäumen. Historische und aktuelle Beobachtungen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- 6 Defila C., B. Clot (2001) Phytophenological trends in Switzerland. *Int. J. Biometeorol.*, 45, 203–207. doi.org/10.1007/s004840100101
- 7 Güsewell S., B. Pietragalla, R. Gehrig, R. Furrer (2018) Representativeness of stations and reliability of data in the Swiss Phenology Network, Technical Report MeteoSwiss, 267.
- 8 Brugnara Y., R. Auchmann, T. Rutishauser, R. Gehrig, B. Pietragalla, M. Begert, C. Sigg, V. Knechtel, T. Konzelmann, B. Calpini, S. Brönnimann (2020) Homogeneity assessment of phenological records from the Swiss Phenology Network, *Int. J. Biometeorol.*, 64, 71–81.
- 9 Lehmann D., E. Wyss, T. Rutishauser, S. Brönnimann (2018) Citizen Science: Pflanzenphänologische Daten erfüllen wissenschaftliche Kriterien. *Geographica Bernensia G93*, 1–4. doi.org/10.4480/GB2017.G93
- 10 *Indice du printemps*. www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/changement-climatique-suisse/developpement-de-la-vegetation/indice-du-printemps.html
- 11 ge.ch/grandconseil/m/secretariat/marronnier/
- 12 Güsewell S., R. Furrer, R. Gehrig, B. Pietragalla (2017) Changes in temperature sensitivity of spring phenology with recent climate warming in Switzerland are related to shifts of the pre-season, *Glob. Change Biol.*, 23, 5189–5202. doi.org/10.1111/gcb.13781
- 13 Hopkins A. D. (1919) The Bioclimatic Law as applied to entomological research and farm practice, *Scientific Monthly*, 8, 496–513.
- 14 Vitasse Y., C. Signarbieux, Y.H. Fu (2018) Global warming leads to more uniform spring phenology across elevations, *Proc. Natl. Acad. Sciences*, 115, 1004–1008.
- 15 Fu Y.H., H. Zhao, S. Piao, M. Peaucelle, S. Peng, G. Zhou, P. Ciais, M. Huang, A. Menzel, J. Peñuelas, Y. Song (2015) Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding, *Nature*, 526, 104–107. doi.org/10.1038/nature15402
- 16 Bulletin climatologique printemps 2020, MétéoSuisse.
- 17 Vitasse Y., A. Lenz, C. Körner (2014) The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees, *Front. Plant Sci.*, 5, 541. doi.org/10.3389/fpls.2014.00541
- 18 Vitasse, Y. (2013) Ontogenic changes rather than difference in temperature cause understory trees to leaf out earlier. *New Phytol.* 198, 149–155. doi.org/10.1111/Nph.12130
- 19 Wohlgenuth T., M. Kistler, C. Aymon, F. Hagedorn, A. Gessler, M. M. Gossner, V. Queloz, I. Vöggtli, U. Wasem, Y. Vitasse, A. Rigling (2020) Früher Laubfall der Buche während der Sommertrockenheit 2018: Resistenz oder Schwächesympptom? *Schweiz. Z. Forstwesen*, 171, 257–269. doi.org/10.3188/zzf.2020.0257
- 20 www.wsl.ch/fr/projets/plantations-experimentales.html
- 21 sciencesnaturelles.ch/seasons-explained
- 22 www.bioactualites.ch/cultures/arboriculture-bio/protection-des-plantes/bulletins-phytosanitaires.html
- 23 www.agrometeo.ch, www.bioactualites.ch/cultures/arboriculture-bio/protection-des-plantes/pronostics/prognostic-tavelure.html
- 24 Walther G. R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. J. C. Beebee, J.-M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg, F. Bairlein (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389–395. doi.org/10.1038/416389a
- 25 Root T. L., J. T. Price, K. R. Hall, S. H. Schneider, C. Rosenzweig, J. A. Pounds (2003) Fingerprints of global warming on wild animals and plants, *Nature*, 421, 57–60.
- 26 Stoeckli S., R. Felber, T. Haye (2020) Current distribution and voltinism of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, in Switzerland and its response to climate change using a high-resolution CLIMEX model, *Int. J. Biometeorol.*, 64, 2019–2032. doi.org/10.1007/s00484-020-01992-z
- 27 Stoeckli S., M. Hirschi, C. Spirig, P.L. Calanca, M.W. Rotach, J. Samietz (2012) Impact of Climate Change on Voltinism and Prospective Diapause Induction of a Global Pest Insect – *Cydia pomonella* (L.), *PLoS ONE*, 7, e35723. doi.org/10.1371/journal.pone.0035723
- 28 Essl F., W. Rabitsch (2013) Biodiversität und Klimawandel: Auswirkungen und Handlungsoptionen für den Naturschutz in Mitteleuropa, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- 29 Parmesan C. (2007) Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Global Change Biol.*, 13, 1860–1872.
- 30 Tylianakis, J. M., R. K. Didham, J. Bascompte, D. A. Wardle (2008) Global change and species interactions in terrestrial ecosystems, *Ecol. Letters*, 11, 1351–1363.
- 31 Biesmeijer, J. C., S. P. M. Roberts, M. Reemer, R. Ohlemüller, M. Edwards, T. Peeters, A. P. Schaffers, S. G. Potts, R. Kleukers, C. D. Thomas, J. Settele, W. E. Kunin (2006) Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands, *Science*, 313, 351–354.
- 32 Potts, S. G., J. C. Biesmeijer, C. Kremen, P. Neumann, O. Schweiger, W. E. Kunin (2010) Global pollinator declines: trends, impacts and drivers, *Trends in Ecology & Evolution*, 25, 345–353.
- 33 Naef-Daenzer, B., J. Luterbacher, M. Nuber, T. Rutishauser, W. Winkel (2012) Cascading climate effects and related ecological consequences during past centuries, *Clim. Past*, 8, 1527–1540. www.clim-past.net/8/1527/2012/
- 34 www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/le-nccs/themes-prioritaires/organismes-nuisibles-agriculture.html
- 35 Grant, E. (1996) *The Foundations of Modern Science in the Middle Ages: Their Religious, Institutional, and Intellectual Contexts*. Cambridge University Press.
- 36 Wegmann, M. (2005) *Naturwahrnehmung im Mittelalter im Spiegel der lateinischen Historiographie des 12. und 13. Jahrhunderts*. Lateinische Sprache und Literatur des Mittelalters, Band 40, Peter Lang, Bern.
- 37 Pfister, C. (1999) *Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496–1995)*, Bern, Haupt.
- 38 Wetter, O., C. Pfister (2014) Eine tragfähige Datenbrücke – Phänologische Beobachtungen im Amtsblatt des Kantons Schaffhausen 1876–1950, *Bauhinia*, 25, 69–85.
- 39 Pfister, C., C. Rohr, www.euroclimhist.unibe.ch/fr/
- 40 Labbé, T., C. Pfister, S. Brönnimann, D. Rousseau, J. Franke, B. Bois (2019) The longest homogeneous series of grape harvest dates, Beaune 1354–2018, and its significance for the understanding of past and present climate, *Clim. Past*, 15, 1485–1501. doi.org/10.5194/cp-15-1485-2019
- 41 Chuine, I., P. Yiu, N. Viovy, B. Seguin, V. Daux, E. Le Roy Ladurie (2004) Grape ripening as a past climate indicator, *Nature*, 432, 89–290.
- 42 Labbé, T., F. Gaveau (2013) Les dates de vendange à Beaune (1371–2010). Analyse et données d'une nouvelle série vendémiologique, *Rev. Historique*, 666, 333–367.
- 43 Wetter, O., C. Pfister, J. P. Werner, E. Zorita, S. Wagner, S. Seneviratne, J. Herget, U. Grünewald, J. Luterbacher, M. J. Alcoforado, M. Barriados, U. Bieber, R. Brázdil, K. H. Burmeister, C. Camenisch, A. Contino, P. Dobrovolný, R. Glaser, I. Himmelsbach, A. Kiss, O. Kotyza, T. Labbé, D. Limanówka, L. Lützenburger, Ø. Nordli, K. Pribyl, D. Retsö, D. Riemann, C. Rohr, W. Siegfried, J. Söderberg, J. L. Spring (2014) The year-long unprecedented European heat and drought of 1540 – a worst case, *Clim. Change*, 125, 349–363. doi.org/10.1007/s10584-014-1184-2
- 44 Camenisch, C., R. Brázdil, A. Kiss, C. Pfister, O. Wetter, C. Rohr, A. Contino, D. Retsö (2020) Extreme heat and drought in 1473 and their impacts in Europe in the context of the early 1470s. *Reg. Environ. Change*, 20, 19. doi.org/10.1007/s10113-020-01601-0
- 45 Hannah, L., P. R. Roehrdanz, M. Ikegami, A. V. Shepard, M. R. Shaw, G. Tabor, L. Zhi, P. A. Marquet, R. J. Hijmans (2013) Climate change, wine, and conservation, *Proc. Natl. Acad. Sciences*, 110, 6907–6912. doi.org/10.1073/pnas.1210127110

- 46 Frei C. (2014) Interpolation of temperature in a mountainous region using non-linear profiles and non-Euclidean distances, *Int. J. Climatol.*, 34, 1585–1605. doi.org/10.1002/joc.3786
- 47 Pfister L., S. Brönnimann, M. Schwander, F. A. Isotta, P. Horton, C. Rohr (2020) Statistical Reconstruction of Daily Precipitation and Temperature Fields in Switzerland back to 1864, *Clim. Past*, 16, 663–678. doi.org/10.5194/cp-16-663-2020
- 48 CH2018 (2018), CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0.
- 49 Zubler E. M., S. C. Scherrer, M. Croci-Maspoli, M. A. Liniger, C. Appenzeller (2014) Key climate indices in Switzerland; expected changes in a future climate, *Clim. Change*, 123, 2, 255–271.
- 50 Molitor D., A. Caffarra, P. Sinigoj, I. Pertot, L. Hoffmann, J. Junk (2014) Late frost damage risk for viticulture under future climate conditions: A case study for the Luxembourgish wine-growing region, *Austr. J. Grape Wine Res.*, 20, 160-168.
- 51 Mosedale J. R., R. J. Wilson, I. M. D. Maclean (2015) Climate Change and Crop Exposure to Adverse Weather: Changes to Frost Risk and Grapevine Flowering Conditions, *PLoS One*, 10, e0141218.
- 52 OFAG (2018) L'année viticole 2017 in: OFAG (Ed.), Statistiques vitivinicoles. OFAG, Berne.
- 53 Heslot N., D. Akdemir, M. E. Sorrells, J.-L. Jannink (2014) Integrating environmental covariates and crop modeling into the genomic selection framework to predict genotype by environment interactions, *Theoretical and Applied Genetics*, 127, 463-480.
- 54 Hawker J., C. Jenner (1993) High Temperature Affects the Activity of Enzymes in the Committed Pathway of Starch Synthesis in Developing Wheat Endosperm, *Functional Plant Biology*, 20, 197-209.
- 55 Luo Q. (2011) Temperature thresholds and crop production: a review, *Clim. Change*, 109, 583-598.
- 56 Peltonen-Sainio P., L. Jauhiainen, K. Hakala (2011) Crop responses to temperature and precipitation according to long-term multi-location trials at high-latitude conditions, *J. Agric. Science*, 149, 49-62.
- 57 Porter J. R., M. Gawith (1999) Temperatures and the growth and development of wheat: a review, *Europ. J. Agronomy*, 10, 23-36.
- 58 Prasad P. V. V., D. Maduraimuthu (2014) Response of floret fertility and individual grain weight of wheat to high temperature stress: Sensitive stages and thresholds for temperature and duration, *Functional Plant Biol.*, 41, 1261.
- 59 Barnabas B., K. Jager, A. Feher (2008) The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant Cell Environ.*, 31, 11-38.
- 60 Wollenweber B., J. R. Porter, J. Schellberg (2003) Lack of Interaction between Extreme High-Temperature Events at Vegetative and Reproductive Growth Stages in Wheat, *J. Agron. Crop Sci.*, 189, 142-150.
- 61 Draeger T., G. Moore (2017) Short periods of high temperature during meiosis prevent normal meiotic progression and reduce grain number in hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.), *Theor. Appl. Genet.*, 130, 1785–1800.
- 62 Gate P. (1995) *Écophysologie du blé*, Technique & Documentation – Lavoisier, Paris.
- 63 Lancashire P. D., H. Bleiholder, T. van den Boom, P. Langelüddeke, R. Stauss, E. Weber, A. Witzinger (1991) A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds, *Annals of Applied Biology*, 119, 561-601.
- 64 Schürch C., L. Kronenberg, A. Hund (2018) Wheat Developmental Stages, commons.wikimedia.org/wiki/File:Wheat_developmental_stages.tif (zugegriffen 22. November 2020).
- 65 Braun H. J., S. Rajaram, M. van Ginkel (1997) CIMMYT's approach to breeding for wide adaptation, in: Tigerstedt P. M. A. (Hrsg) *Adaptation in Plant Breeding*. Developments in Plant Breeding, 4, 197-205.
- 66 Royo C., G. Briceño-Felix (2011) Wheat breeding in Spain, in: *The World Wheat Book: A History of Wheat Breeding* 2, 121-154.
- 67 Sonder K. (2018) Global map of wheat mega-environments, data.cimmyt.org/dataset.xhtml?persistentId=hdl:11529/10625 (zugegriffen 22. November 2020).
- 68 Wechselweizen ist ein Sommerweizen mit höherer Frosttoleranz und vergleichsweise geringem Vernalisationsanspruch, d.h. nur einer geringen « Kältebedürftigkeit » zur Blüteninduktion.
- 69 Evans L. T., R. A. Fischer (1999) Yield Potential: Its Definition, Measurement, and Significance, *Crop Science*, 39, 1544-1551.
- 70 Liu Y., Q. Chen, Q. Ge, J. Dai, Y. Dou (2018) Effects of climate change and agronomic practice on changes in wheat phenology, *Clim. Change*, 150, 273-287.
- 71 Dias A. S., F. C. Lidon (2009) Evaluation of Grain Filling Rate and Duration in Bread and Durum Wheat, under Heat Stress after Anthesis, *J. Agron. Crop Sci.*, 195, 137-147.
- 72 Rezaei E. E., S. Siebert, H. Hüging, F. Ewert (2018) Climate change effect on wheat phenology depends on cultivar change, *Scientific Reports*, 8, 4891.
- 73 Mäkinen H., J. Kaseva, M. Trnka, J. Balek, K. C. Kersebaum, C. Nendel, A. Gobin, J. E. Olesen, M. Bindi, R. Ferrise, M. Moriondo, A. Rodríguez, M. Ruiz-Ramos, J. Takáč, P. Bezák, D. Ventrella, F. Ruget, G. Capellades, H. Kahiluoto (2018) Sensitivity of European wheat to extreme weather, *Field Crops Research*, 222, 209-217.
- 74 Vitasse Y., M. Rebetez (2018) Unprecedented risk of spring frost damage in Switzerland and Germany in 2017. *Clim. Change*, 149, 233-246. doi.org/10.1007/s10584-018-2234-y
- 75 Wolpert J. A., G. S. Howell (1985) Cold Acclimation of Concord Grapevines. I. Variation in Cold Hardiness Within the Canopy, *Am. J. Enology and Viticul.*, 36, 185-188.
- 76 Ma Q. Q., J. G. Huang, H. Hänninen, F. Berninger (2019) Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming, *Global Change Biol.*, 25, 351-360.
- 77 Augspurger C. K. (2013) Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing, *Ecology*, 94, 41-50.
- 78 Meier M., J. Fuhrer, A. Holzkämper (2018) Changing risk of spring frost damage in grapevines due to climate change? A case study in the Swiss Rhone Valley, *Int. J. Biometeorol.*, 62, 991-1002.
- 79 Hoffmann H., T. Rath (2013) Future Bloom and Blossom Frost Risk for *Malus domestica* Considering Climate Model and Impact Model Uncertainties, *PLOS ONE* 8, e75033.
- 80 Pflieger P., I. Menke, C.-F. Schlessner (2019) Increasing risks of apple tree frost damage under climate change, *Clim. Change*, 157, 515–525.
- 81 Jeanneret F. (1975) Die Verteilung der Spätfrostschäden in der Schweiz im Frühling 1974, *Informationen und Beiträge zur Klimaforschung*, 13, 1–14.
- 82 Weingartner R., H. Aschwanden (1992) Régimes d'écoulement comme base pour l'estimation des valeurs moyennes des débits, *Atlas hydrologique de la Suisse*, Planche 5.2.
- 83 HADES. www.hydromaps.ch.
- 84 Muelchi R., O. Rössler, J. Schwanbeck, R. Weingartner, O. Martius (2021) Future runoff regime changes and their time of emergence for 93 catchments in Switzerland. *Hydro. Earth Syst. Sci. Discuss.* doi.org/10.5194/hess-2020-516
- Muelchi R., O. Rössler, J. Schwanbeck, R. Weingartner, O. Martius (2020) An ensemble of daily simulated runoff data (1981–2099) under climate change conditions for 93 catchments in Switzerland (Hydro-CH2018-Runoff ensemble), Geoscientific Model Development. doi.org/10.5281/zenodo.3937485
- 85 Données provenant de Helbling A., C. Kan, P. Marti (2007) Etiages – débits moyens minimaux sur plusieurs jours, *Atlas hydrologique de la Suisse*, Planche 5.11.
- 86 Florianci M. (2019) Charakterisierung von Niedrigwasserregimen – Auswertung und Gegenüberstellung von Abflussdatenreihen und Niederschlagsdaten. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt.
- 87 Diezig R. (2006) Hochwassertypen in der Schweiz. Diplomarbeit, Universität Bern.
- 88 Wipf S., V. Stoeckli, P. Bebi (2009) Winter climate change in alpine tundra: plant responses to changes in snow depth and snowmelt timing, *Clim. Change*, 94, 105–121. doi.org/10.1007/s10584-009-9546-x
- 89 Scherrer S. C., P. Ceppi, M. Croci-Maspoli, C. Appenzeller (2012) Snow-albedo feedback and Swiss spring temperature trends, *Theor. Appl. Climatol.*, 110, 509–516. doi.org/10.1007/s00704-012-0712-0
- 90 Rogora M. (2018) Assessment of climate change effects on mountain ecosystems through a cross-site analysis in the Alps and Apennines, *Sci. Total Environ.*, 624, 1429–1442. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.155
- 91 Viterbi R., S. Imperio, D. Alpe, V. Bosser-Peverelli, A. Provenzale (2015) Climatic control and population dynamics of black grouse (*Tetrao tetrix*) in the Western Italian Alps, *J. Wildlife Management*, 79, 156–166. doi.org/10.1002/jwmg.810
- 92 Resano-Mayor J. (2019) Snow cover phenology is the main driver of foraging habitat selection for a high-alpine passerine during breeding: implications for species persistence in the face of climate change, *Biodivers. Conserv.*, 28, 2669–2685. doi.org/10.1007/s10531-019-01786-9
- 93 Zhang Y. et al. (2015) The impact of the cognition of landscape experience on tourist environmental conservation behaviors, *J. Mt. Sci.*, 12, 501–517. doi.org/10.1007/s11629-014-3150-x.
- 94 Maurer J. (1909) *Das Klima der Schweiz*. Erster Band.

- 95 Buchmann M. (2016) Changes of snow onset and disappearance dates during the last 60 years in the Swiss Alps. Master Thesis in Environmental Sciences, ETH Zürich.
- 96 Klein G., Y. Vitasse, C. Rixen, C. Marty, M. Rebetez (2016) Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset, *Clim. Change*, 139, 637–649. doi.org/10.1007/s10584-016-1806-y
- 97 Schmucki E., C. Marty, C. Fierz, R. Weingartner, M. Lehning (2017) Impact of climate change in Switzerland on socioeconomic snow indices, *Theor. Appl. Climatol.*, 127, 875–889. doi.org/10.1007/s00704-015-1676-7
- 98 Verfaillie D., M. Lafaysse, M. Déqué, N. Eckert, Y. Lejeune, S. Morin (2018) Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps, *The Cryosphere*, 12, 1249–1271. doi.org/10.5194/tc-12-1249-2018.
- 99 Begert M., T. Schlegel, W. Kirchhofer (2005) Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000, *Int. J. Climatol.*, 25, 65–80. doi.org/10.1002/joc.1118
- 100 Scherrer S. C., M. Begert, M. Croci-Maspoli, C. Appenzeller (2016) Long series of Swiss seasonal precipitation: regionalization, trends and influence of large-scale flow, *Int. J. Climatol.*, 36, 3673–3689. doi.org/10.1002/joc.4584

Illustrations

Couverture : Barbara Pietragalla (en haut); Südtiroler Beratungsring für Obst- und Weinbau (en bas)

Avant-propos : Stefan Brönnimann

Fig. 1 : Yann Vitasse

Fig. 2 : Stefan Brönnimann

Fig. 3 : MétéoSuisse

Fig. 4 : Stefan Brönnimann

Fig. 5 : BernClim

Fig. 6 : MétéoSuisse

Fig. 7 : MétéoSuisse

Fig. 8 : voir note bibliographique 15

Fig. 8.1 : Barbara Pietragalla

Fig. 9 : Yann Vitasse

Fig. 10 : Frederik Baumgarten

Fig. 11 : Yann Vitasse

Fig. 12 : Andreas Rigling

Fig. 13 : Urs Weber

Fig. 14 : Frederik Baumgarten

Fig. 15 : Stefan Brönnimann

Fig. 16 : Regula Gehrig

Fig. 17 : <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Datei:Fruehlingsergebnisse.gif>

Fig. 18 : Station ornithologique Sempach

Fig. 19 : Sibylle Studer

Fig. 19.1 : Pixabay/Jerzy Górecki

Fig. 20 : Christian Pfister

Fig. 21 : Christian Pfister

Fig. 22 : Foto Christian Pfister

Fig. 23 : Christian Pfister

Fig. 24 : Maulaff / Wikimedia Commons, CC-BY-SA 4.0

Fig. 25 : Nightstallion / Wikimedia Commons, S. Egts

Fig. 26 : Stefan Brönnimann

Fig. 27 : Stefan Brönnimann

Fig. 28 : pxhere, CC0

Fig. 29 : modifiée, note bibliographique 64

Fig. 30 : Centre d'expertise pour la fruiticulture et viticulture du Tyrol du Sud

Fig. 31 : Peter Orlando Prange

Fig. 32 : Stefan Brönnimann

Fig. 33 : Springer Nature, CC-BY

Fig. 34 : François Jeanneret

Fig. 35 : Rolf Weingartner

Fig. 36 : Rolf Weingartner

Fig. 37 : note bibliographique 82

Fig. 38 : Modélisation : Regula Mülchi

Fig. 39 : Rolf Weingartner avec données de 85

Fig. 40 : Robert Diezig

Fig. 41 : Moritz Buchmann

Fig. 42 : Moritz Buchmann

Fig. 43 : note bibliographique 97

Fig. 44 : Peter Bangerter

Auteurs

Frederik Baumgarten, Écologie des écosystèmes, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL. frederik.baumgarten@wsl.ch

Stefan Brönnimann, Institut de Géographie et Oeschger Centre for Climate Change Research, Université de Berne. stefan.broennimann@giub.unibe.ch

Moritz Buchmann, WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF et Oeschger Centre for Climate Change Research, Université de Berne. moritz.buchmann@slf.ch

Dario Fossati, Amélioration des grandes cultures et ressources génétiques, Agroscope. dario.fossati@agroscope.admin.ch

Regula Gehrig, Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse. regula.gehrig@meteoswiss.ch

Annelie Holzkämper, Climat et agriculture, Agroscope, Oeschger Centre for Climate Change Research, Université de Berne annelie.holzkaemper@agroscope.admin.ch

Andreas Hund, Sciences agraires, ETH Zürich. andreas.hund@usys.ethz.ch

Michael Meier, Écologie forestière, ETH Zürich. michael.meier@usys.ethz.ch

Barbara Pietragalla, Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse. barbara.pietragalla@meteoswiss.ch

Christian Pfister, Institut d'histoire et Oeschger Centre for Climate Change Research, Université de Berne. christian.pfister@hist.unibe.ch

This Rutishauser, Institut de Géographie et Oeschger Centre for Climate Change Research, Université de Berne. this@kontextlabor.ch

Sibylle Stöckli, Département des sciences économiques & sociales, Groupe Durabilité, Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL. sibylle.stoeckli@fibl.org

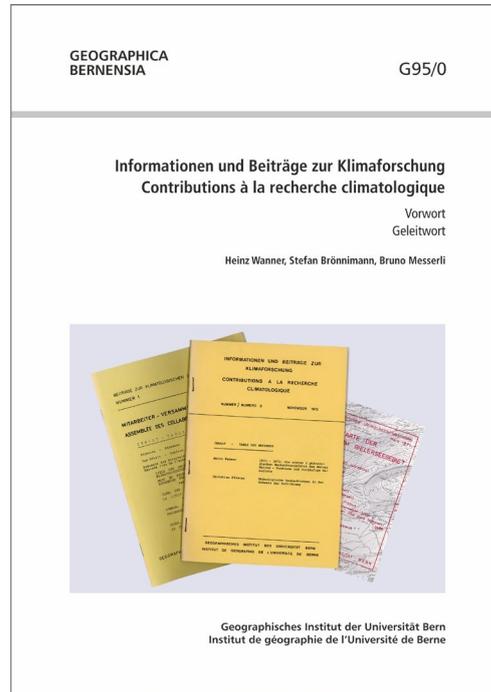
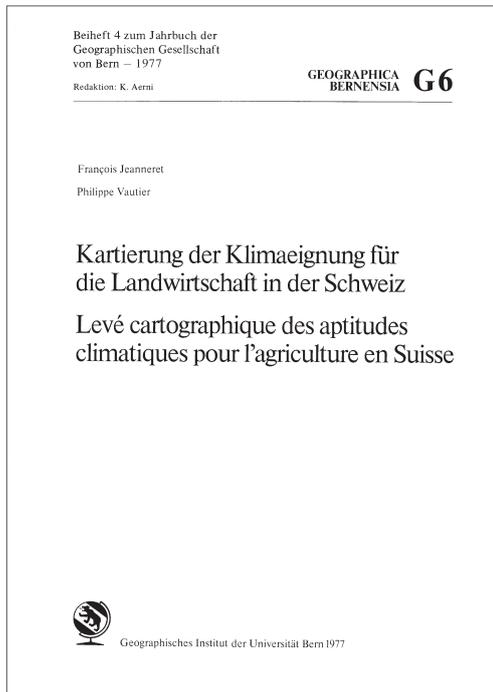
Yann Vitasse, Écologie des écosystèmes, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL. yann.vitasse@wsl.ch

Rolf Weingartner, Institut de Géographie et Oeschger Centre for Climate Change Research, Université de Berne. rolf.weingartner@giub.unibe.ch

GEOGRAPHICA BERNENSIA

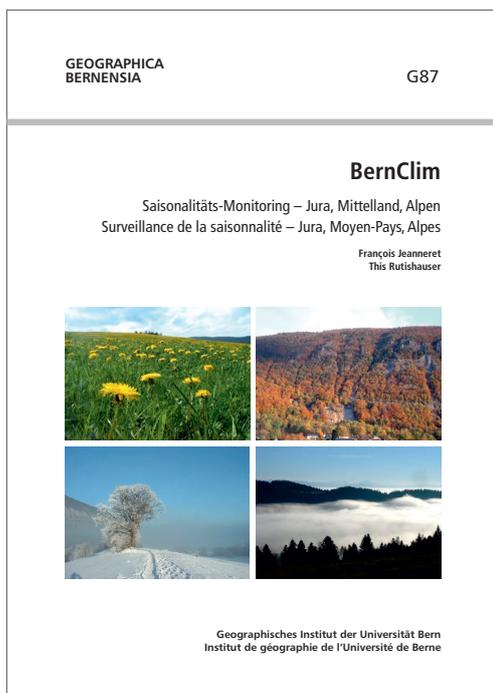
Publications en ligne et en Open Access :

www.geography.unibe.ch/dienstleistungen/geographica_bernensia/digitale_publicationen/

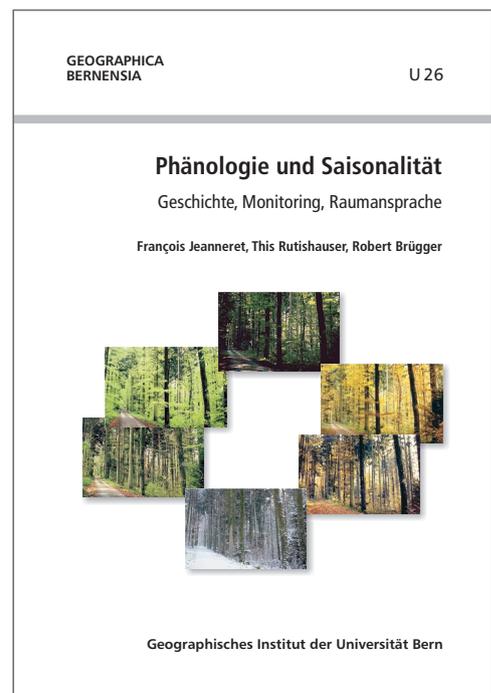


Jeanneret F., Vautier P., Aerni K. 1977. Kartierung der Klimaeignung für die Landwirtschaft in der Schweiz / Levé cartographique des aptitudes climatiques pour l'agriculture en Suisse. Geographica Bernensia G6, doi: [10.4480/GB2020.G6](https://doi.org/10.4480/GB2020.G6)

Informationen und Beiträge zur Klimaforschung/Contributions à la recherche climatologique / Titel 1970 und 1971: Beiträge zur Klimatologischen Grundlagenforschung/Matériaux pour la recherche des bases climatiques. Geographica Bernensia G95.



Jeanneret F., Rutishauser, T. 2018. BernClim. Saisonalität-Monitoring – Jura, Mittelland, Alpen / Surveillance de la saisonnalité – Jura, Moyen Pays, Alpes. Geographica Bernensia G 87. doi: [10.4480/GB2018.G87](https://doi.org/10.4480/GB2018.G87)



Jeanneret F., Rutishauser T., Brügger R. (2018). Phänologie und Saisonalität. Geschichte, Monitoring, Raumsprache. Geographica Bernensia U 26. doi: [10.4480/GB2018.U26](https://doi.org/10.4480/GB2018.U26)

