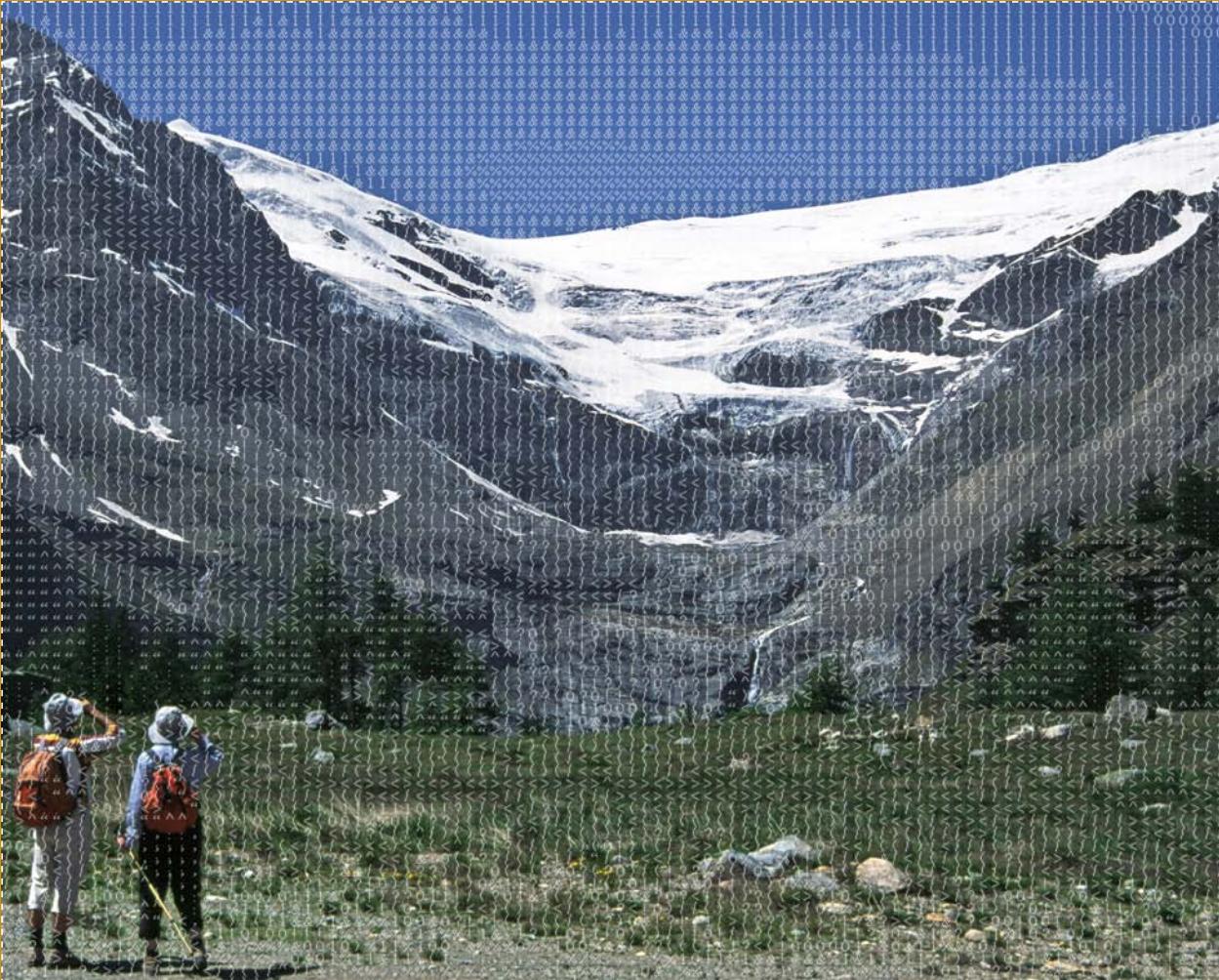


→ Changements climatiques en Suisse

Indicateurs des causes, des effets et des mesures



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

Office fédéral de météorologie et de climatologie
MétéoSuisse

→ Changements climatiques en Suisse

Indicateurs des causes, des effets et des mesures

Publié par l'Office fédéral de l'environnement OFEV et par
l'Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse
Berne, 2013

Impressum

Editeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse)

MétéoSuisse est un office du Département fédéral de l'intérieur (DFI).

Direction de projet

Marjorie Perroud et Mischa Croci-Maspoli

Auteurs

Marjorie Perroud et Stephan Bader

Contributions de collaborateurs

Office fédéral de l'environnement,

division Climat: Thomas Bucheli, Paul Filliger, Isabel Junker, Roger Nufer,

Regine Röthlisberger, Andreas Schellenberger, Simone von Felten

division Eaux: Hugo Aschwanden

division Espèces, écosystèmes et paysages: Gian-Reto Walther

division Forêts: Sabine Augustin, Paolo Camin

division Hydrologie: Vanessa Aellen, Ronald Kozel, Petra Schmocker, Marc Schürch

Office fédéral de météorologie et de climatologie,

division Climat: Regula Gehrig, Simon Scherrer, Mischa Croci-Maspoli,

Christof Appenzeller, Heike Kunz, Thomas Schlegel, Christoph Spirig, Mark Liniger

division Données à la surface: Thomas Herren

Office fédéral de l'agriculture: Andreas Schild

Station ornithologique suisse: Niklaus Zbinden

Université de Neuchâtel, Parasitologie: Lise Gern

Université de Zürich, Glaciology, Geomorphodynamics & Geochronology:

Jeannette Nötzli

Contribution externe: Isabel Dietrich

Référence bibliographique

Perroud M. et Bader S. 2013: Changements climatiques en Suisse –

Indicateurs des causes, des effets et des mesures. Etat de

l'environnement n° 1308. Office fédéral de l'environnement, Berne, et

Office fédéral de météorologie et de climatologie, Zurich, 86 p.

Traduction

Dominique Berthet Alcaraz, Jacqueline Dougoud et Service linguistique de l'OFEV

Graphisme, mise en page

upart, Berne, Laurence Rickett

Photo de couverture

Glacier du Palü dans le massif de la Bernina, © E. Ammon, AURA

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch/uz-1308-f

(il n'existe pas de version imprimée)

Cette publication est également disponible en allemand.

> Abstracts	5	3.3.7 Chutes de neige et couverture neigeuse	38	
> Avant-propos	7	3.3.8 Limite du zéro degré	39	
> Résumé	9	3.3.9 Durée d'ensoleillement	39	
<hr/>				
1	Introduction	10	3.4 Impacts du climat sur l'environnement naturel	42
1.1	Observations des modifications du climat	10	et l'homme	42
1.2	Scénarios climatiques pour la Suisse	10	3.4.1 Hydrosphère	42
1.3	Effets des changements climatiques	11	3.4.2 Cryosphère	48
<hr/>				
2	Evolution du climat: liens de causalité	13	3.4.3 Végétation et forêt	51
2.1	Le modèle DPSIR	13	3.4.4 Le monde animal	57
2.2	Les indicateurs du climat	13	3.4.5 Société et économie	58
<hr/>				
3	Les changements climatiques en Suisse: des causes aux mesures	15	3.5 Mesures de réduction des émissions	62
3.1	Sources d'émission de gaz à effet de serre	15	3.5.1 Aperçu des mesures de réduction des émissions	62
3.1.1	Le secteur des transports	15	3.5.2 Bases légales	62
3.1.2	Le secteur des ménages	17	3.5.3 Consommation et émissions de CO ₂ des voitures neuves	66
3.1.3	Le secteur de l'industrie	19	3.5.4 Mesures dans le domaine des bâtiments	68
3.1.4	Le secteur des services	20	3.5.5 Evolution des nouvelles énergies renouvelables	69
3.1.5	Le secteur de l'agriculture	20	3.6 Mesures d'adaptation aux changements climatiques	72
3.1.6	Le secteur des déchets	22	3.6.1 Adaptation aux événements naturels extrêmes	72
3.1.7	Sources et puits de gaz à effet de serre d'origine non fossile	23	3.6.2 Utilisation d'installations d'enneigement dans les domaines skiables	73
3.2	Charges en gaz à effet de serre	25	3.6.3 Surface agricole utile irriguée	74
3.2.1	Evolution des émissions de gaz à effet de serre par gaz et par secteur	25	3.6.4 Gestion des eaux	76
3.2.2	Intensité des gaz à effet de serre	26	3.6.5 Adaptation de la gestion sylvicole	77
3.2.3	Emissions de la Suisse en comparaison internationale	27	<hr/>	
3.2.4	Emissions de CO ₂ dues à la consommation et à la production en Suisse	29	4 Conclusion	79
3.3	Evolution du climat en Suisse	30	<hr/>	
3.3.1	Evolution des températures	30	> Notes de bas de page	80
3.3.2	Températures journalières maximales et minimales	32	> Bibliographie	82
3.3.3	Jours de canicule et de gel, nuits tropicales et jours de dégel	33		
3.3.4	Evolution des précipitations	34		
3.3.5	Fortes précipitations	37		
3.3.6	Périodes de sécheresse	37		

The global climate is changing and, as confirmed by various environmental indicators associated with climate change, Switzerland is particularly affected. With the help of selected examples, this report illustrates the evolution of the climate and its impacts on the cryosphere, hydrosphere, vegetation, health, economy and society. It also indicates the pressure exerted by human activities on the climate and quantifies the resulting greenhouse gas emissions. The main political responses formulated to limit the environmental impacts of climate change and to prevent undesirable developments are also explained.

Das Klima der Erde verändert sich, und die Schweiz ist davon besonders betroffen. Das bezeugen diverse Umweltindikatoren, die mit der Klimaerwärmung in Verbindung gebracht werden. Dieser Bericht illustriert anhand einiger ausgewählter Beispiele die Klimaentwicklung sowie deren Auswirkungen auf die Kryosphäre, die Hydrosphäre, die Vegetation, die Gesundheit, die Wirtschaft und die Gesellschaft. Außerdem wird dargelegt, welchen Druck die menschlichen Aktivitäten auf das Klima ausüben und wie gross die Mengen der daraus resultierenden Treibhausgase sind. Des Weiteren enthält dieser Bericht die wichtigsten politischen Antworten zur Begrenzung der Auswirkungen auf die Umwelt und zur Vorbeugung unerwünschter Entwicklungen.

Le climat de la Terre se modifie et la Suisse est particulièrement touchée, c'est ce qu'attestent différents indicateurs environnementaux mis en lien avec le réchauffement climatique. Ce rapport illustre ainsi à l'aide de quelques exemples choisis l'évolution du climat et ses impacts sur la cryosphère, l'hydrosphère, la végétation, la santé, l'économie ou la société. Il indique également quelle est la pression exercée par les activités humaines sur le climat et quantifie les émissions de gaz à effet de serre qui en résultent. Les principales réponses politiques apportées pour limiter les impacts environnementaux et prévenir les évolutions indésirables sont exposées.

Il clima della Terra sta cambiando e la Svizzera è particolarmente interessata da tale fenomeno. È quanto confermano numerosi indicatori ambientali correlati al riscaldamento climatico. Sulla base di alcuni esempi, il presente rapporto illustra l'evoluzione del clima e i suoi impatti su criosfera, idrosfera, vegetazione, salute, economia o società. Indica altresì qual è la pressione esercitata sul clima dalle attività antropiche e quantifica le emissioni di gas serra che ne conseguono. Infine, passa in rassegna le principali risposte date dalla politica per limitare gli impatti ambientali e prevenire sviluppi indesiderati.

Keywords:

Climate change, global warming, climate policy, impacts, adaptation, indicator, Switzerland

Stichwörter:

Klimawandel, Klimaänderung, globale Erwärmung, Klimapolitik, Auswirkungen, Anpassung, Indikator, Schweiz

Mots-clés:

changements climatiques, réchauffement global, politique climatique, effets, adaptation, indicateur, Suisse

Parole chiave:

cambiamenti climatici, riscaldamento globale, politica climatica, effetti, adattamento, indicatore, Svizzera

La sensibilité de l'environnement à des températures plus élevées n'est pas une notion inconnue en Suisse. De nombreux documents relatent des phases de recul encore plus avancées de nos glaciers alpins par le passé. Toutefois la rapidité à laquelle des changements interviennent dans l'environnement depuis quelques décennies et la variété de domaines qui ont désormais à subir les impacts des anomalies du temps atteignent une ampleur inconnue jusqu'à présent. Ces modifications subtiles, souvent irréversibles, qui se sont instaurées, ont une incidence toujours plus grande sur notre vie quotidienne, d'une ampleur sans doute sous-estimée. A la source de cette problématique planétaire, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat met en avant les concentrations actuelles de gaz à effet de serre dans l'atmosphère provenant des activités humaines.

Avec l'accroissement de la population mondiale et pour satisfaire à des besoins énergétiques grandissants, la hausse des émissions de gaz à effet de serre va se poursuivre si aucune mesure n'est mise en place pour y remédier. De plus, la durée de vie de ces gaz étant généralement de plusieurs décennies, la poursuite des changements climatiques devient une évidence, inévitable. Fort heureusement, une prise de conscience tant individuelle, qu'économique et politique des effets apparents et des impacts potentiels des changements climatiques s'est opérée à l'échelle mondiale ces dernières années. Aujourd'hui, l'urgence d'une action coordonnée au plan international n'est plus contestée et de nombreuses initiatives visant à protéger le climat sont mises en œuvre.

Consciente des enjeux et concernée par ces préoccupations mondiales, la Suisse s'est lancée dans une politique énergétique et climatique durable, se focalisant sur une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Depuis peu, la politique climatique suisse s'oriente également vers un autre type de défi. Des solutions politiques innovantes, qui complètent les conditions générales existantes, sont apportées pour s'adapter aux conséquences des changements climatiques. Afin d'effectuer les adaptations économiques et politiques appropriées, il est impératif que les conséquences néfastes de ces changements soient décelées suffisamment tôt et que l'efficacité des mesures prises et à envisager soit évaluée. En portant un regard aiguisé sur les effets insidieux et à long terme des modifications du climat, ce rapport confirme non seulement la réalité des effets climatiques, mais donne une direction pour la poursuite des actions à entreprendre.

Bruno Oberle
Directeur
Office fédéral de l'environnement
(OFEV)

Christian Plüss
Directeur
Office fédéral de météorologie et
de climatologie (MétéoSuisse)

Sur Terre, le climat n'est pas statique et change à de multiples reprises sur le long terme, variant entre périodes extrêmement chaudes et phases de glaciation. Pendant ces périodes, les conditions météorologiques présentent une grande variabilité naturelle et tous les caprices du temps ne doivent ainsi pas être nécessairement interprétés comme un indice de changement climatique. Depuis la fin de la dernière période glaciaire, il y a 10000 ans, le climat a changé. Cependant, on constate depuis trois à quatre décennies une forte augmentation des températures. Cette période est considérée par la climatologie comme étant suffisamment longue pour pouvoir la différencier des événements météorologiques de courte durée. Les oscillations et les changements dans les données météorologiques mesurées montrent ainsi que le climat actuel est différent de celui du début du XX^e siècle, mais aussi que le changement de l'un à l'autre a été d'une extrême rapidité. A la différence des précédents épisodes, la variabilité naturelle du climat ne suffit pas à expliquer cette brusque transition. Le climat chaud subi depuis trois à quatre décennies est dès lors imputé aux effets anthropiques, postulat que l'on ne conteste d'ailleurs plus.

En Suisse, l'effet des activités humaines sur le climat est, dans une très large mesure, dicté par les quantités de dioxyde de carbone émises pour répondre aux besoins en énergie. Cette pression environnementale a démarré dans les années 1950, principalement en raison de l'explosion du trafic routier et de la forte croissance économique. Depuis 1980, la somme totale des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et des autres gaz à effet de serre, semble toutefois s'être stabilisée dans le pays. Actuellement, le trafic reste le principal secteur responsable des émissions de CO₂, tandis que la digestion des animaux de rente et l'utilisation des engrains causent l'essentiel des émissions de deux autres gaz à effet de serre, le protoxyde d'azote et le méthane.

Le dérèglement climatique planétaire qui résulte des émissions anthropiques est aussi ressenti en Suisse. La température annuelle moyenne s'est élevée de 1,7 °C entre 1864, date du début des mesures, et 2011. Par rapport aux terres émergées de l'hémisphère nord, la hausse de température est plus marquée de 0,6 °C en Suisse. L'augmentation du nombre de jours de canicule ou de nuits tropicales ou encore la diminution de la couverture neigeuse sur le Plateau attestent également de cette évolution. En revanche, aucun changement significatif n'est visible en ce qui concerne les précipitations.

La modification du climat que l'on observe en Suisse depuis quelques décennies n'est pas restée sans conséquences pour les biens naturels. Le recul des glaciers et la fonte du pergélisol illustrent souvent les impacts directs liés à ce phé-

nomène, mais les effets négatifs s'étendent à bien d'autres milieux encore. Les lacs et les rivières se réchauffent, leur dynamique change, la date de certaines étapes phénologiques avance, des espèces végétales alpines ou du Plateau migrent, tandis que pour certaines espèces d'oiseaux, c'est l'aire de distribution qui évolue.

Afin de répondre aux préoccupations actuelles en matière de climat, la Suisse a ratifié le Protocole de Kyoto en été 2003, s'engageant de ce fait dans un processus d'envergure mondiale de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Son objectif est de parvenir à une baisse de 8 % de la somme totale des émissions de gaz à effet de serre sur la période 2008–2012 par rapport à 1990 (en prenant en compte les puits de carbone et l'acquisition de certificats de réduction des émissions étrangers). Afin d'y parvenir, le pays a adopté la loi sur le CO₂ qui prévoit une réduction de 10 % des émissions de CO₂ dues à l'utilisation énergétique des carburants et combustibles fossiles. Pour respecter les exigences légales, un ensemble d'instruments a été mis en place dans les diverses politiques sectorielles, donnant la priorité aux mesures librement consenties.

Les mesures entreprises aux niveaux national et international pour réduire les émissions des gaz à effet de serre pourront au mieux limiter le réchauffement. Dans tous les cas, l'environnement, l'économie et la société devront faire face à une hausse encore plus marquée des températures, à des périodes de canicules plus fréquentes et à des changements dans le régime des précipitations, dus notamment à la longue durée de vie ces gaz à effet de serre dans l'atmosphère. L'adaptation aux conséquences des changements climatiques revêt dès lors une importance croissante. Sur cette base, la Confédération a décidé d'élaborer, en complément aux mesures de protection du climat existantes, une stratégie d'adaptation aux changements climatiques.

Le présent rapport présente ainsi un panorama sommaire des nombreuses relations entre le climat et l'environnement naturel et anthropique. A l'aide d'indicateurs, il présente la pression qu'exercent les activités humaines sur le climat, documente l'évolution des sources de cette pression, et retrace l'évolution du climat sur la base de données mesurées remontant parfois à plus d'un siècle. Il expose les nombreux indices révélateurs des modifications climatiques en Suisse, que ce soit sur la cryosphère, l'hydroosphère, la végétation, la santé de l'homme, l'économie ou la société. Afin de disposer des bases décisionnelles nécessaires à l'évaluation des actions requises et au contrôle de l'efficacité des mesures prises, d'autres domaines sont également analysés et documentés.

1.1 Observations des modifications du climat

Les fluctuations et les modifications du climat planétaire survenues au cours des dernières décennies sont mesurables et bien documentées (GIEC 2007a). Les changements observés au niveau mondial ne s'appliquent cependant pas directement à la Suisse car les modifications sont plus ou moins marquées selon les régions. Par exemple, les températures moyennes en Suisse ont augmenté de 1,7 °C depuis le début de l'ère industrielle (1864–2011). C'est environ un tiers de plus que la hausse de température des terres émergées de l'hémisphère nord, qui est de 1,1 °C. Les effets en termes de températures sont donc plus forts en Suisse qu'en moyenne mondiale. De plus, l'année 2011 a été la plus chaude de Suisse depuis le début des relevés de températures. En ce qui concerne les modifications du régime des précipitations dans notre pays, elles sont entachées d'incertitudes nettement plus marquées. Pour l'heure, les observations ne permettent pas de dégager de tendance significative indiquant une augmentation ou une diminution des précipitations.

Les gaz à effet de serre tels que la vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O) exercent une influence considérable sur le bilan radiatif de la planète et, par là, sur les températures terrestres. Ils absorbent une partie du rayonnement qui, sinon, irait se perdre dans l'espace. Grâce à l'effet de serre naturel, nous avons sur Terre des températures qui rendent la vie possible. Les activités humaines interfèrent toutefois de plus en plus avec ce processus naturel, car elles libèrent de grandes quantités de gaz à effet de serre qui l'amplifient (= effet de serre anthropique). Il n'y a aujourd'hui que peu de doute quant à cette influence anthropique sur les changements climatiques (GIEC 2007a).

En raison des activités humaines, essentiellement la consommation de combustibles et carburants fossiles et les changements d'affectation des terres, la concentration de CO_2 (l'un des principaux gaz à effet de serre) dans l'atmosphère est passé d'une valeur préindustrielle de quelque 280 ppm en 1750 à plus de 393 ppm en 2011. D'après les analyses de carottes de glace prélevées dans l'Antarctique, la concentration actuelle de CO_2 dépasse largement les variations naturelles des 650 000 dernières années, qui étaient comprises entre 180 et 300 ppm (GIEC 2007a). A aucun moment au cours de cette période, la concentration de CO_2 n'a augmenté aussi rapidement qu'au cours des 50 dernières années. L'analyse

des carottes de glace a également montré qu'au cours de cette même période, une concentration élevée de CO_2 dans l'atmosphère est toujours allée de pair avec des températures ambiantes relativement élevées.

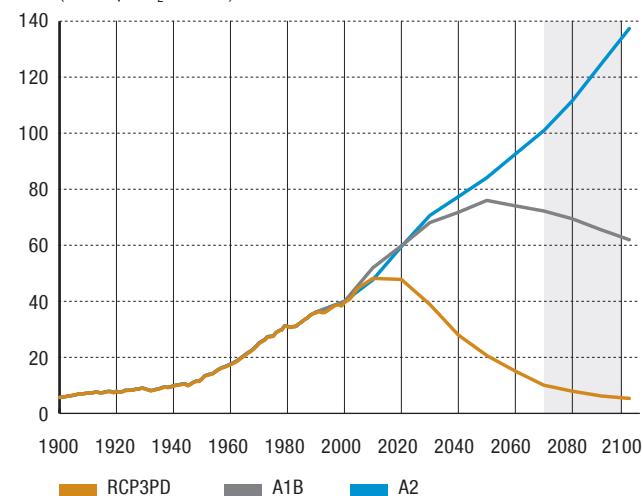
1.2 Scénarios climatiques pour la Suisse

Les émissions mondiales de gaz à effet de serre (exprimées dans le rapport en équivalent CO_2 ¹), constituent un paramètre essentiel pour estimer l'évolution du climat futur. Ces émissions dépendent de l'évolution de l'économie et de la société. Comme il n'est pas possible d'établir de pronostic précis à ce sujet, différents scénarios d'évolution économique et sociale qui débouchent sur plusieurs scénarios d'émissions de CO_2

Fig. 1 > Réaction du climat à trois scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre

a) Déroulement de trois scénarios possibles d'évolution des émissions mondiales de gaz à effet de serre et réaction correspondante du climat en termes de températures et de précipitations en Suisse b) en hiver et c) en été (CH2011 2011). Il convient de relever que tous les scénarios possibles comportent des incertitudes.

a) Emissions globales de gaz à effet de serre (Gt d'éq.- CO_2 / année)



Source: CH2011 (2011)

sur la base des différents scénarios d'émissions. Il n'est donc pas possible de dire ce que sera l'évolution du climat, mais seulement ce qu'elle pourrait être selon certains modèles et scénarios.

Depuis 2007, on dispose de données fondamentales sur l'évolution future du climat dans notre pays (OcCC/ProClim-2007). Ces données ont été mises à jour et développées à la fin 2011 dans le cadre de l'initiative CH2011 (CH2011 2011). Le rapport CH2011 distingue aujourd'hui entre trois scénarios d'émissions (figure 1a). Les scénarios A1B et A2 partent du principe que les émissions de gaz à effet de serre vont continuer de croître. Le scénario RCP3PD repose sur l'hypothèse que des mesures interventionnistes permettront, à l'horizon 2050, de réduire les émissions mondiales d'environ 50% par rapport à leur niveau de 1990. Ces scénarios climatiques constituent le fondement utilisé pour décrire les effets futurs du climat sur différents secteurs.

Le rapport CH2011 résume comme suit les résultats obtenus (figures 1b et 1c):

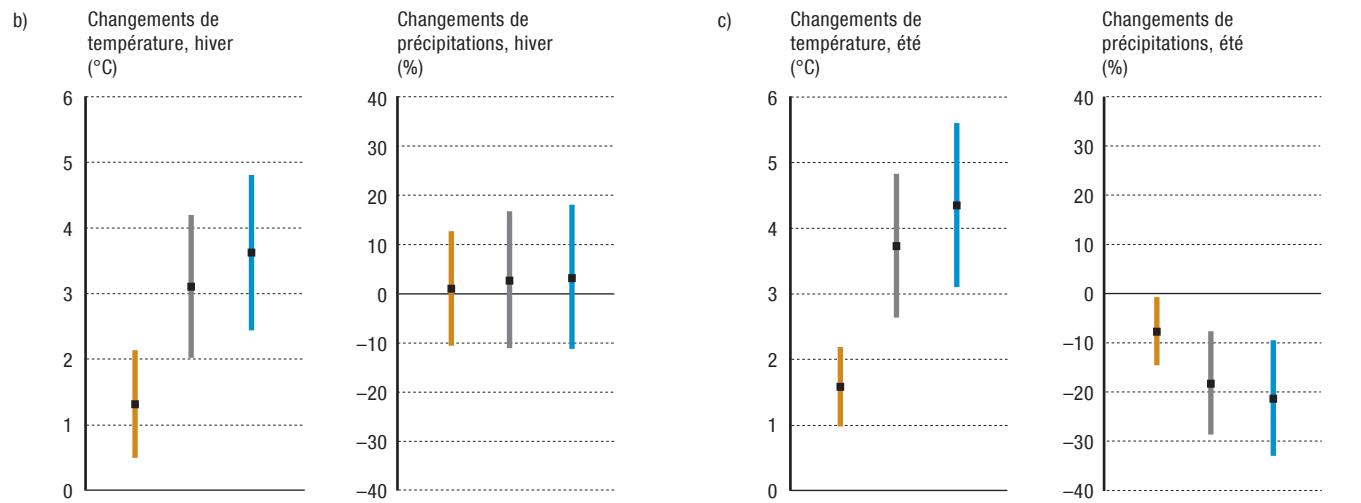
«Les projections du changement climatique indiquent que, au cours du XXI^e siècle, le climat suisse dévierait de manière significative de ce qu'il fut par le passé et de ce qu'il est actuellement. La température moyenne va très probablement augmenter dans toutes les régions et pour toutes les saisons. Les précipitations estivales moyennes vont probablement diminuer d'ici la fin du siècle dans toute la Suisse, alors qu'en

indiquer que les précipitations moyennes pourraient soit augmenter, soit diminuer. Les projections des températures et précipitations futures sont cohérentes avec les observations passées.»

Parallèlement à ces changements de température et de précipitations moyennes, la nature des événements extrêmes devrait également changer. L'évaluation indique des périodes de chaleur estivale et des vagues de chaleur plus fréquentes, plus intenses et plus longues, alors que le nombre de journées et nuits hivernales froides devrait diminuer. Les projections concernant la fréquence et l'intensité des événements de précipitations sont entachées de plus grandes incertitudes, mais des changements substantiels ne peuvent être exclus. En outre, un changement de la nature des précipitations, de solide (neige) à liquide (pluie), est à prévoir [...].»

1.3 Effets des changements climatiques

Il existe aujourd'hui, partout dans le monde, des preuves indubitables qui montrent que les systèmes naturels sont touchés par les changements climatiques régionaux, et plus particulièrement par la hausse des températures. Le réchauffement observé, largement reconnu comme étant d'origine anthropique, contribue notamment à la fonte des glaciers, à la modification du débit des cours d'eau, au réchauffement des eaux, à l'avancée



des latitudes plus septentrionales ou des altitudes plus élevées dans de nombreuses régions du monde (GIEC 2007b).

En Suisse, les effets documentés ou attendus liés au réchauffement climatique concernent d'une part l'hydro- et la géosphère (cycle de l'eau, glaciers, pergélisol, couverture neigeuse), avec des événements entraînant des dommages importants (températures extrêmes, sécheresses, fortes précipitations, crues, glissements de terrain et laves torrentielles) et les écosystèmes (flore et faune, forêts). D'autre part, le tourisme hivernal, l'énergie (en raison des pertes de production hydro-électrique et du recours accru à la climatisation), et la santé sont d'autres secteurs vulnérables. En effet, les périodes de canicule peuvent non seulement causer un stress thermique et des problèmes respiratoires ou cardiovasculaires sur la population à risque, mais aussi engendrer des baisses de performance au travail (Ecoplan et Sigmoplan 2007). D'autres secteurs, tels que l'agriculture, pourraient tirer profit d'un climat plus chaud, notamment en raison d'une période de végétation plus longue, pour autant que l'augmentation de température ne dépasse pas 2–3 °C d'ici à 2050. En effet, l'augmentation des vagues de chaleur et des périodes de sécheresse pourrait s'avérer problématiques pour l'exploitation des cultures et l'élevage du bétail. Il semble toutefois que l'économie suisse sera davantage affectée par les influences internationales des changements climatiques que par les conséquences au plan national (sérieux effets sur les flux commerciaux et les marchés des capitaux [Infras et al. 2007]).

2.1 Le modèle DPSIR

Les indicateurs retenus dans le présent rapport s'organisent selon une approche structurelle internationalement reconnue élaborée par l'Agence européenne de l'environnement (figure 2). Connue sous le nom de modèle DPSIR, pour «driving forces – pressures – state – impact – responses», elle permet d'illustrer, à l'aide d'exemples concrets bien documentés, les causes possibles d'une pression sur le milieu naturel et son état. Elle exprime aussi quels sont les impacts de ces changements d'état de l'environnement sur les écosystèmes, la santé de l'homme, l'économie et la société, et les réponses apportées pour limiter les impacts de ces causes et prévenir les évolutions indésirables. De cette façon, le modèle permet d'évaluer les résultats des choix politiques ou les effets attendus de futures décisions.

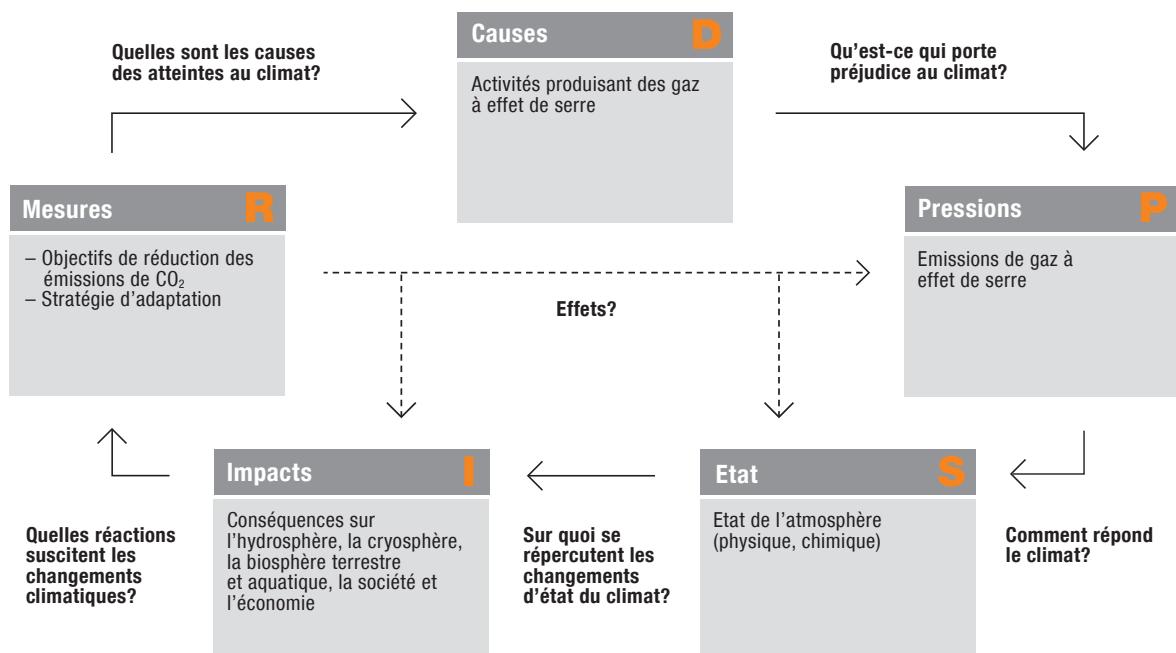
2.2 Les indicateurs du climat

L'évaluation des effets des changements climatiques sur l'environnement naturel et humain en Suisse est réalisée à l'aide d'indicateurs pour lesquels on dispose de données relativement accessibles et relevées à intervalles réguliers. Les conditions que doivent remplir ces indicateurs sont notamment les suivantes:

- > donner une image représentative des éléments du système climatique,
- > couvrir un grand nombre d'aspects,
- > permettre de suivre leur évolution dans le temps et sur l'ensemble du territoire,
- > ne pas être redondants,
- > être compréhensibles et clairs,
- > être fondés sur une méthodologie scientifique,
- > permettre une interprétation univoque,
- > avoir un intérêt politique,
- > être internationalement comparables.

Fig. 2 > Analyse DPSIR appliquée au climat

Quelles sont les liens entre les différents éléments influençant ou influencés par le climat?



ments climatiques ainsi qu'au suivi de la mise en œuvre de la loi sur le CO₂, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) dispose de données détaillées concernant l'évolution des émissions de gaz à effet de serre. Ces données permettent de suivre les modifications au sein des différents secteurs émetteurs et aident à identifier les domaines dans lesquels les besoins en matière de mesures de réduction sont particulièrement importants.

S'agissant des données atmosphériques, l'Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse) exploite un réseau dense de stations d'observation réparties sur l'ensemble du territoire et dispose, pour certaines stations, de séries de mesures relativement longues. En ce qui concerne l'évolution des effets des changements climatiques sur l'environnement naturel en Suisse, les mesures ont été effectuées, dans certains cas, par l'OFEV, ou proviennent de réseaux de mesure ou d'observation, de sondages ou de relevés déployés par d'autres offices fédéraux ou instituts de recherche.

Lorsqu'on utilise des indicateurs relevant de la politique climatique, une différenciation entre les mesures visant à réduire les émissions et les mesures d'adaptation aux changements climatiques s'avère importante. Alors qu'il existe des bases relativement solides pour le suivi des mesures ayant une incidence sur l'évolution des émissions, la gestion des effets des changements climatiques n'est encore que peu documentée, probablement aussi parce que ces processus sont généralement très lents. Seul le domaine des dangers naturels dispose d'une tradition d'évaluation et de prévention des dangers bien établie, jusqu'à présent le plus souvent sans lien avec les changements climatiques, mais dont les données peuvent être exploitées.

des causes aux mesures

3.1 Sources d'émission de gaz à effet de serre

La croissance de la population et de ses besoins de confort, de même que les changements dans les modes de vie ou les activités économiques, perturbent l'environnement naturel au niveau planétaire. En effet, les activités humaines, que ce soit dans le secteur des transports, de l'industrie, des services, des ménages, de l'agriculture ou des déchets, engendrent des émissions de gaz à effet de serre qui se sont révélées particulièrement néfastes pour le climat depuis plus d'un demi-siècle. Les gaz qui affectent le plus le climat sont le CO₂, le CH₄, le N₂O et les gaz synthétiques (HCF, PCF et SF₆). En Suisse, bien que les besoins de la population aient suivi, voire

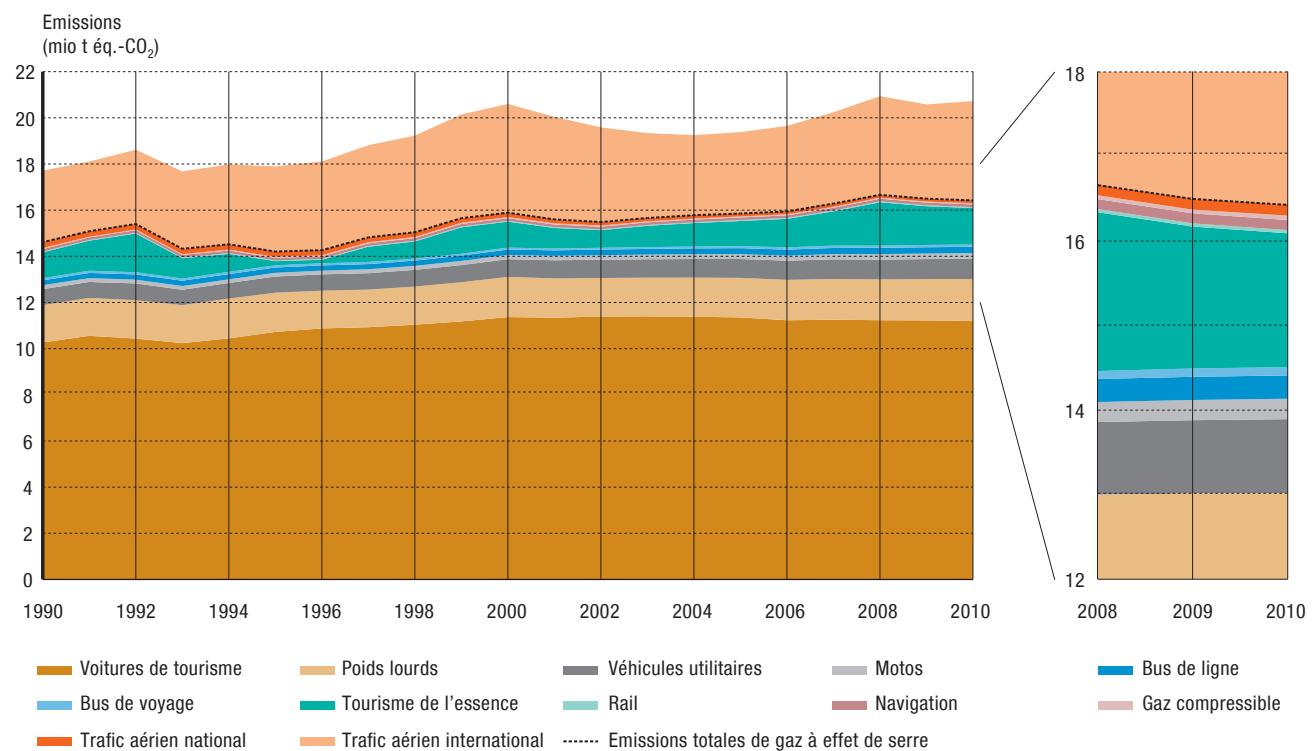
dépassé, l'évolution démographique, l'évolution de ces gaz ne suit pas forcément la même tendance. Le passage aux énergies renouvelables et le recours à des technologies utilisant moins d'énergie ont atténué la pression environnementale, sans toucher à la croissance économique.

3.1.1 Le secteur des transports

Le secteur des transports comprend le trafic routier, le transport aérien national, le transport par bateau et le transport par rail. Avec une contribution aux émissions de gaz à effet de serre de ce secteur atteignant 98 % (figure 3), le transport routier se démarque nettement des autres modes de transport (sans le transport aérien international²), qui, lui, est respon-

Fig. 3 > Emissions de gaz à effet de serre des transports

Evolution des émissions pour la période 1990–2010. La ligne noire représente la somme des émissions nationales du secteur du trafic au sens du Protocole de Kyoto (sans le trafic aérien et maritime international).



toile de Kyoto pour la période 1990–2010, les émissions de gaz à effet de serre des voitures de tourisme, des véhicules utilitaires et des poids lourds ont augmenté respectivement de 9 %, 26 % et 12 % en 20 ans. Le tourisme à la pompe³ présente d'importantes fluctuations parce qu'il réagit de manière sensible aux différences de prix entre la Suisse et l'étranger. Bien que les émissions du transport par rail et par bateau soient faibles, elles ont elles aussi augmenté, de 32 % et de 4 % respectivement. Les émissions du transport aérien national ont en revanche chuté de manière spectaculaire (–51 %). Cette baisse s'explique d'une part par une densité croissante de la réglementation et, d'autre part, par le développement massif de l'infrastructure au sol, en particulier des liaisons ferroviaires entre Genève et Zurich. Au niveau international, les émissions aériennes ont augmenté de 39 % depuis 1990, mais se situent encore en dessous des valeurs du pic de 2000. Le recul observé entre 2000 et 2004 s'explique par les répercussions de l'attaque terroriste du 11 septembre 2001 et de la crise de la compagnie Swissair (2003/2004).

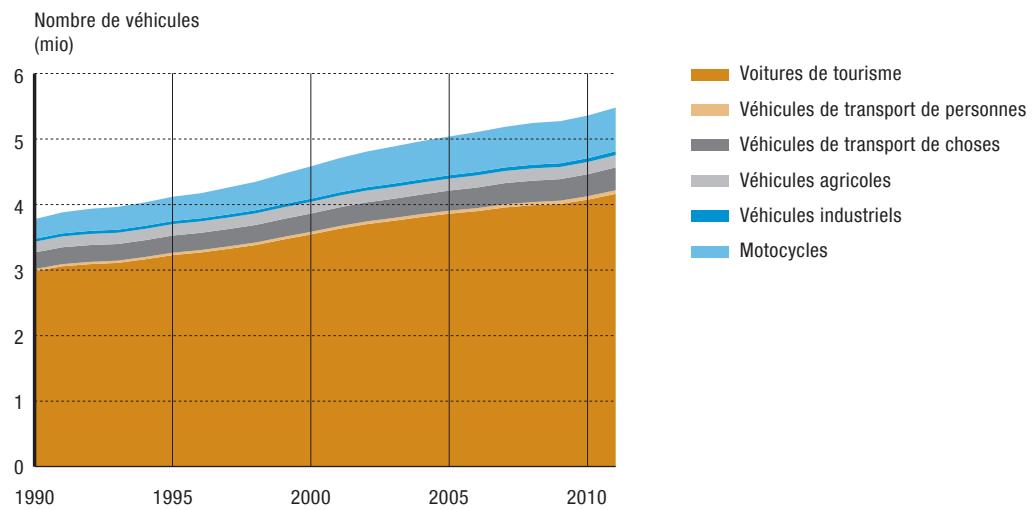
Un changement dans le comportement en matière de transports ou une amélioration de l'efficience de la flotte peuvent conduire à une évolution des émissions de gaz à effet de serre en adéquation avec l'objectif fixé dans le Protocole de Kyoto. Le parc de véhicules à moteur destinés au transport routier de personnes⁴ et de marchandises⁵ est une importante

matiquement une augmentation des émissions, cet indicateur reste alors insuffisant pour suivre les efforts de réduction. Il est important de tenir compte également de la consommation réelle de carburant, déterminée en fonction du nombre de kilomètres parcourus par toute la flotte (prestation kilométrique⁶) ou des émissions produites au kilomètre (émissions spécifiques du transport) en tenant compte du nombre de passagers ou des tonnes de fret transportées (et non du nombre de véhicules).

Le parc des véhicules du transport routier de personnes (figure 4) a augmenté de 44 % en 20 ans. Parallèlement, on observe depuis 1993 un accroissement de la prestation kilométrique du transport privé de personnes de 25 % (figure 5). Cette plus douce augmentation dénote une baisse du nombre de kilomètres parcourus par véhicule. De même, alors que les émissions de CO₂ du transport privé de personnes ont augmenté en parallèle avec la prestation kilométrique entre 1990 et 2002 (+14 % en 2002), les émissions de CO₂ se sont soudain maintenues à un niveau constant (figure 5). Cette stabilisation, certes positive, reflète l'amélioration de l'efficience énergétique de la flotte (surtout des voitures de tourisme) et la tendance à la hausse des voitures roulant au diesel. En revanche, la distance totale parcourue par l'ensemble des passagers n'a pas autant augmenté que celle parcourue par les véhicules privés, ce qui dénote une baisse du nombre de passagers

Fig. 4 > Parc de véhicules routiers motorisés

Nombre de véhicules recensés annuellement de 1990 à 2011 pour différentes catégories de véhicules du transport routier motorisé.



1990 (figure 5). Une limitation de l'utilisation individuelle de la voiture ou le covoiturage permettrait de réduire les émissions spécifiques de CO₂.

La prestation kilométrique du transport de marchandises (figure 5) est aussi en constante augmentation (+28 % entre 1990 et 2010), mais subit de plus larges fluctuations en raison de sa réaction aux variations conjoncturelles. Une réduction passagère des kilomètres parcourus est visible de 2001 à 2003. Elle résulte de l'effet de la redevance sur le trafic des poids lourds introduite en 2001 et du relèvement de la limite de poids pour le trafic poids lourds de 28 à 34 tonnes (2001) puis à 40 tonnes (2005). L'augmentation de la quantité de marchandises transportées par véhicule a réduit ses émissions spécifiques de CO₂ de 21 % (figure 5) et a permis au parc des véhicules routiers destinés au transport de marchandises de croître à un taux inférieur à celui des quantités de marchandises transportées (+26 % entre 1990 et 2010, figure 4). Si là encore, une légère amélioration de l'efficience, c.-à-d. une baisse de la consommation spécifique, est avérée, les émissions de CO₂ ne cessent d'augmenter (figure 5). La part du transport ferroviaire dans la prestation du transport de marchandises⁷ a varié dans une fourchette de 36 % à 42 %. Elle devrait croître ces prochaines années, ce qui potentiellement induirait une réduction des émissions spécifiques, notamment grâce aux projets réalisés dans le contexte de la loi fédérale

3.1.2 Le secteur des ménages

La croissance de la population engendre une augmentation des besoins en énergie. Les besoins du secteur des ménages sont principalement liés au chauffage des surfaces habitables, dont l'expansion se poursuit. En 2010, plus de 72 % de la consommation énergétique des ménages y était destinée, alors que le reste servait à fournir de l'eau chaude (12 %) ou à tout autre besoin ménager (cuisine, entretien, éclairage etc. [Infras et al. 2011]). En Suisse, le mazout couvre l'essentiel des besoins en chauffage des ménages (54 %), suivi par le gaz naturel (21 % [Infras et al. 2011]). Si on se focalise sur les combustibles fossiles uniquement, la part du mazout atteint 63 % pour une contribution aux émissions de CO₂ des ménages de 76 % (Confédération suisse 2012). L'influence des conditions météorologiques sur les quantités de combustibles fossiles consommées par les ménages n'est pas négligeable en Suisse. En effet, lorsque l'hiver est froid et étendu, les demandes en chauffage sont plus importantes que lorsque les températures hivernales sont douces. Les faibles valeurs d'émission enregistrées en 2007 et les hautes valeurs de 2010 illustrent ce phénomène.

L'évolution de la pression environnementale exercée par la consommation énergétique des ménages est évaluée à l'aide de trois indicateurs: la croissance démographique, le parc des logements et la surface de référence énergétique⁸ (figure 6).

Fig. 5 > Facteurs influençant les émissions du trafic routier, émissions brutes et spécifiques

Prestations de circulation du transport privé de personnes et de marchandises par la route pour la période 1990–2010. Il en va de même pour les émissions annuelles brutes et spécifiques de CO₂ provenant de la combustion de carburants fossiles des véhicules destinées au transport privé de personnes et de marchandises par la route.

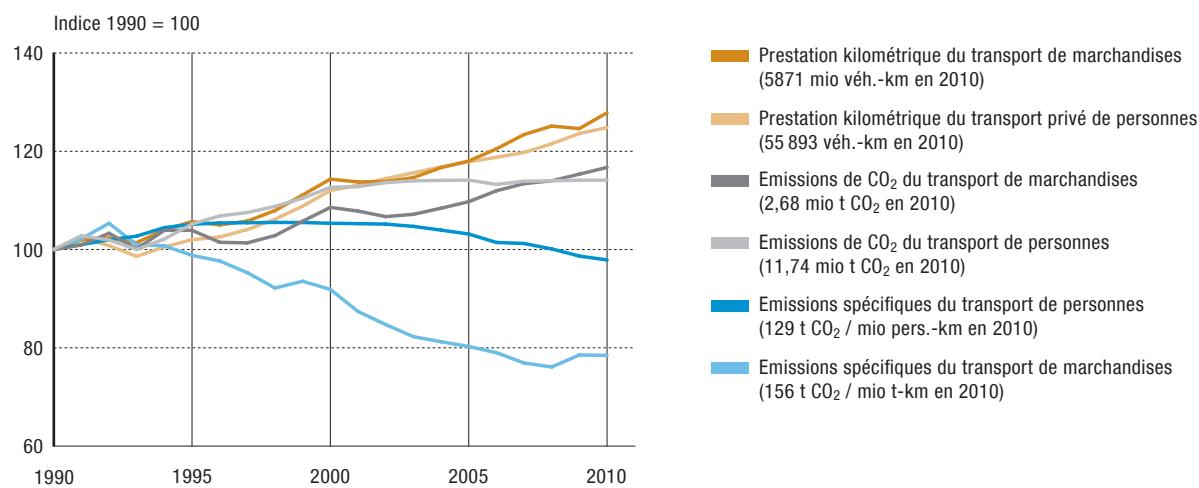
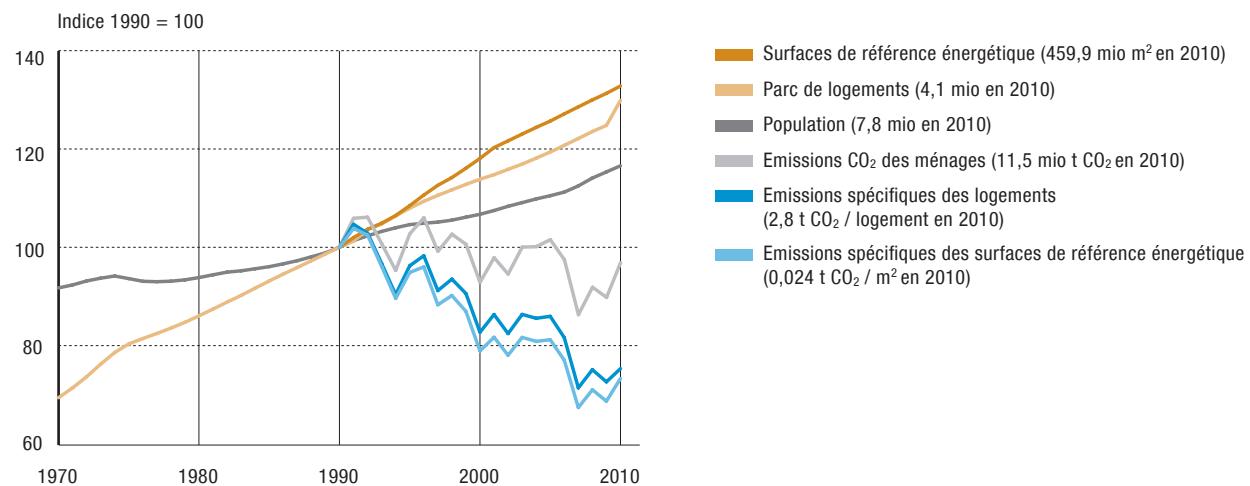


Fig. 6 > Facteurs influençant les émissions des ménages, émissions brutes et spécifiques

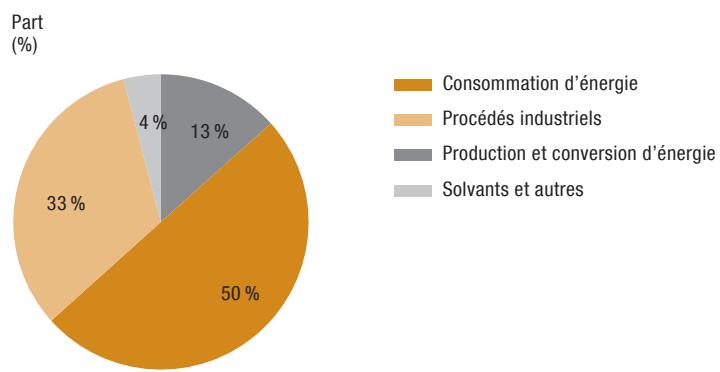
Croissance de la population et du nombre de logements occupés en permanence de 1967 à 2010 et évolution des surfaces de référence énergétique des ménages de 1990 à 2010. Emissions annuelles brutes et spécifiques (par logement et/ou par surface de référence énergétique) de CO₂ provenant de la combustion de combustibles fossiles des ménages.



Sources: Confédération suisse (2012), OFS (2011, 2012c,d)

Fig. 7 > Source d'émissions du secteur de l'industrie

Part de chaque source aux émissions totales de gaz à effet de serre de l'industrie pour l'année 2010.



Source: Confédération suisse (2012)

que pour la population. Cela signifie que la surface habitable par personne augmente et que le nombre de résidents par logement diminue. Malgré la croissance ininterrompue de ces indicateurs, les émissions des ménages montrent un net recul depuis 1990, et se traduisent par une baisse annuelle moyenne de 0,5 % pour les émissions brutes et de l'ordre de 1,1 % à 1,2 % pour les émissions spécifiques⁹, selon la méthode. Cette tendance s'explique par le recours accru au gaz naturel et aux agents énergétiques non fossiles (pompes à chaleur, bois, etc.) ainsi que par l'amélioration des standards d'isolation et l'assainissement énergétique des bâtiments.

3.1.3 Le secteur de l'industrie

La croissance des activités industrielles peut constituer un facteur aggravant pour le climat si aucun changement structurel ou technique n'est apporté. La principale source d'émissions du secteur de l'industrie est la consommation d'énergie de l'industrie manufacturière et de la construction (figure 7). Les émissions restantes proviennent essentiellement de la production et de la transformation d'énergie et des procédés industriels. Les combustibles fossiles du secteur «consommation d'énergie» sont, dans leur quasi-totalité, utilisés pour la production de chaleur industrielle (la chaleur nécessaire à de nombreux procédés et processus techniques) et pour le chauffage

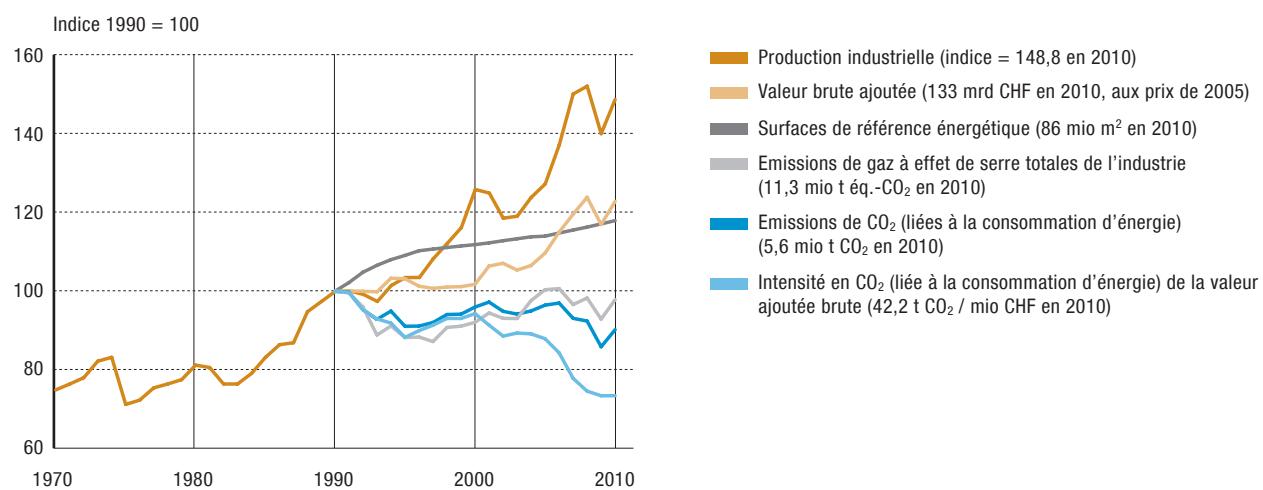
nement des machines, utilisation d'engins utilitaires) sont couvertes par l'électricité (Infras et al. 2011).

Tandis que les besoins en chauffage sont liés aux surfaces utilisées par l'industrie, l'énergie consommée pour les processus de fabrication dépend des quantités de biens produits. L'indice de production, la valeur ajoutée brute¹⁰ et la surface de référence énergétique⁸ permettent ainsi de suivre et de comprendre l'évolution des émissions de gaz à effet de serre de ce secteur. Entre 1990 et 2010, la forte croissance de la production industrielle, +49 %, et la légère augmentation des surfaces de référence énergétique, +18 %, et de la valeur ajoutée brute, +16 %, n'ont pas engendré de hausse des émissions de CO₂ liées à la consommation d'énergie (figure 8). La baisse des émissions de gaz à effet de serre totales de l'industrie, tout secteur confondu, n'est pas aussi marquée que celle des émissions de CO₂ liées à la consommation d'énergie car elle est freinée par la hausse des émissions des procédés industriels.

Le but visé par l'industrie est de parvenir à un découplage entre croissance économique et émissions, en d'autres termes, l'essor économique doit être soutenu mais les émissions freinées. Afin d'évaluer l'efficacité des efforts consentis par l'industrie pour atteindre ces objectifs environnementaux et économiques, on utilise l'intensité en CO₂ énergétique. Cet indicateur calcule le rapport entre les émissions de CO₂ liées à

Fig. 8 > Facteurs influençant les émissions de l'industrie, émissions brutes et intensité en CO₂

Evolution de la production industrielle de 1970 à 2010, des surfaces de référence énergétique de l'industrie, de la valeur ajoutée brute, des émissions de CO₂ liées à la consommation d'énergie, des émissions de gaz à effet de serre totales, et de l'intensité en CO₂ liée à la consommation d'énergie de la valeur ajoutée brute de l'industrie pour la période 1990–2010.



tations minières¹¹. Les émissions de CO₂ par franc de valeur ajoutée brute ont diminué de 27 % entre 1990 et 2010; un dé-couplage a ainsi eu lieu (figure 8).

3.1.4 Le secteur des services

Le tourisme, les banques et les assurances sont les principaux domaines d'activités contribuant au développement florissant du secteur des services en Suisse. Ces activités engendrent inévitablement des émissions, mais exclusivement au travers de la consommation énergétique. Les émissions sont essentiellement liées au chauffage et sont donc, à court terme, liées aux conditions météorologiques (Infras et al. 2011).

La hausse de plus de 35 % de la valeur ajoutée brute¹² entre 1990 et 2010 illustre le développement économique considérable du secteur des services (figure 9). Conséquence attendue de cet essor: l'augmentation des surfaces de référence énergétique⁸. L'intensité en CO₂ du secteur des services qui se base sur les émissions de CO₂ énergétique, s'est améliorée de 31 % sur cette même période, soit dans une proportion

sions tendent ainsi à diminuer, même lors de périodes de forte croissance (p. ex. de 2004 à 2008). Comme pour le secteur des ménages, le passage à des agents énergétiques non fossiles et l'amélioration des standards énergétiques des structures existantes ont permis de compenser la hausse des émissions causée par des besoins grandissants en énergie.

3.1.5 Le secteur de l'agriculture

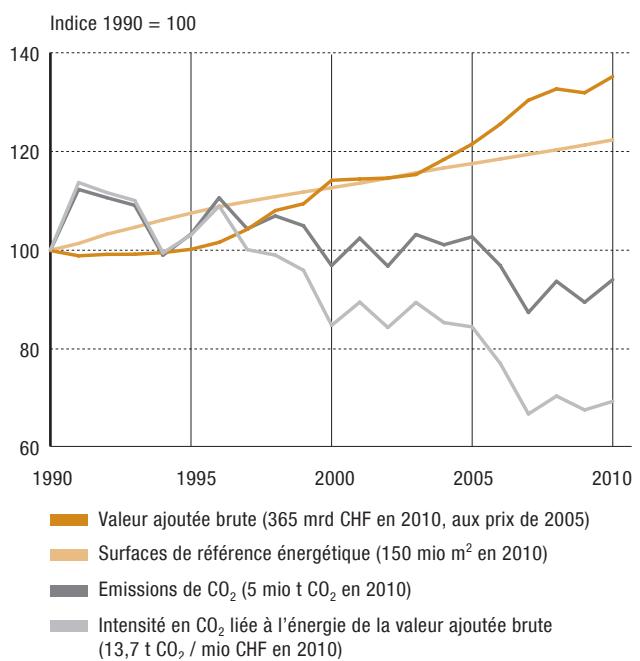
Au contraire des autres secteurs, la part de l'agriculture aux émissions de CO₂ est faible (figure 10a). En revanche, elle contribue à 51 % des émissions de CH₄ et à 40 % des émissions de N₂O (valeur 2010, Confédération suisse 2012). La digestion des animaux de rente et l'exploitation des engrains de ferme engendrent des émissions de CH₄ (73 % à attribuer à la détention de bétail). Quant aux émissions de N₂O, elles sont issues principalement de processus de décomposition biologique de dépôts d'azote sur les surfaces agricoles utiles. L'essentiel de ces dépôts provient de la fertilisation azotée des engrains minéraux (commerciaux) et des engrains de ferme.

La performance laitière moyenne par vache a augmenté de près de 70 % depuis 25 ans grâce au progrès en matière de sélection et d'intensification de l'alimentation (OFG 2011). Un recul du cheptel bovin, et plus particulièrement des vaches laitières (figure 10b), a ainsi pu être enregistré. Malgré la croissance des émissions spécifiques de CH₄ des bovins¹³, et plus encore des vaches laitières, une réduction des émissions brutes de CH₄ de 4 % est observée entre 1990 et 2010 dans ce secteur. Cette réduction s'accompagne, malgré tout, d'une amélioration du rendement laitier. Les émissions spécifiques de CH₄ par kg de lait¹⁷ sont elles aussi en diminution.

La baisse de 9 % des émissions de N₂O au cours de ces 20 dernières années reflète le recul de l'utilisation des engrains minéraux et de ferme (figure 10c). En effet, l'utilisation des engrains est soumise à de nombreuses prescriptions inscrites dans la législation fédérale sur l'environnement. Les engrains minéraux ne peuvent être utilisés que si les engrains de ferme ne suffisent pas. Des restrictions existent également quant aux quantités d'engrais de ferme pouvant être épandues. De plus, les exploitations doivent se tenir aux recommandations des stations de recherche en agriculture pour tout ce qui concerne les quantités d'engrais nécessaires aux plantes. Toutefois, la diminution des engrains de ferme épandus ne compense qu'en partie les quantités d'azote directement rejetées par les animaux en pâture. Les émissions spécifiques directes des engrains minéraux et de ferme par surface agricole utile¹⁵ diminuent dans les mêmes proportions que les quantités d'engrais utilisées. Les surfaces agricoles se maintenant à un niveau quasiment constant, elles n'influencent donc pas la baisse des quantités d'engrais utilisées. Les efforts consentis par l'agriculture dans

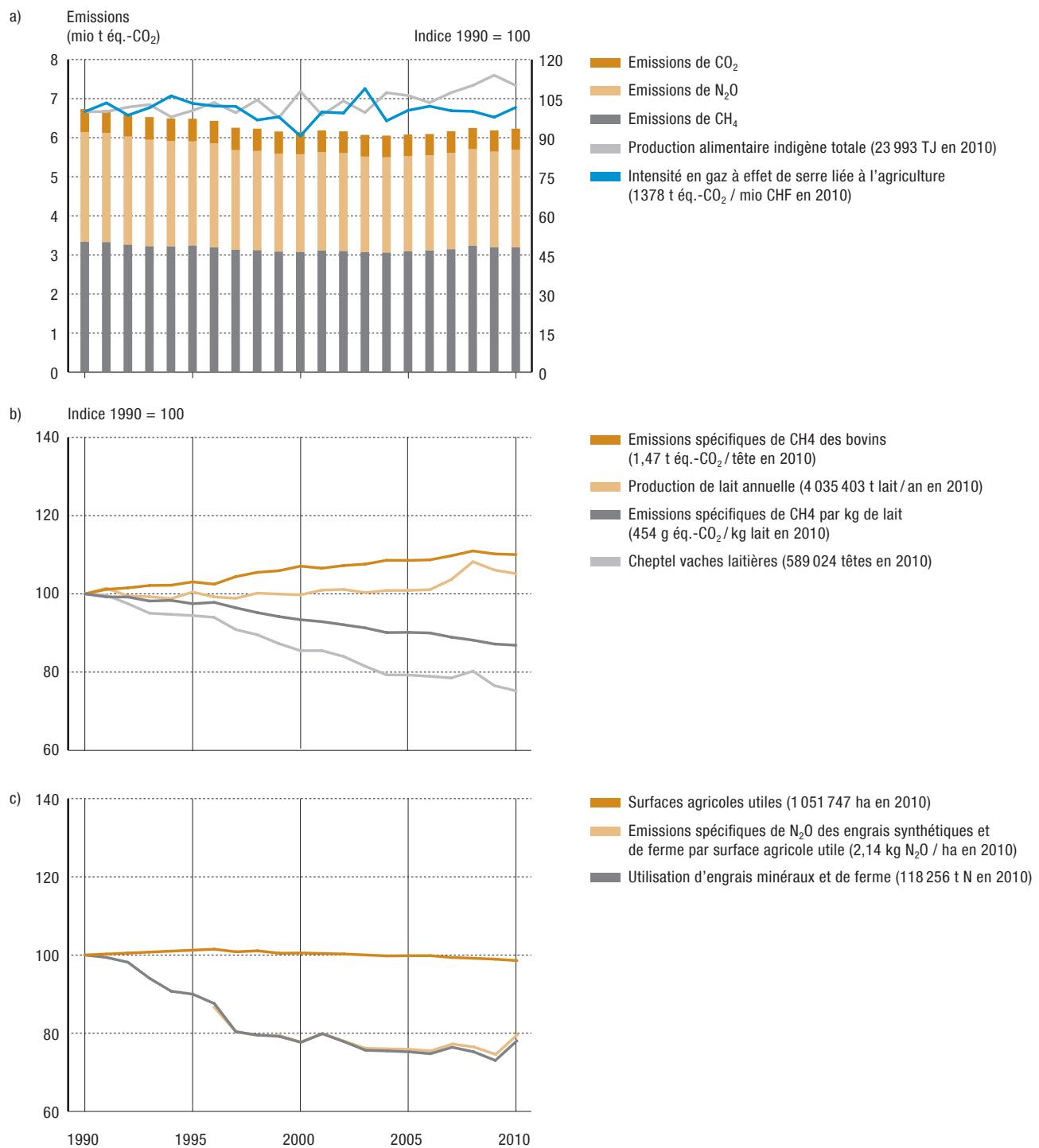
Fig. 9 > Facteurs influençant les émissions des services, émissions brutes et intensité en CO₂

Evolution de la valeur ajoutée brute, des surfaces de référence énergétique, des émissions de CO₂ et de l'intensité en CO₂ liée à l'énergie de la valeur ajoutée brute des services de 1990 à 2010.



Sources: Confédération suisse (2012), OFEN (2012), OFS (2012e)

- a) Evolution de la production indigène de denrées alimentaires animales et végétales, intensité en gaz à effet de serre de la valeur ajoutée brute de l'agriculture et émissions brutes de CO_2 , CH_4 et N_2O de l'agriculture. b) Evolution du cheptel de vaches laitières, des quantités de lait produites annuellement, des émissions spécifiques de CH_4 des bovins et de la production de lait. c) Evolution des surfaces agricoles utiles, des quantités de nitrates utilisés sous forme d'engrais minéraux et de ferme et des émissions spécifiques de N_2O (émissions directes de N_2O de l'utilisation de ces engrains sur les sols) par unité de surface agricole.



croissance de la production alimentaire agricole (figure 10a). Les émissions par franc de valeur ajoutée brute de l'agriculture¹⁶ se maintiennent à un niveau relativement constant.

3.1.6 Le secteur des déchets

En Suisse, près de 19,5 millions de tonnes de déchets sont produits chaque année. Ces déchets sont principalement issus de la construction (11,9 millions de tonnes) ou des déchets urbains (5,6 millions de tonnes). Avec un taux de recyclage de ces déchets de respectivement 82 % et 50 % en 2010, la Suisse se situe, en comparaison internationale, parmi les pays valorisant le mieux ses déchets. La part restante des déchets comprend les boues d'épuration et les déchets spéciaux. Les déchets urbains non recyclés, de même qu'une petite partie des déchets spéciaux sont envoyés dans des usines d'incinération où ils font l'objet d'une valorisation thermique. Les cimenteries exploitent également depuis quelques années le potentiel énergétique des déchets. Elles se démarquent des usines d'incinération par l'utilisation de combustibles de substitution, notamment d'huiles usées, de solvants, de pneus usés, de plastiques, de boues d'épuration séchées, de divers déchets industriels ou provenant de l'agriculture. Bien que la production de chaleur et/ou de courant issue des usines d'incinération ou des cimenteries engendre inévitablement des émissions de

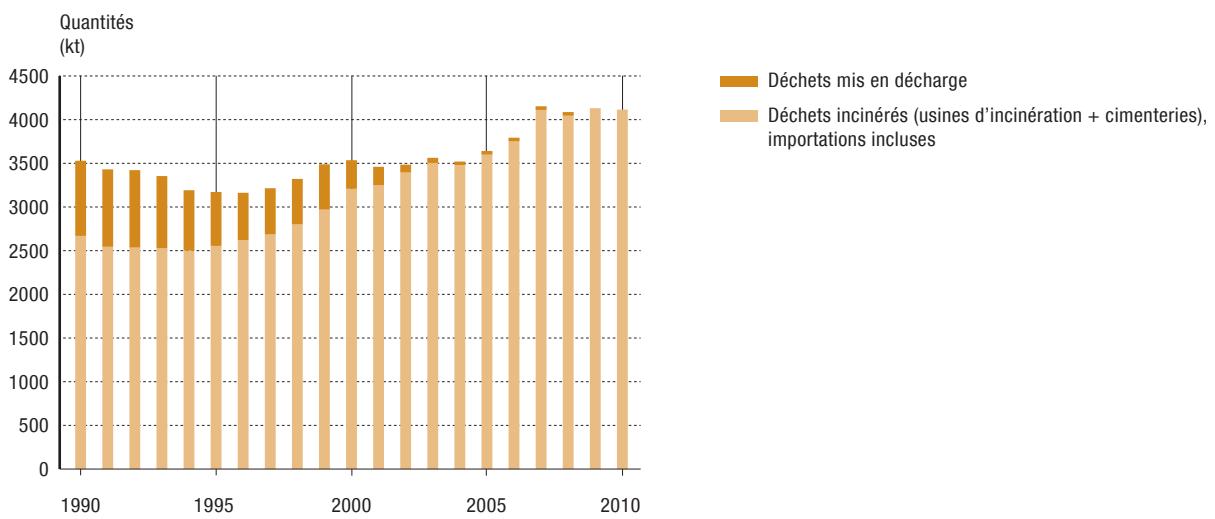
tout en remplacement des combustibles fossiles. L'entreposage des déchets dans des décharges libère en revanche d'importantes quantités de CH₄. Avec l'interdiction prononcée en 2000 de mettre en décharge les déchets combustibles, seule une partie des déchets de construction et des déchets spéciaux finit dans des décharges, qui plus est, contrôlées.

L'augmentation de la quantité de déchets (incinérés et mis en décharge) au cours des 20 dernières années s'explique par la croissance démographique et économique (figure 11). La forte progression des déchets incinérés et mis en décharge entre 2005 et 2006 provient en premier lieu de l'augmentation de la quantité de déchets importés durant cette période. L'interdiction de mise en décharge prononcée en 2000 explique la progression de la part des déchets incinérés.

Les émissions de gaz à effet de serre liées aux déchets incinérés et mis en décharge varient en fonction de la quantité de déchets (figure 12). Les émissions de gaz à effet de serre par tonne de déchets sont toutefois en constante augmentation depuis 1995 (+14 % entre 1990 et 2010). Les émissions de CO₂ progressent également plus fortement que les déchets incinérés (+19 %). Ce phénomène s'explique par les changements de la composition des déchets incinérés et donc de la part d'origine fossile. Bien qu'il n'y ait quasi plus de déchets urbains mis en décharge depuis 2002, les émissions de CH₄

Fig. 11 > Facteurs influençant les émissions des déchets

Evolution des quantités de déchets mis en décharge et incinérés entre 1990 et 2010.



dans des décharges se poursuivent et rejettent durant plusieurs années des quantités importantes de CH₄ dans l'atmosphère et ce, malgré les systèmes de captage du gaz.

3.1.7 Sources et puits de gaz à effet de serre d'origine non fossile

Afin de répondre à la demande alimentaire croissante, aux besoins en énergie et à des fins d'aménagement, l'homme transforme, remanie et exploite les surfaces de terres. L'utilisation de ces sols et les changements d'affectation de ces terres induisent des variations du carbone stocké et par conséquent des émissions anthropiques. Les activités agricoles peuvent entraîner la libération du carbone stocké. Le labour par exemple, par l'aération et l'augmentation de la température des sols, favorise la décomposition des matières organiques. L'utilisation des fertilisants, la combustion de la biomasse, le chaulage, le surpâturage voire des pratiques qui ne protègent pas les sols contre l'érosion¹⁷ entraînent aussi une réduction de la capacité de piégeage du carbone.

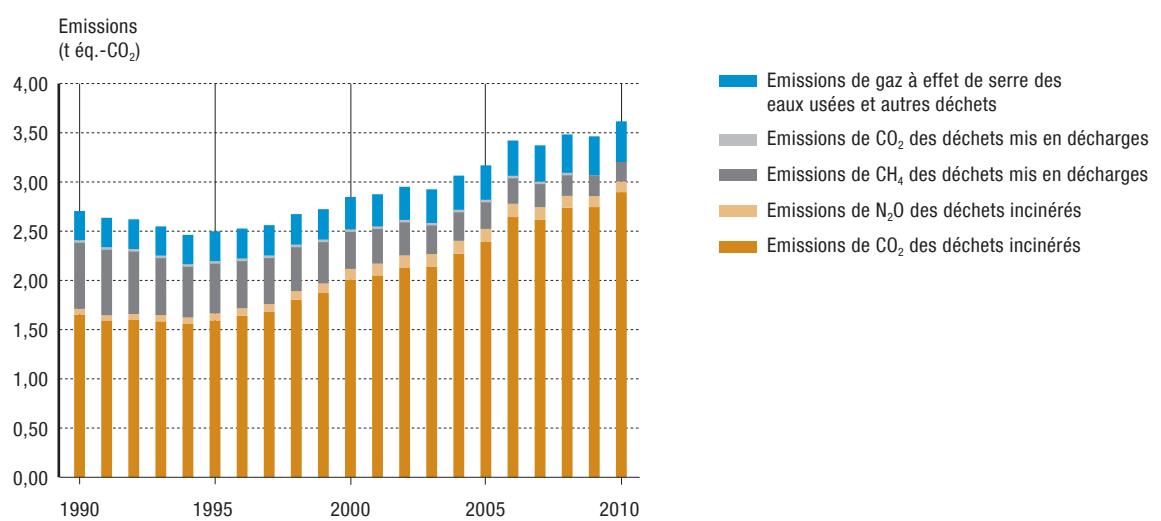
Les tourbières, les forêts et les prairies sont les principaux puits de carbone naturels des écosystèmes terrestres. La conversion de ces surfaces en terres agricoles a des conséquences particulièrement lourdes pour l'environnement. L'exploitation des tourbières en particulier réamorce les processus de décomposition de la matière organique accumulée. Les

entes dans l'atmosphère pendant leur phase de croissance. La décomposition ou la combustion de l'arbre mort suite au défrichage et aux incendies de forêts va ainsi libérer le carbone stocké dans la biomasse. De plus, les sols forestiers renferment de grandes quantités de carbone. En Europe, le passage d'une agriculture extensif à intensive, et une sensibilité environnementale accrue, ont favorisé les actions de reboisement et une gestion active et durable des forêts (rétablissement rapide des arbres après la récolte). Toutefois, la déforestation reste un sujet particulièrement préoccupant au niveau mondial, non seulement parce qu'elle est considérée comme une importante source d'émissions de gaz à effet de serre anthropiques, mais surtout parce que la biosphère emmagasine actuellement 25 % des émissions anthropiques mondiales de CO₂.

Selon la classification du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Penman et al. 2003), ces surfaces modifiées et utilisées peuvent être réparties en six catégories (forêts, terres cultivées, prairies, zones humides, habitations et autres). En Suisse, tous les types de sol, à l'exception des forêts, sont des sources d'émissions de CO₂ (figure 13). L'exploitation forestière contribue depuis longtemps à augmenter la biomasse de la forêt et lui confère un rôle de puits de gaz à effet de serre (Confédération suisse 2012). Comparativement aux forêts, les valeurs des autres types de

Fig. 12 > Emissions des gaz à effet de serre du secteur des déchets

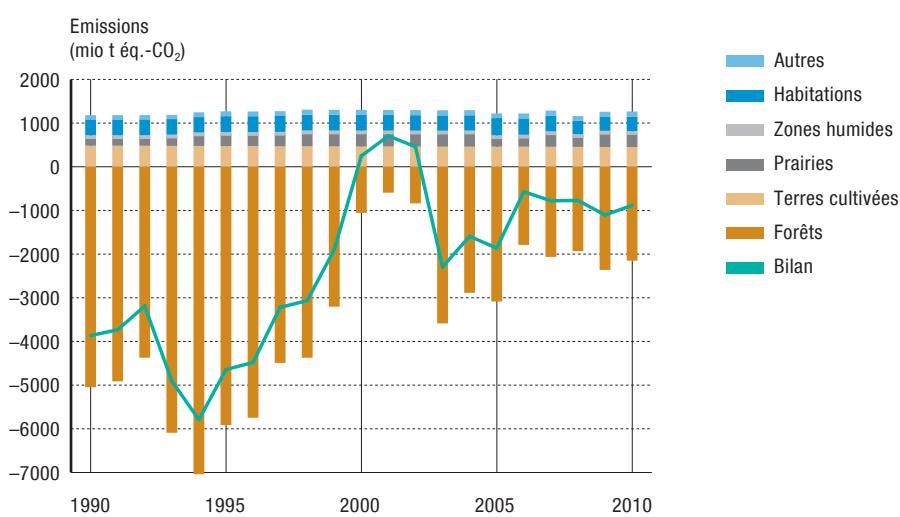
Evolution des émissions de CO₂, de CH₄, et de N₂O des déchets mis en décharge et incinérés du secteur des déchets de 1990 à 2010. La part restante des émissions de gaz à effet de serre des déchets provient essentiellement des eaux usées.



vees de 2000 à 2002 ne reflètent pas la tendance, car elles sont l'œuvre de la tempête «Lothar». L'ampleur des dégâts causés par la tempête et l'exploitation forcée ont conduit à une réduction considérable de l'effet puits de carbone des forêts. Tandis que dans les années 1990, le puits que représentait le secteur forestier était nettement plus élevé que la somme totale des émissions de gaz à effet de serre des autres catégories d'utilisation du sol, il semble avoir diminué au cours de cette dernière décennie. Les chiffres publiés récemment dans l'inventaire forestier national IV, qui ne sont pas encore inclus dans la figure 13, montrent pourtant que l'effet de puits de carbone des forêts a moins fortement baissé ces dernières années que ce qui est représenté.

Fig. 13 > Sources et puits de carbone de l'utilisation du sol

Changements annuels dans les stocks de carbone à travers l'utilisation des terres et les changements d'affectation des terres pour six catégories de sols entre 1990 et 2010. Une valeur négative signifie un puits, ce qui correspond à une augmentation des réserves de carbone.



Source: Confédération suisse (2012)

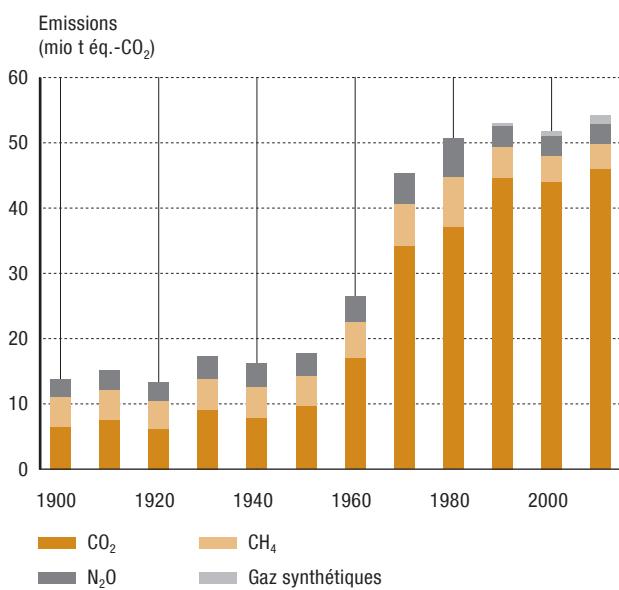
Depuis une quarantaine d'années, la croissance de la consommation énergétique conduit à une hausse sans précédent des émissions anthropiques mondiales de CO₂. Les autres gaz augmentent également, mais leur part ne représentait que 24 % des émissions globales de gaz à effet de serre en 2008 (IEA 2011). En Suisse, la forte augmentation a démarré au début des années 1950 déjà pour atteindre des maxima 30 ans plus tard. L'évolution des tendances nationales en matière d'émissions de gaz à effet de serre subit de grandes variations. Dans les pays en développement, on assiste à une augmentation continue des émissions, alors qu'elles sont en recul dans les pays industrialisés et dans de nombreux pays de l'Europe de l'est. En Suisse, la somme des émissions de gaz à effet de serre est restée à peu près constante depuis 1980.

3.2.1 Evolution des émissions de gaz à effet de serre par gaz et par secteur

Entre 1900 et 2010, les émissions totales de gaz à effet de serre en Suisse ont plus que quadruplé, passant de 13,1 millions de tonnes d'éq.-CO₂ à 54,2 millions de tonnes (figure 14). La quote-part du CO₂ est passée de 45 % à 85 %, alors que celle du CH₄ et du N₂O réunis est passée de 55 % à 13 %. La contribution des gaz synthétiques aux émissions nationales a augmenté de 0,4 % à 2,3 % entre 1990 et 2010.

Fig. 14 > Emissions de gaz à effet de serre par gaz

Emissions de CO₂, de CH₄, de N₂O et de gaz synthétiques (HCF, PCF et SF₆) de 1900 à 2010.



Source: OFEV (2012b)

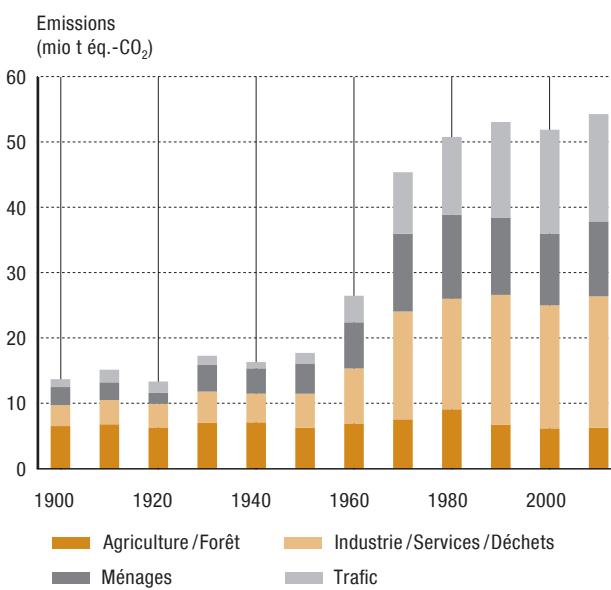
ments profonds intervenus dans la société et l'économie depuis plus d'un siècle.

La nette augmentation des émissions de CO₂ se manifeste à partir de 1950 sous le double effet de l'explosion du trafic routier et de la forte croissance économique (figure 15). En 20 ans, elles ont quadruplé. Le volume du trafic routier a énormément augmenté: le nombre de voitures de tourisme est passé d'environ 150 000 en 1950 à plus de 4 millions en 2011. Les prestations kilométriques des véhicules destinés au transport privé⁶, qui se situaient globalement autour de 2,9 milliards de véhicules-kilomètres en 1950, sont passées à près de 56 milliards de véhicules-kilomètres en 2010 (OFS 2012a). Bien que les émissions dues au transport de marchandises par la route ne cessent d'augmenter, les émissions du transport de personnes se sont stabilisées depuis 2000 (figure 5). Ceci est dû notamment aux progrès techniques (moteurs énergétiquement plus efficaces) et à une utilisation accrue de voitures de tourisme roulant au diesel. La croissance démographique et les exigences en matière de confort ont conduit à la multiplication du nombre de logements et, partant, à une consommation toujours plus importante de combustibles pour chauffer les volumes habitables.

Les émissions de CH₄ et de N₂O, deux gaz typiquement imputables à l'agriculture, ont augmenté depuis 1900 pour

Fig. 15 > Emissions de gaz à effet de serre par secteurs

Evolution des émissions de 1900 à 2010.



Source: OFEV (2012b)

sions sont causées, pour le CH₄, par l'augmentation des effectifs des animaux de rente, en particulier le cheptel bovin et, pour le N₂O, par l'intensification de la fertilisation des sols par l'utilisation d'engrais azotés. L'augmentation de la quantité de déchets mis en décharge et le passage du gaz de ville¹⁸ au gaz naturel ont intensifié les émissions de CH₄ entre 1970 et 1990. Le recul du cheptel bovin, surtout jusqu'en 2004, et les restrictions concernant l'utilisation des engrains minéraux et de ferme (cf. 3.1.5) ont largement contribué à la réduction des émissions de ces deux gaz depuis plus de 20 ans. Les émissions de CH₄ du secteur des déchets ont également diminué pendant cette même période. L'élimination des déchets par incinération a en effet permis de réduire les émissions provenant des déchets mis en décharge, tandis que les taux d'émission des décharges existantes ont été considérablement réduits, notamment grâce à la collecte et à la combustion du CH₄ des décharges et des stations d'épuration. Les émissions de N₂O des secteurs de l'industrie, des services et des déchets, dont la part cumulée atteint les 16 %, proviennent essentiellement de la production d'acide nitrique et de l'incinération des déchets.

années 1990, des CFC et des HCFC – des gaz synthétiques appauvrissant la couche d'ozone (figure 14). Toutefois, ces gaz ont un très fort potentiel de réchauffement global, 1000 à 24 000 fois supérieur à celui du CO₂, et persistent dans l'atmosphère durant des siècles ou des millénaires. Les gaz synthétiques sont principalement utilisés pour la réfrigération, les mousses synthétiques, l'isolation électrique, les solvants et les aérosols.

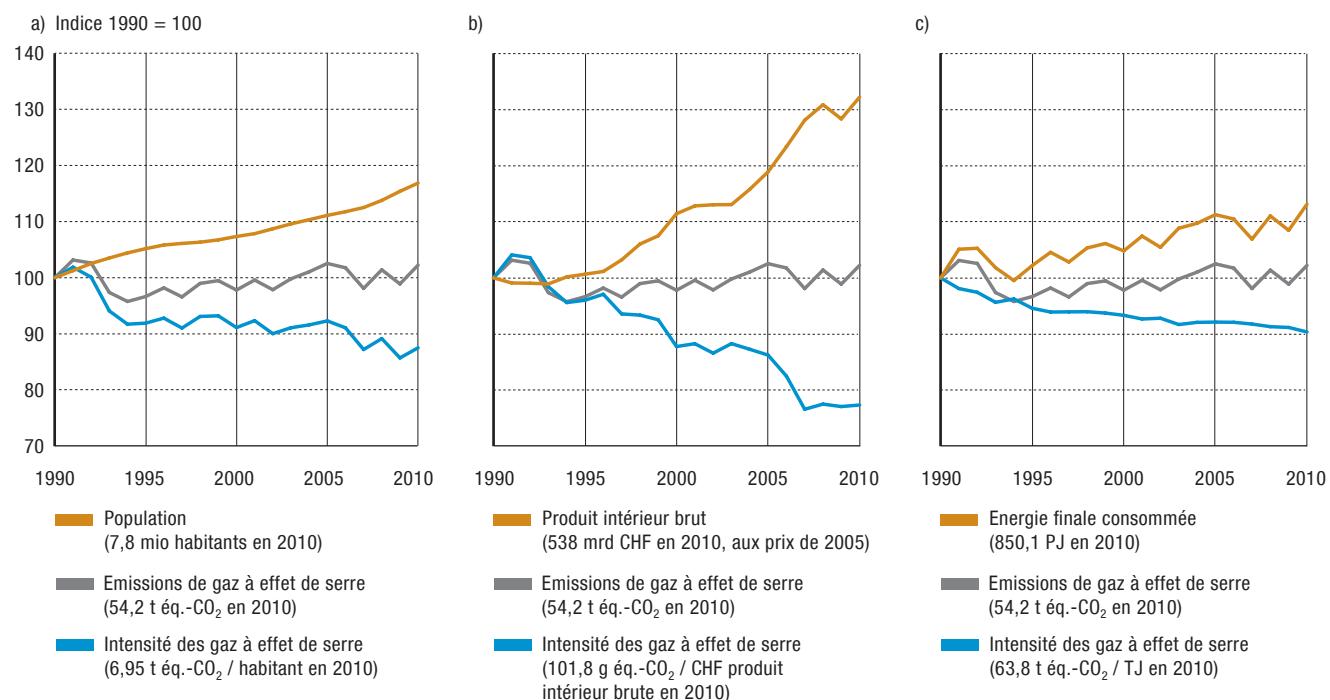
3.2.2 Intensité des gaz à effet de serre

L'intensité des émissions de gaz à effet de serre est déterminée par le rapport entre les émissions de gaz à effet de serre et différentes grandeurs socioéconomiques, telles que l'évolution de la population, du produit intérieur brut et de la consommation finale d'énergie (figure 16). L'intensité sectorielle des différents gaz est traitée au chapitre 3.1.

Malgré l'augmentation de la population, les émissions de gaz à effet de serre se sont maintenues à un niveau relativement stable depuis 1990. Les émissions de gaz à effet de serre par habitant sont ainsi en recul et sont passées de 7,95 en

Fig. 16 > Intensité des émissions de gaz à effet de serre

Emissions de gaz à effet de serre par rapport à a) la population, b) le produit intérieur brut et c) la consommation finale d'énergie (sans les émissions de l'aviation internationale) entre 1990 et 2010.



La croissance du produit intérieur brut¹⁹ n'a également pas conduit à une augmentation des émissions de gaz à effet de serre. On assiste à un découplage entre croissance économique et émissions de gaz à effet de serre. L'intensité des émissions par franc de produit intérieur brut a chuté de 23 % entre 1990 et 2010, passant de 132 à 102 grammes d'éq.-CO₂. Cette tendance est imputable à la tertiarisation (passage de l'économie d'une société industrielle à une société de services), à l'augmentation de l'efficacité énergétique et à l'externalisation de la production de biens énergivores (Confédération suisse 2009b).

Bien que la consommation finale d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre soient tous deux sensibles aux conditions climatiques, leur tendance diverge. L'intensité des émissions de gaz à effet de serre rapportée à la consommation d'énergie finale montre en effet une diminution, plus importante pendant la première décennie: -7 %, contre -3 %. Cette baisse est avant tout due à l'amélioration de l'efficacité énergétique, à l'utilisation accrue d'agents énergétiques non fossiles, au remplacement des combustibles pétroliers par le gaz naturel ainsi qu'à l'importance accrue de l'électricité (OFEN 2011a).

La tendance commune de ces trois indicateurs montre que l'intensité des émissions de gaz à effet de serre diminue. Cependant, les efforts doivent être maintenus afin de s'orienter vers un découplage absolu entre les émissions de gaz à effet de serre et la croissance économique. En d'autres termes, il faut parvenir non seulement à stabiliser les émissions, mais également à les réduire, malgré la croissance démographique, l'élévation du produit intérieur brut et l'augmentation de la consommation d'énergie finale.

3.2.3 Emissions de la Suisse en comparaison internationale

Les émissions de CO₂ dominent les émissions mondiales de gaz à effet de serre. En 2008, le CO₂ représentait 76 % des émissions globales de gaz à effet de serre, contre 16 % pour le CH₄, 6 % pour le N₂O et 2 % pour les gaz synthétiques (IEA 2011). Depuis 40 ans, les émissions anthropiques de CO₂ ont explosé (+80 %).

L'évolution des émissions de CO₂ est due, dans une très large mesure, à la consommation d'énergie fossile. Pour les pays de l'Annexe I²⁰, la part de l'énergie aux émissions de CO₂ oscille actuellement entre 90 % et 99 %. Dans les autres pays, cette part fluctue fortement et ne dépasse parfois pas 10 %. La déforestation représenterait 7 % des rejets globaux de CO₂.

Les émissions provenant de la combustion d'agents énergétiques fossiles des pays de l'Annexe I se maintiennent à un niveau relativement stable depuis 2000 et semblable à celui de 1990. Un fort recul a néanmoins été noté en 2009 (-6,4 % par rapport à l'année précédente) à cause de la crise écono-

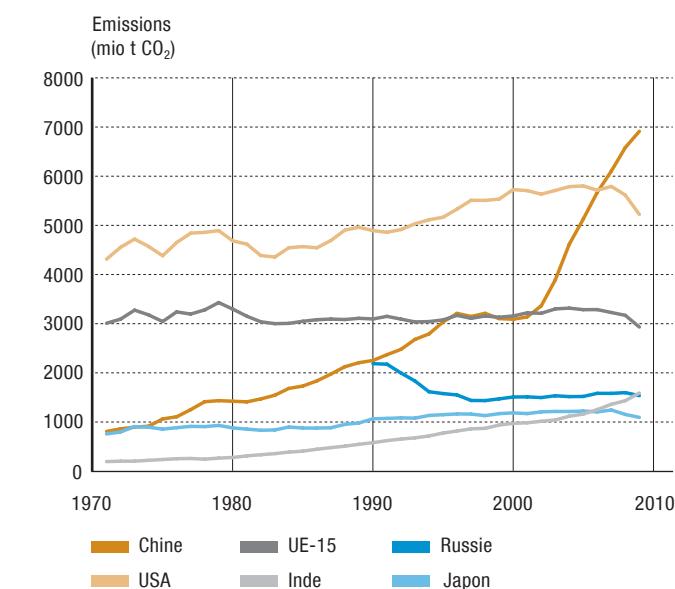
micale. Les émissions de CO₂ des pays de l'Annexe I ont augmenté de 10 % entre 1990 et 2009, alors qu'elles ont diminué de 10 % dans les autres pays.

L'analyse des émissions de CO₂ dues à la combustion des agents énergétiques fossiles (IEA 2011) entre 1990 et 2009 révèle que les 2/3 des émissions de CO₂ énergétique totales sont générées par les dix plus gros pays émetteurs de la planète. La Chine et les Etats-Unis totalisaient à eux seuls 41 % de ces émissions en 2009.

Les émissions de la Chine et de l'Inde ont progressé pendant cette période de manière très importante en raison de leur intégration économique et de la forte croissance du secteur de la production d'électricité et de chaleur (figure 17). L'augmentation de la production énergétique basée sur le charbon a conduit à une hausse marquée des émissions dans ces pays nouvellement industrialisés. Les émissions de CO₂ par habitant de ces pays émergents, respectivement de 5,1 et

Fig. 17 > Emissions de CO₂ énergétique au niveau international

Evolution des émissions générées par la combustion d'agents énergétiques fossiles entre 1990 et 2009 pour les cinq plus grands pays émetteurs, de même que pour l'Union européenne des quinze (UE-15).



Source: IEA (2011)

nettement inférieures à celles des Etats-Unis (16,9 tonnes de CO₂ par habitant).

En Russie, les émissions de CO₂ ont diminué de 35 % entre 1990 et 1998 en raison du déclin économique qui a suivi la dissolution de l'URSS. Depuis, les émissions de ce pays, malgré une très légère tendance à l'augmentation, se maintiennent à un niveau relativement constant.

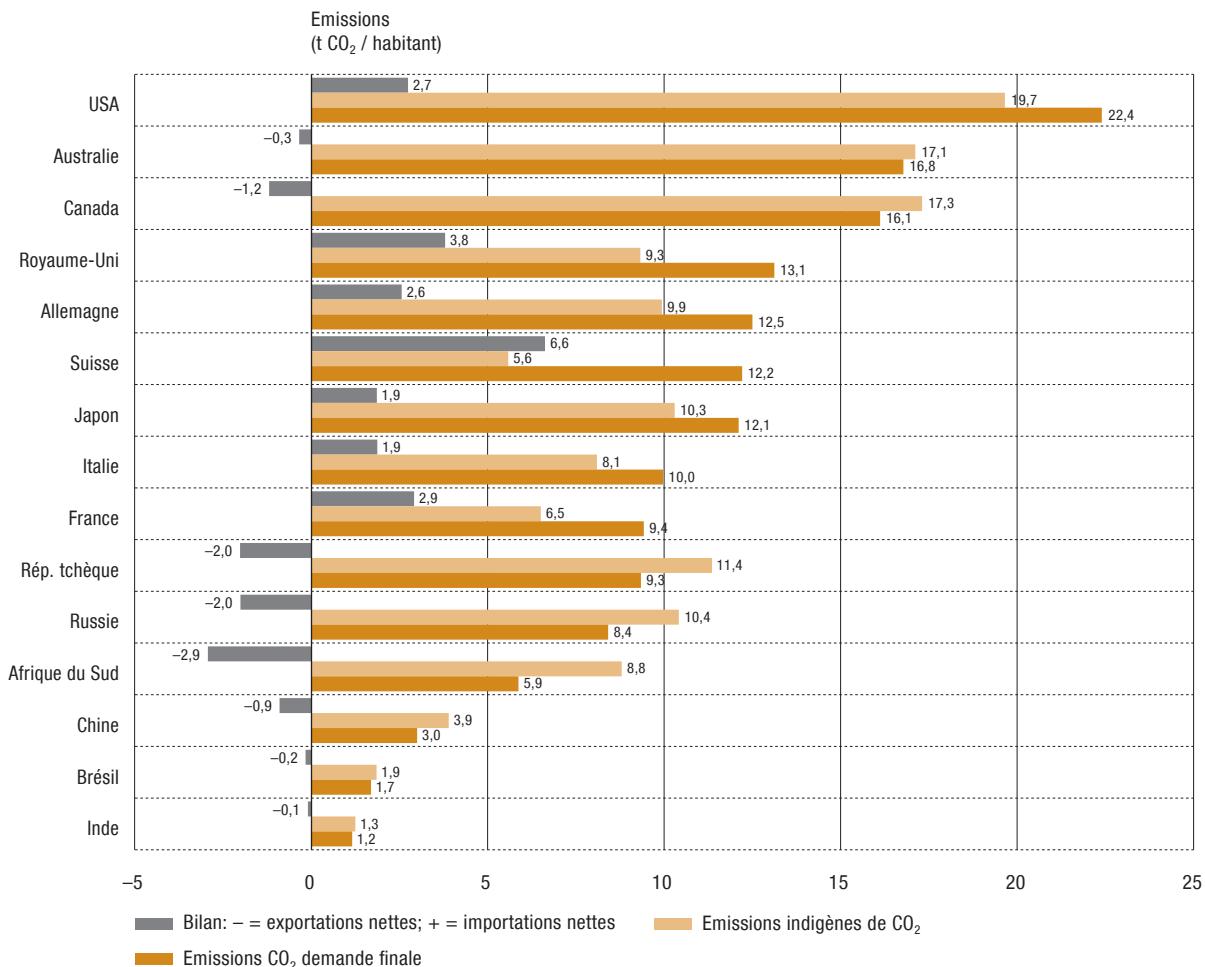
Les Etats-Unis, le Japon et les pays formant l'actuelle Union européenne des 15 (EU-15) étaient, en 1971, les plus grands émetteurs de CO₂ énergétique. Cette situation était principalement liée à une situation économique favorable (de

presque triple, mais les émissions n'ont subi en comparaison qu'une hausse de 21 % et 44 % respectivement. La tâche de réduction des émissions est plus ardue pour le Japon car l'intensité en CO₂ énergétique du produit intérieur brut a toujours été inférieure à celle des Etats-Unis.

Le Brésil n'apparaît pas dans ce graphique bien qu'il figure parmi les plus grands émetteurs de gaz à effet de serre au monde. En effet, ses émissions proviennent essentiellement du déboisement de forêts vierges, ce qui le place seulement au 18^e rang des pays générant le plus d'émissions énergétiques de CO₂.

Fig. 18 > Emissions de CO₂ par habitant en comparaison internationale (état: 2004)

Emissions de CO₂ par habitant correspondant à la production indigène, à la balance commerciale et à la demande finale dans différents pays en 2004 (les chiffres ne prennent en compte que les émissions dues à l'utilisation de carburants et de combustibles fossiles – mais sans les carburants utilisés dans les vols internationaux et les émissions dues à la production de ciment).



Les émissions qui sont déterminantes pour l'établissement du bilan national des gaz à effet de serre tel que défini dans le cadre du Protocole de Kyoto, sont de source indigène. La Suisse est cependant responsable d'émissions supplémentaires: comme nous importons de nombreux produits, une grande partie des émissions causées par notre consommation mais produites à l'étranger manque. Pour déterminer le bilan des émissions suisses de gaz à effet de serre causées par la consommation, il faut ajouter les émissions importées et déduire les émissions exportées.

Pour les économies nationales qui se caractérisent par l'importation de nombreux biens et services, le bilan national des émissions ne montre donc qu'une partie de la réalité: les émissions dues aux biens importés en Suisse apparaissent dans l'inventaire des gaz à effet de serre (CCNUCC 2012) du pays producteur. C'est la raison pour laquelle la Suisse affiche des émissions par habitant relativement faibles par rapport à d'autres pays industrialisés.

L'intégration de l'énergie grise dans le calcul des émissions augmente considérablement les émissions par habitant en Suisse (figure 18). En 2004, année pour laquelle on dispose de données permettant les comparaisons entre pays, les émissions totales par habitant, y compris les importations et exportations d'émissions dues au commerce de marchandises, se sont élevées à 12,2 tonnes de CO₂ en Suisse. Si l'on ne tient pas compte des émissions importées et exportées, ce chiffre se réduit à 5,6 tonnes de CO₂ (Peters et al. 2011). Dans ces calculs, seules les émissions de CO₂ énergétique ont été quantifiées. Les émissions d'autres gaz à effet de serre (p. ex. de CH₄ ou de N₂O) ne sont pas comprises. Etant donné sa part élevée d'importations et son haut niveau de consommation, la Suisse se situe dans la moyenne des pays de l'OCDE en ce qui concerne les émissions liées à la consommation par habitant. Les chiffres actualisés pour la Suisse jusqu'en 2008 sont disponibles dans le rapport de l'OFEV (2011).

Depuis le début des mesures en 1864, la température moyenne en Suisse a augmenté d'environ $0,12^{\circ}\text{C}$ par décennie, ce qui correspond à une augmentation de $1,7^{\circ}\text{C}$ sur l'ensemble de la période de mesure (1864–2011). La température des terres émergées de l'hémisphère nord a augmenté de $1,1^{\circ}\text{C}$ durant la même période. Cette hausse significative des températures est sans doute le signe le plus marquant des changements climatiques survenus au cours des dernières décennies. On retrouve ce signe de changement dans divers indicateurs climatiques liés aux températures, tels que la couverture neigeuse du Plateau ou le nombre d'années chaudes, de journées de canicule et de nuits tropicales. En revanche, aucune évolution significative n'a été observée en ce qui concerne les précipitations.

Fondements

Les données climatologiques sur les températures et les précipitations sont souvent présentées comme des écarts par rapport à une valeur de référence déterminée. Cette approche permet de comparer entre elles les données concernant différents pays et diverses altitudes. L'organisation météorologique mondiale (OMM) recommande à cet égard de choisir la période normale standard, qui correspond à la moyenne des années 1961 à 1990 (OMM 2007). Par souci de simplicité,

Les données climatologiques sont le fruit de mesures effectuées par le réseau de mesures de MétéoSuisse. Dans la mesure du possible, des données climatiques homogènes sont utilisées (Begert et al. 2005), c'est-à-dire des données qui sont corrigées des influences sans lien avec le climat et son évolution. Parmi ces influences figurent le déplacement de stations ou le remplacement d'instruments de mesure. Les indications sur la significativité d'une tendance reposent sur le 95^e centile.

3.3.1 Evolution des températures

La figure 19 montre l'écart des températures moyennes enregistrées en Suisse depuis 1864 par rapport à la période de référence. Les lignes grises et orange indiquent la tendance des températures pour deux périodes, 1864–2011 ($0,12^{\circ}\text{C}$ par décennie) et 1961–2011 ($0,38^{\circ}\text{C}$ par décennie). En comparaison, la ligne en traits tressés indique la tendance de la température des terres émergées de l'hémisphère nord pendant la période 1864–2011 ($0,07^{\circ}\text{C}$ par décennie).

Les années chaudes et très chaudes se sont répétées plus fréquemment vers la fin du XX^e et au début du XXI^e siècle. Depuis le milieu des années 1980, toutes les années ont été au-dessus de la valeur de la période de référence. Seize des

Fig. 19 > Températures annuelles moyennes en Suisse

Ecart des températures moyennes en Suisse pendant la période 1864–2011 par rapport à la période de référence 1961–1990. Ecarts annuels par rapport à la période de référence (barres verticales) et tendances générales (lignes).

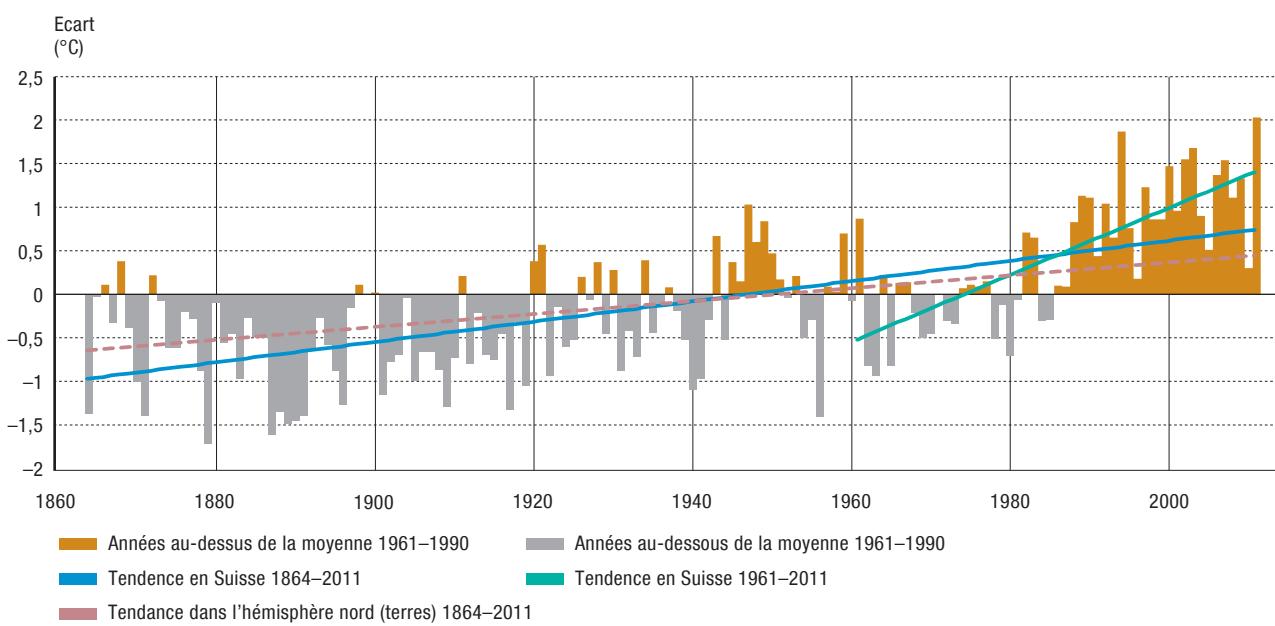
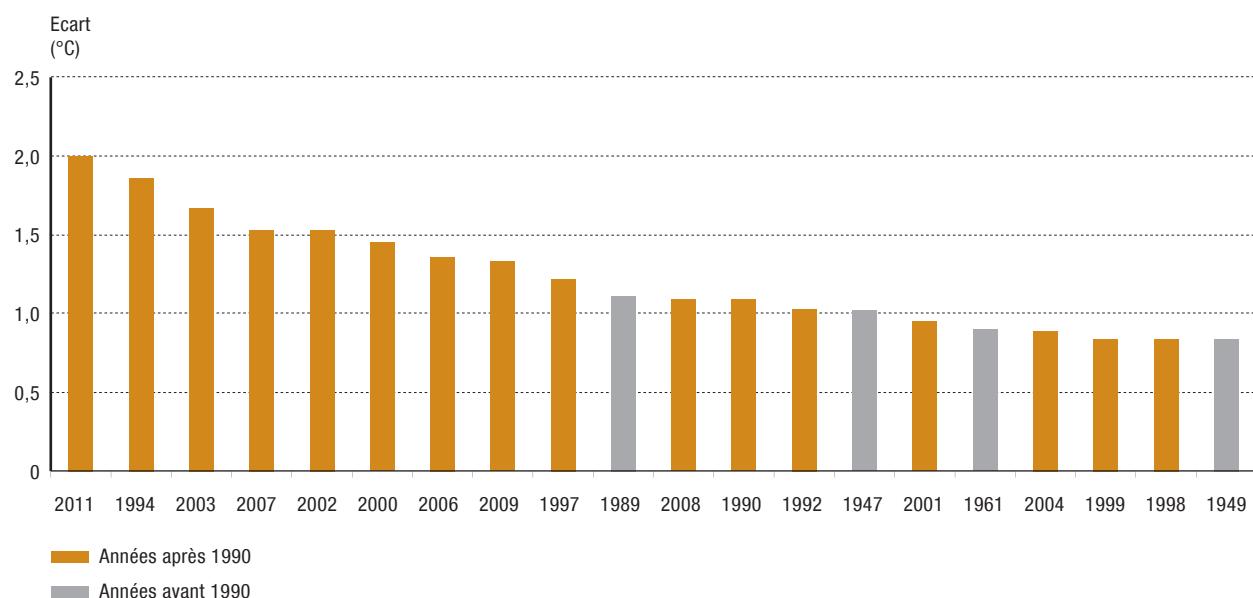


Fig. 20 > Les années les plus chaudes

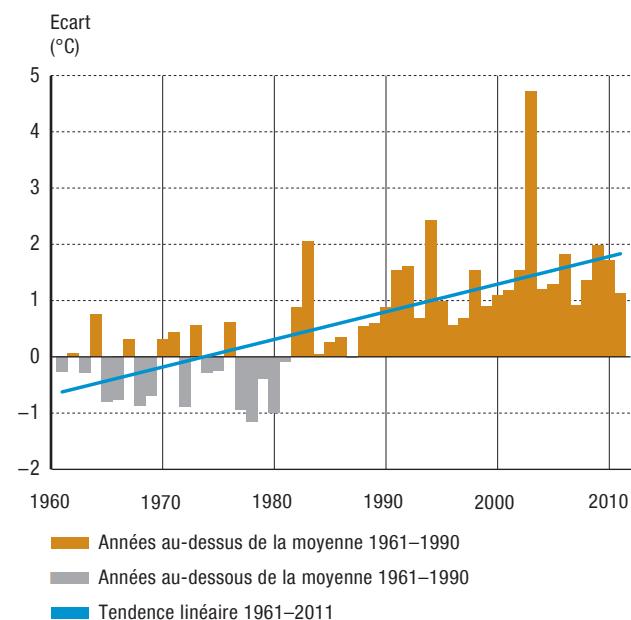
Classement des 20 années les plus chaudes depuis 1864. Les barres verticales indiquent l'écart (en °C) des températures annuelles moyennes par rapport à la valeur de la période de référence 1961–1990.



Source: MétéoSuisse (2012a)

Fig. 21 > Températures estivales

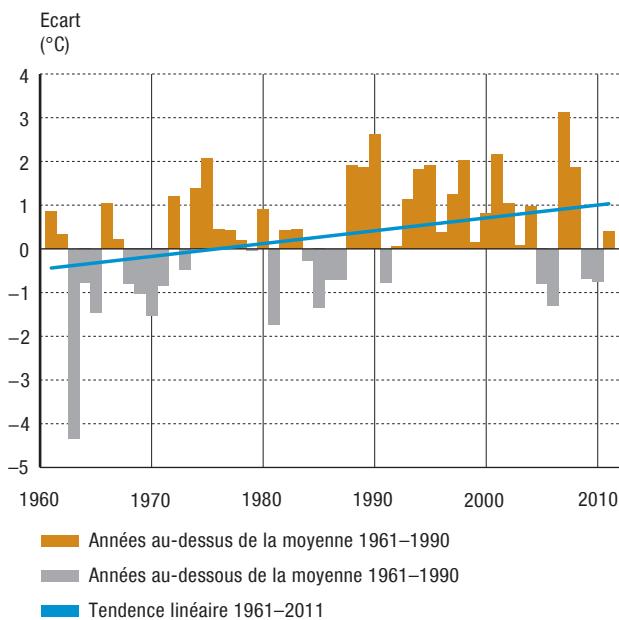
Ecart des températures estivales moyennes en Suisse par rapport à la période de référence 1961–1990.



Source: MétéoSuisse (2012a)

Fig. 22 > Températures hivernales

Ecart des températures hivernales moyennes en Suisse par rapport à la période de référence 1961–1990.



Source: MétéoSuisse (2012a)

Pour tous les indicateurs climatiques liés à l'évolution des températures présentés plus bas – qu'il s'agisse des températures minimales ou maximales, ou encore des jours de canicule ou de gel – on ne dispose de données homogènes qu'à partir de 1961. L'analyse des températures qui figure aux pages suivantes se focalise donc sur la période 1961–2011.

Du fait de l'augmentation de la fréquence des années chaudes et très chaudes à partir du milieu des années 1980, la hausse des températures annuelles moyennes en Suisse est particulièrement élevée si l'on ne prend en compte que les mesures effectuées après 1961. Pendant cette période, la hausse des températures a été à peu près trois fois plus rapide que pendant l'ensemble de la période de mesure qui a débuté en 1864 (figure 19). L'observation saisonnière de l'évolution des températures fait apparaître un changement supplémentaire: sur toute la période de mesure (soit de 1864 à 2011), la hausse des températures est plus forte en hiver ($0,13^{\circ}\text{C}$ par décennie) qu'en été ($0,10^{\circ}\text{C}$ par décennie). Par contre, les mesures effectuées à partir de 1961 montrent que les modifications du climat sont plus fortes en été qu'en hiver (respectivement $+0,49^{\circ}\text{C}$ et $+0,29^{\circ}\text{C}$ par décennie, figures 21 et 22).

Au cours des quelque 50 dernières années, les températures estivales ont donc augmenté d'environ $2,5^{\circ}\text{C}$ en Suisse,

dans les années à venir (GIEC 2007a). On s'attend à ce que la Suisse connaisse une hausse supplémentaire des températures de $1,7$ à $3,7^{\circ}\text{C}$ en été et de $1,3$ à $3,2^{\circ}\text{C}$ en hiver au cours des 50 prochaines années (jusqu'en 2060) par rapport à la période de référence 1980–2009, dans le cas où aucune mesure globale efficace d'intervention n'est appliquée (CH2011 2011).

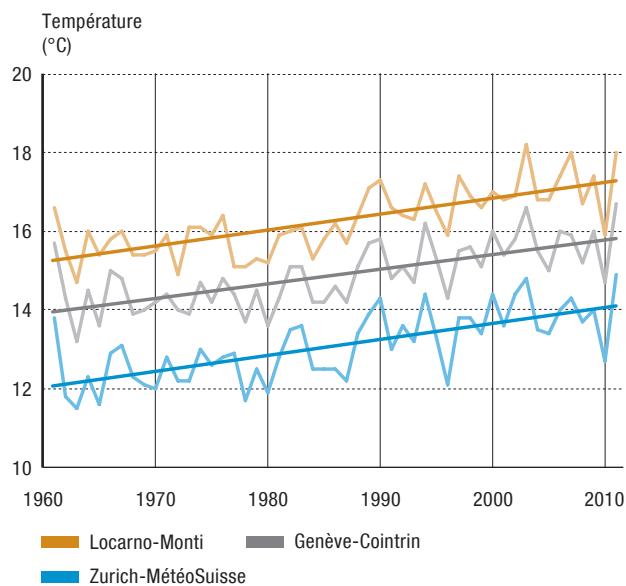
Dans l'examen de différents indicateurs climatiques liés aux températures qui figure aux pages suivantes, il n'est pas possible de procéder à une analyse portant sur l'ensemble du pays car ces indicateurs reflètent les propriétés des régimes climatiques régionaux et de l'altitude (p. ex. le nombre de jours de canicule n'est pas le même au nord qu'au sud des Alpes). Il n'est donc guère judicieux d'établir une moyenne pour l'ensemble de la Suisse. Les différentes régions climatiques de notre pays sont représentées par les stations de mesure de Locarno-Monti (sud de la Suisse, 367 m), Genève-Cointrin (ouest de la Suisse, 420 m) et Zurich-MétéoSuisse (nord-est de la Suisse, 556 m).

3.3.2 Températures journalières maximales et minimales

Avant l'automatisation, la température maximale ou minimale journalière était enregistrée au moyen de thermomètres spécifiques mesurant les maxima et les minima. Depuis l'au-

Fig. 23 > Maxima journaliers

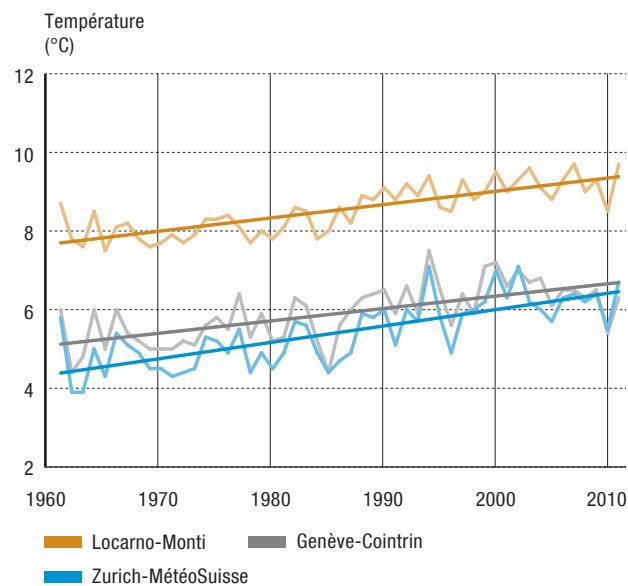
Moyennes annuelles des températures maximales journalières entre 1961 et 2011.



Source: MétéoSuisse (2012b)

Fig. 24 > Minima journaliers

Moyennes annuelles des températures minimales journalières entre 1961 et 2011.



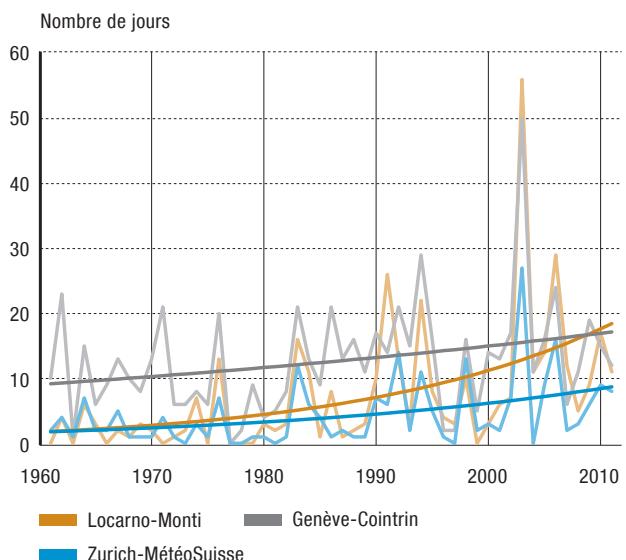
Source: MétéoSuisse (2012b)

temperature maximale journalière correspond donc à la température la plus haute mesurée au cours d'une journée à des intervalles de 10 minutes, la température minimale à la température la plus basse mesurée aux mêmes intervalles.

L'évolution des températures maximales et minimales journalières à Locarno-Monti, Genève et Zurich pendant la période allant de 1961 à 2011 est indiquée à la figure 23 et à la figure 24 (moyennes annuelles des maxima et minima journaliers). L'utilisation de valeurs absolues (plutôt que d'écart par rapport à la valeur de la période de référence) permet ici de mettre en évidence les différences entre les conditions climatiques qui règnent dans les trois régions. Conformément aux attentes, le site du sud de la Suisse, situé à basse altitude, présente les températures maximales les plus élevées, et le site du nord-est de la Suisse, qui est situé à une altitude légèrement plus élevée, les températures maximales les plus basses. Les mêmes tendances apparaissent néanmoins dans les trois régions. La moyenne annuelle des températures maximales journalières a augmenté d'environ $0,4^{\circ}\text{C}$ par décennie sur les trois sites au cours des 50 dernières années. La moyenne annuelle des températures minimales journalières suit un schéma d'évolution similaire (figure 24) puisqu'elle s'élève de $0,3$ à $0,4^{\circ}\text{C}$ par décennie.

Fig. 25 > Jours de canicule

Nombre de jours par an où la température maximale est d'au moins 30°C .



Source: MétéoSuisse (2012b)

moyennes) a également augmenté de $0,4^{\circ}\text{C}$ par décennie sur les trois sites. Il apparaît donc que les températures maximales, minimales et moyennes ont augmenté parallèlement sur tous les sites pendant la période allant de 1961 à 2011.

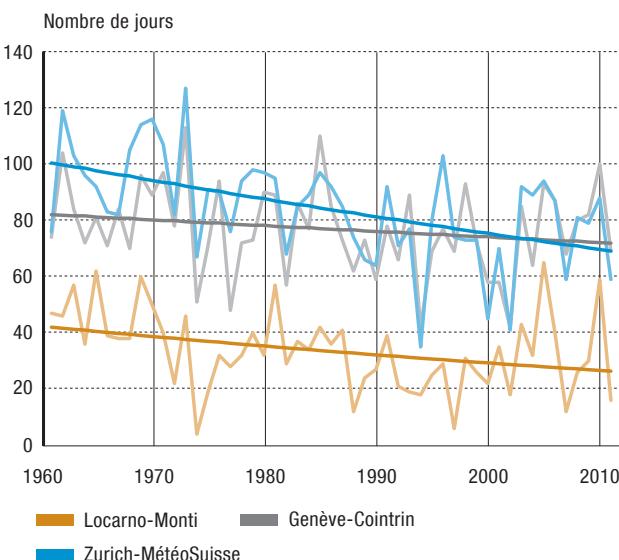
3.3.3 Jours de canicule et de gel, nuits tropicales et jours de dégel

Par jours de canicule, on entend les journées où la température maximale est d'au moins 30°C . Les jours de gel, la température minimale passe en dessous de 0°C . Lors des nuits tropicales, les températures ne descendent pas au-dessous de 20°C . Au sens strict, on ne peut donc utiliser que les minima nocturnes pour l'analyse des nuits tropicales. L'indicateur «nuit tropicale» de l'OMM utilise toutefois, pour simplifier, la température minimale mesurée sur 24 h (température minimale journalière). Les jours de dégel, le thermomètre ne descend pas au-dessous de 0°C .

Le nombre de jours de canicule a augmenté au cours des dernières décennies (figure 25). Au Tessin, on comptait en moyenne un à deux jours de canicule par an dans les années 1960, alors qu'il y en a entre quinze et vingt aujourd'hui. L'accroissement s'est donc fait au rythme de quatre jours de canicule supplémentaires par décennie. Sur les sites de mesure de Genève et Zurich, l'augmentation s'est faite au rythme

Fig. 26 > Jours de gel

Nombre de jours par an où la température minimale est inférieure à 0°C .



Source: MétéoSuisse (2012b)

nees de canicule par an que Lugano, alors que Zurich en a à peine dix. Quant à la canicule de l'été 2003, elle apparaît sous forme de pic dans la figure 25. Selon l'étude CH2011 (CH2011 2011), la tendance à l'augmentation du nombre de journées de canicule devrait se poursuivre au cours du XXI^e siècle, et la hausse des températures maximales journalières aller croissant.

Le nombre de jours de gel a diminué de façon significative depuis les années 1960 sur les sites de Locarno-Monti et Zurich (figure 26). A Locarno-Monti, on compte une diminution de deux jours de gel par décennie, à Zurich de six. Sur le site de Genève, il n'a pas été observé de diminution significative des jours de gel. L'étude CH2011 part du principe que le nombre de jours extrêmement froids diminuera dans les décennies à venir.

Les nuits tropicales (figure 27) sont extrêmement rares au nord des Alpes et elles n'ont que modérément augmenté depuis les années 1960. On n'observe pas là de changements significatifs. Au sud des Alpes, on enregistre une augmentation de deux à trois nuits tropicales par décennie. La hausse survenue depuis le début des années 1980 est cependant frappante. Pendant la canicule de l'été 2003, on a même observé 40 nuits tropicales à la station de Locarno-Monti (figure 27,

affaiblies physiquement. Le nombre de nuits tropicales devrait s'accentuer à l'avenir.

Les jours de dégel ont été plus fréquents au cours des dernières années. Cet accroissement a un impact particulièrement important dans les régions alpines de haute altitude. L'augmentation du risque de dégel menace la stabilité des zones de pergélisol, ce qui peut non seulement entraîner des chutes de pierres et des éboulements (cf. 3.4.2), mais aussi réduire la qualité de l'ancrage dans le sol d'installations comme les téléphériques.

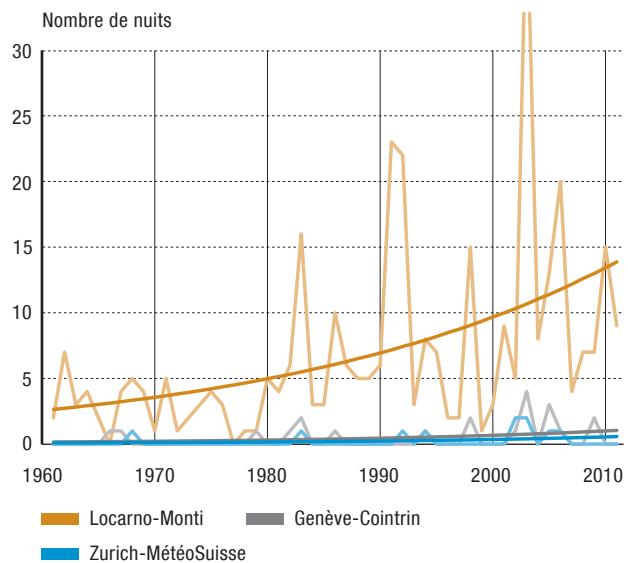
La figure 28 présente l'évolution des jours de dégel au Säntis (2502 m), au Weissfluhjoch (2690 m) et au Jungfraujoch (3580 m). Les altitudes à partir d'environ 2500 m jusqu'à 3000 m sont considérées comme particulièrement touchées par le processus de fonte du pergélisol. Au Weissfluhjoch, on observe une augmentation de six à sept jours de dégel par décennie. Au Säntis, l'augmentation se situe entre quatre et cinq jours par décennie et au Jungfraujoch entre deux et trois jours par décennie.

3.3.4 Evolution des précipitations

Si l'évolution des températures est très similaire dans les différentes parties de la Suisse, ce qui justifie l'établissement

Fig. 27 > Nuits tropicales

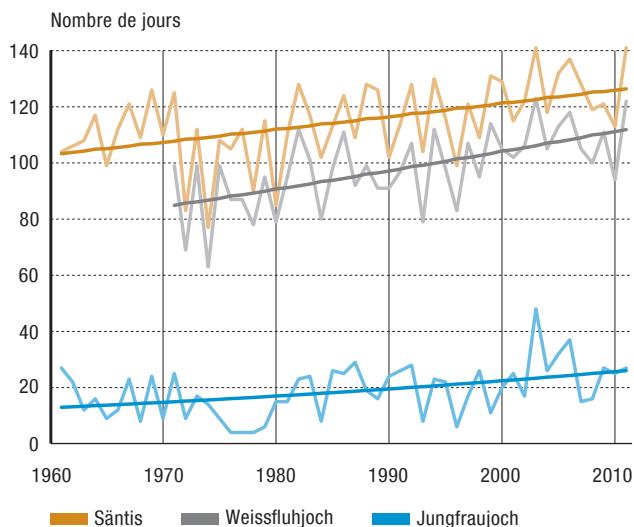
Nombre de nuits par année où la température dépasse 20 °C.



Source: MétéoSuisse (2012b)

Fig. 28 > Jours de dégel

Nombre de jours par an où la température minimale journalière est supérieure à 0 °C.



Source: MétéoSuisse (2012b)

Fig. 29 > Cumul annuel des précipitations au nord de la Suisse

Rapport des précipitations annuelles à la moyenne de la période de référence 1961–1990.

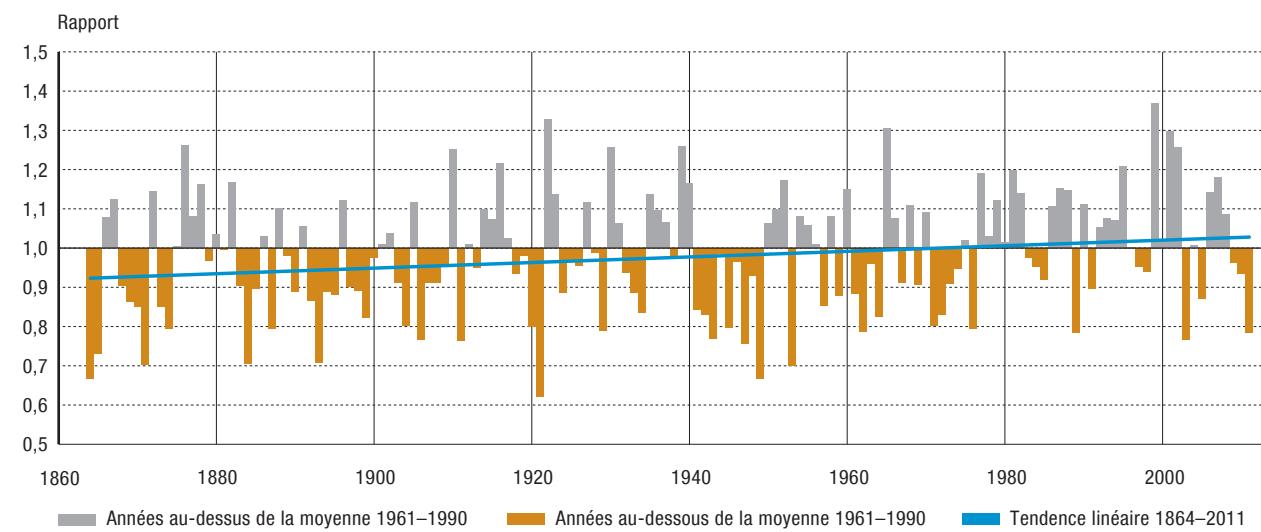


Fig. 30 > Cumul annuel des précipitations au sud de la Suisse

Rapport des précipitations annuelles à la moyenne de la période de référence 1961–1990.

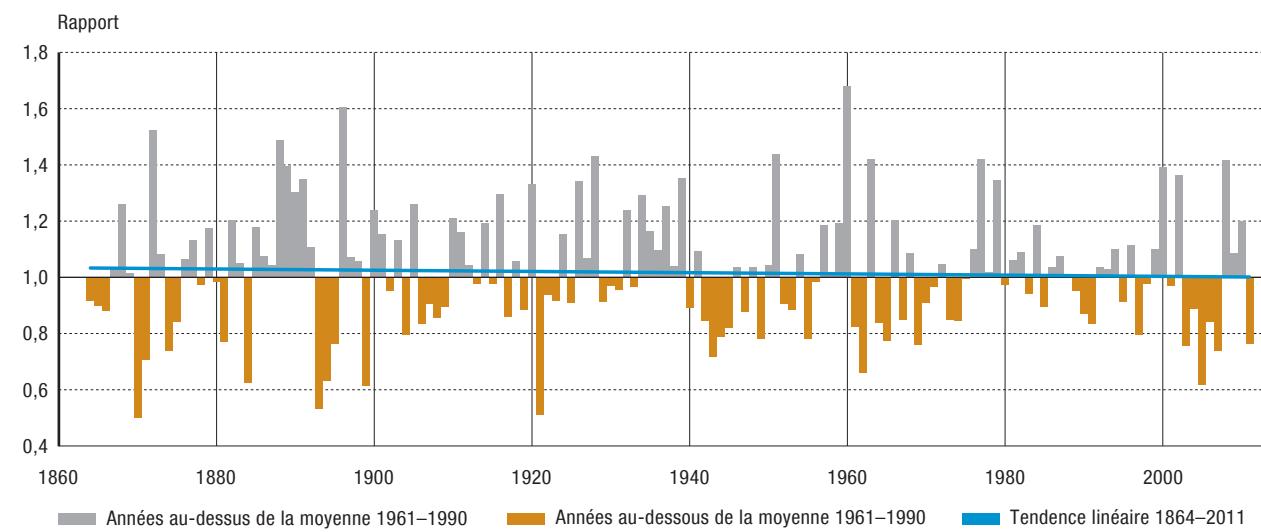


Fig. 31 > Jours de fortes précipitations dans le nord de la Suisse

Nombre de jours de fortes précipitations par saison à la station de mesure de Zurich pendant les semestres a) d'hiver et b) d'été de la période allant de 1864 à 2011.

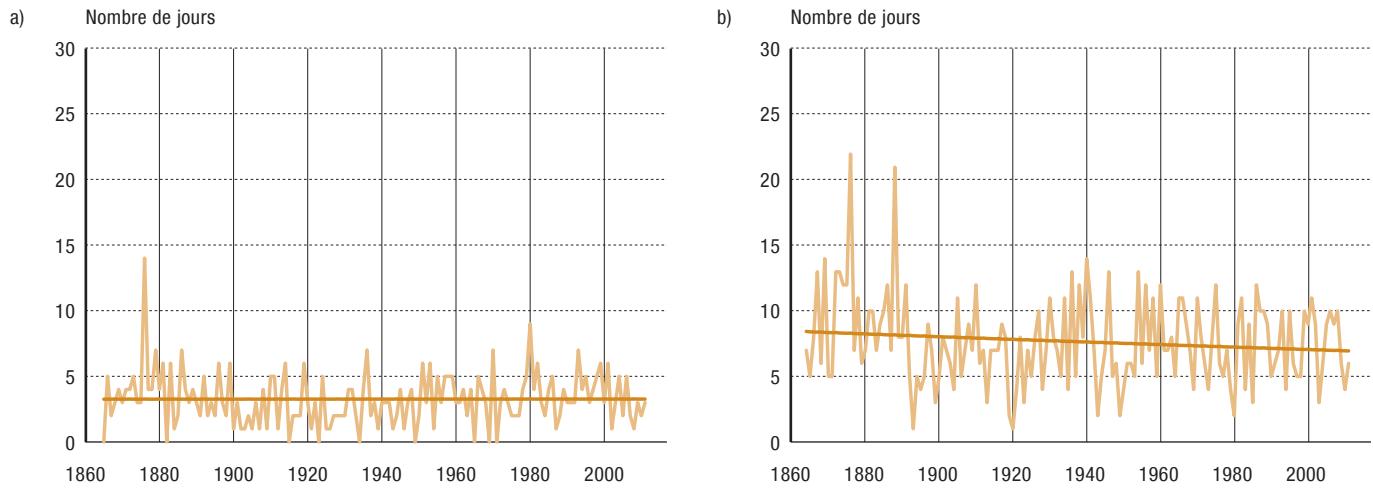
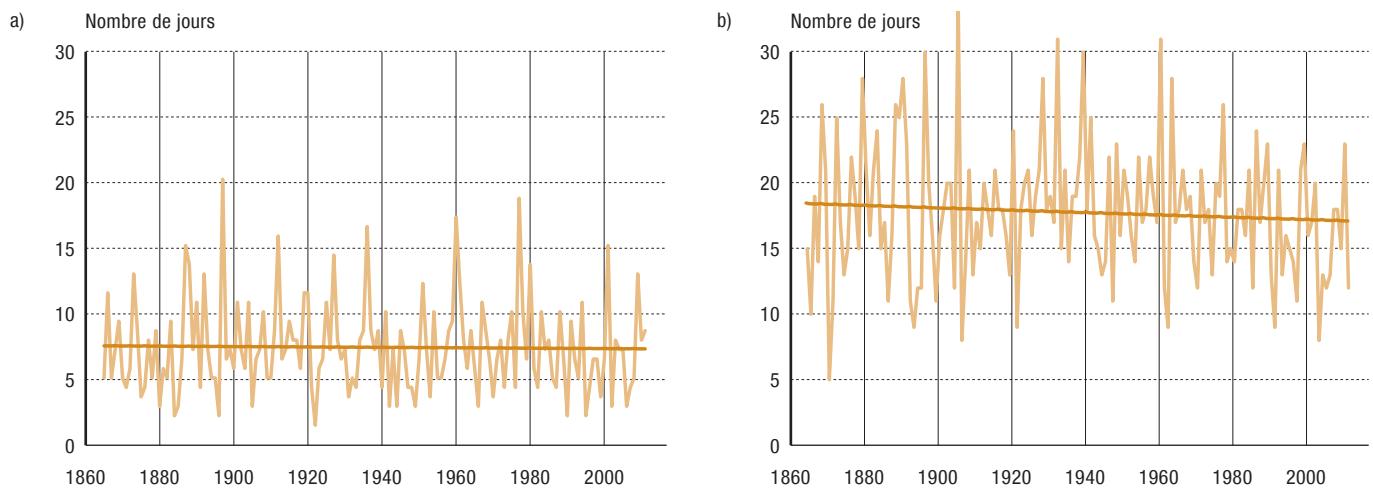


Fig. 32 > Jours de fortes précipitations dans le sud de la Suisse

Nombre de jours de fortes précipitations par saison à la station de mesure de Lugano pendant les semestres a) d'hiver et b) d'été de la période 1864 – 2011.



ce qui concerne les précipitations. Si l'on présentait globalement l'évolution des précipitations pour l'ensemble du pays, on gommerait les différences régionales. C'est pourquoi il a été choisi d'analyser séparément le nord de la Suisse (moyenne des stations de mesure de Genève, Berne, Bâle et Zurich) et le sud de la Suisse (station de mesure de Lugano).

L'évolution du cumul annuel des précipitations pendant la période 1864–2011 montre une augmentation significative de 0,7 % par décennie dans le nord de la Suisse (figure 29). Sur le Plateau, le cumul annuel des précipitations est d'environ 1000 mm. Il apparaît donc que le cumul annuel des précipitations a augmenté d'un peu plus de 100 mm depuis 1864, ce qui signifie qu'aujourd'hui le Plateau reçoit chaque année l'équivalent d'un mois de précipitations de plus qu'il y a 150 ans. Si l'on ventile les chiffres par saison, une augmentation significative de 2 % par décennie n'apparaît qu'en hiver. Il n'y a pas de modification des précipitations pour les autres saisons. Si l'on ne tient compte que de la période qui a débuté en 1901, aucun changement significatif n'est observable pour le Plateau, que ce soit dans le cumul annuel ou saisonnier des précipitations. Dans le sud de la Suisse, aucune modification significative des précipitations n'est observée pendant la période 1864–2011, tant en ce qui concerne les cumuls annuels que les cumuls saisonniers (figure 30).

3.3.5 Fortes précipitations

La notion de «fortes précipitations» utilisée ici sur la base du seuil >20 mm ne doit pas être assimilée à celle de précipitations extrêmes, qui sont rares. Des précipitations journalières de 20 mm sont enregistrées plusieurs fois par an dans la plupart des régions de Suisse. Il s'agit donc d'épisodes relativement fréquents. On peut par exemple qualifier de rare un épisode de précipitations qui ne se produit que tous les dix ans, voire plus rarement. C'est le cas à Berne à partir d'environ 65 mm de précipitations journalières, à Sion à partir de 50 mm, à Davos à partir de 70 mm et à Lugano à partir de 130 mm. Dégager des tendances sur la base des événements extrêmes présente toutefois des limites de principe en raison de la rareté des événements en question. Les événements extrêmes ne constituent donc pas de bons indicateurs des changements climatiques de sorte que le sujet n'est pas traité dans le présent rapport.

La figure 31 et la figure 32 montrent l'évolution saisonnière du nombre de jours de fortes précipitations aux stations de mesure de Zurich (nord de la Suisse) et de Lugano (sud de la Suisse) entre 1864 et 2011 pendant le semestre d'hiver et le semestre d'été. L'analyse montre clairement, d'une part, que les fortes précipitations sont beaucoup plus fréquentes au sud des Alpes et, d'autre part, que de telles précipitations

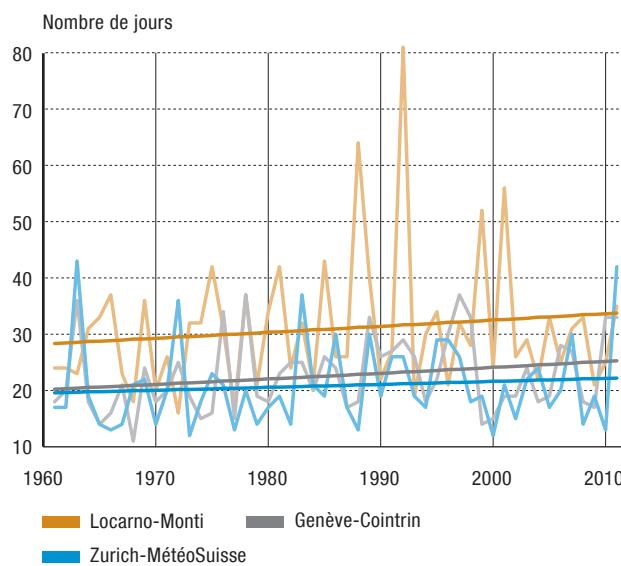
cotes des Alpes, aucune tendance significative indiquant une hausse ou une baisse du nombre de jours de fortes précipitations n'a pu être observée, quel que soit le semestre considéré. Les quatre saisons ne permettent pas non plus de dégager une telle tendance.

3.3.6 Périodes de sécheresse

Un éventuel allongement des périodes de sécheresse aurait des répercussions importantes, en particulier sur l'agriculture. L'évolution du nombre maximal de jours consécutifs sans précipitations (ou du moins notables, <1 mm) (figure 33) constitue un paramètre simple permettant de déceler un tel allongement. Pour le semestre d'été, les sites de Locarno-Monti, Genève et Zurich indiquent que les périodes de sécheresse tendent à s'allonger de 0,5 à 1 jour par décennie, ce qui correspond à un allongement de 10 à 20 % sur toute la période. On n'observe toutefois aucune tendance significative et il faut tenir compte de la variabilité très forte d'une année à l'autre. Les scénarios climatiques indiquent qu'il faut s'attendre à une nette augmentation des périodes de sécheresse, tout spécialement en été, au cours de la seconde moitié du XXI^e siècle (CH2011 2011).

Fig. 33 > Périodes de sécheresse

Nombre maximal de jours consécutifs sans précipitations notables pendant la période 1961–2011.



Source: MétéoSuisse (2012b)

2004, OFEV et al. 2004, Schorer 1992). Comme dans le cas des précipitations extrêmes, la mise en évidence de tendances se heurte à des limites de principe en raison de la rareté de ce type d'épisodes (Frei et Schär 2001). Les périodes de sécheresse extrême ne constituent donc pas de bons indicateurs pour les changements climatiques.

3.3.7 Chutes de neige et couverture neigeuse

La quantité de neige fraîche et le nombre de jours de couverture neigeuse sont liés par des mécanismes complexes à la température et aux précipitations. Le paramètre climatique qu'est la neige réagit donc avec une grande sensibilité aux modifications à long terme des conditions de températures et de précipitations en hiver (Beniston 1997, Laternser et Schneebeli 2003, Marty 2008, Scherrer et al. 2004).

L'élévation de la limite du zéro degré pendant les mois d'hiver (décembre, janvier, février) à raison de 70 m par décennie au cours des 50 dernières années (Scherrer et al. 2004) est une conséquence directe de la hausse des températures. De

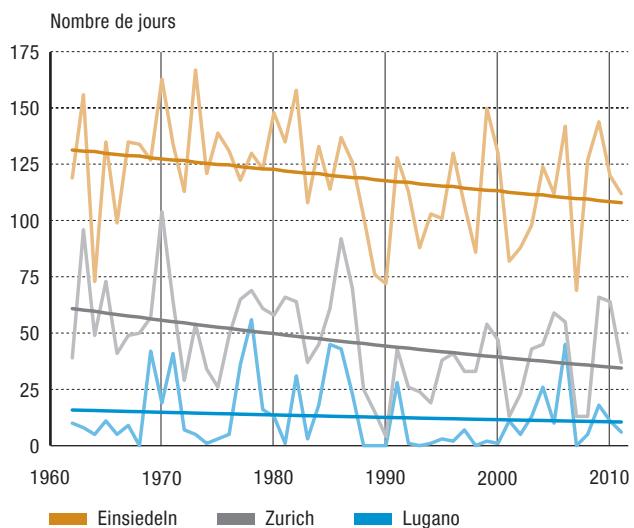
problématique est moins marquée car on reste le plus souvent au-dessus de la limite des chutes de neige, malgré l'élévation des températures hivernales.

L'élévation des températures et de la limite du zéro degré en hiver entraîne une diminution du nombre de jours de couverture neigeuse (figure 34) et des sommes de neige fraîche (figure 35). La diminution du nombre de jours de couverture neigeuse est de quatre à cinq jours par décennie sur le site d'Einsiedeln (910 m) et de cinq à six jours par décennie sur le site de Zurich (556 m). Aucune tendance significative n'a pu être observée sur le site de Lugano (273 m). La baisse des sommes de neige fraîche est d'environ 34 cm par décennie sur le site d'Einsiedeln et d'environ 12 cm par décennie sur le site de Zurich. Il n'a pas non plus été constaté de tendance significative sur le site de Lugano.

La figure 36 indique les tendances sur 20 ans en matière de jours d'enneigement à différentes altitudes. En effet, pour chacune des 71 stations et chacune des fenêtres temporelles de 20 ans (1864–1883, 1865–1884, 1866–1885, ..., 1991–2010,

Fig. 34 > Jours d'enneigement

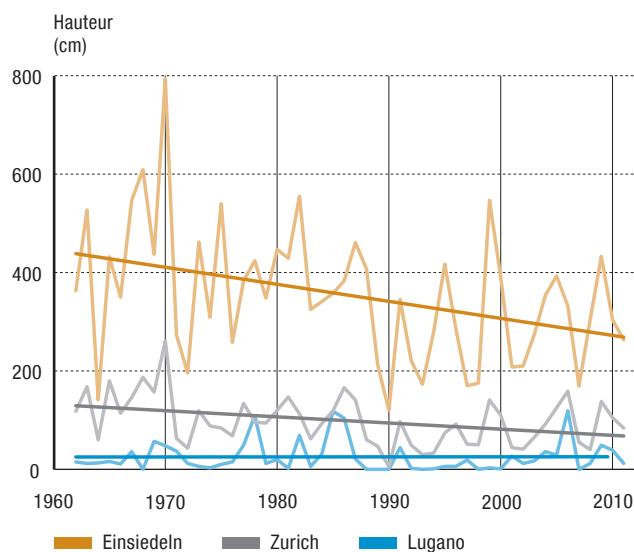
Nombre de jours pendant lesquels la couverture neigeuse est ≥ 1 cm (par année hydrologique, soit d'octobre à septembre) pour la période 1961–2011.



Source: MétéoSuisse (2012b)

Fig. 35 > Quantité de neige fraîche

Sommes de neige fraîche en cm (par année hydrologique, soit d'octobre à septembre) pour la période 1961–2011.



Source: MétéoSuisse (2012b)

cercle est proportionnelle à la tendance en jours par dix ans. Ici aussi, on voit clairement que les tendances sont fortement négatives vers la fin du XX^e siècle aux altitudes inférieures à 2000 m pour lesquelles on dispose de séries de mesures (cercles orange). Un léger rétablissement est apparu tout récemment à basse altitude surtout (cercles gris).

La hausse des températures hivernales et l'incertitude concernant les conditions d'enneigement qui en découle constituent un défi majeur pour les régions des Préalpes dans lesquelles le tourisme d'hiver joue un rôle important. La limite d'enneigement devrait s'élever de 350 m au plus d'ici 2050 (OcCC/ProClim- 2007). Pour les stations de sports d'hiver situées au-dessous de 1500 m, il sera difficile de maintenir l'exploitation des domaines skiables.

3.3.8 Limite du zéro degré

L'élévation de la limite du zéro degré constitue une mesure facilement compréhensible du réchauffement climatique et de l'élévation de la limite des chutes de neige. La figure 37 in-

deux saisons, a raison de 60 m par décennie en hiver et de près de 75 m par décennie en été. La fourchette de variation de la limite du zéro degré d'une année à l'autre est nettement plus grande en hiver qu'en été. Au vu de la hausse des températures attendue pour les décennies à venir, il faut partir du principe que l'élévation de la limite du zéro degré se poursuivra à peu près au même rythme à l'avenir.

3.3.9 Durée d'ensoleillement

La durée d'ensoleillement est un paramètre essentiel notamment pour la perception du temps qu'il fait. Elle a fortement diminué dans la plupart des stations jusque vers 1980, puis a en général de nouveau fortement augmenté (figure 38). De 1980 à 2011, la durée d'ensoleillement est ainsi passée de 250 à 400 heures par station, augmentant de quelque +20 % à Genève et Zurich et de quelque +10 % à Locarno-Monti. Sur la période de 50 ans, on observe une légère augmentation.

Etant donné que la durée d'ensoleillement dépend directement de la couverture nuageuse, la cause des périodes à

Fig. 36 > Tendances actuelles en matière de jours d'enneigement

Tendances glissantes sur 20 ans pour les jours où la couverture neigeuse est ≥ 1 cm selon les mesures effectuées par 71 stations MétéoSuisse situées à différentes altitudes pendant la période allant de 1864/1865 à 2011/2012. Les tendances sont tracées en tenant compte de l'altitude de la station à la fin de chaque période de 20 ans (p. ex. en 2000 pour la période 1981–2000). Les cercles gris indiquent une augmentation des jours de couverture neigeuse, les cercles orange une diminution. Les tendances significatives sont en gras.

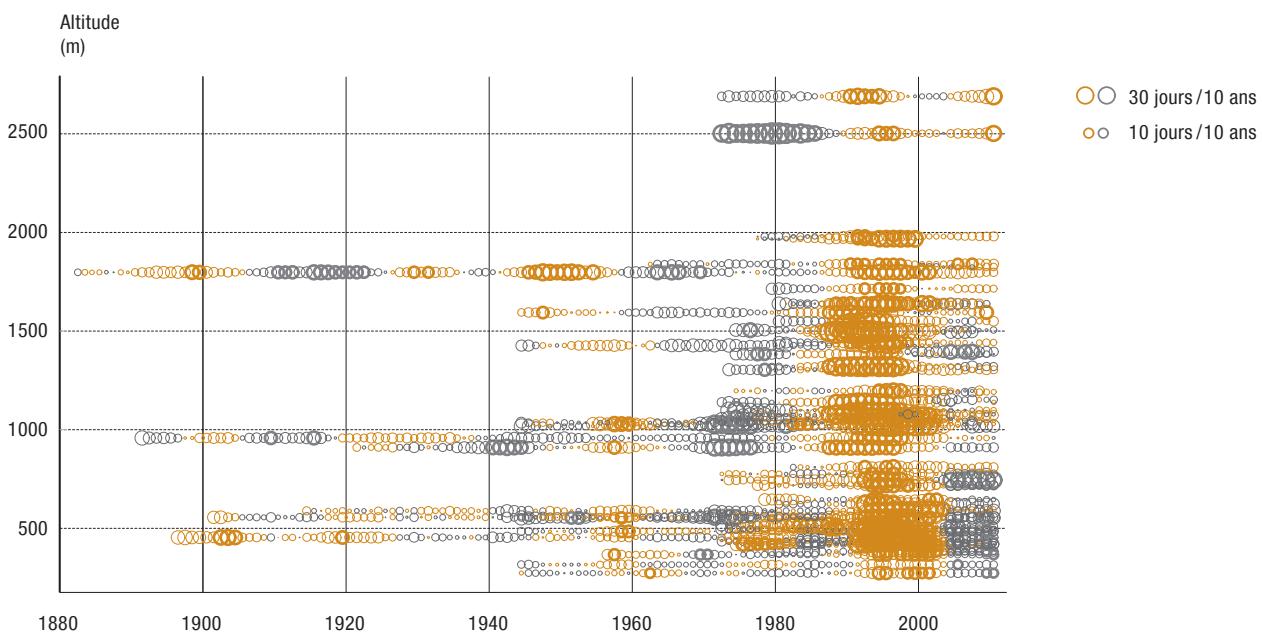
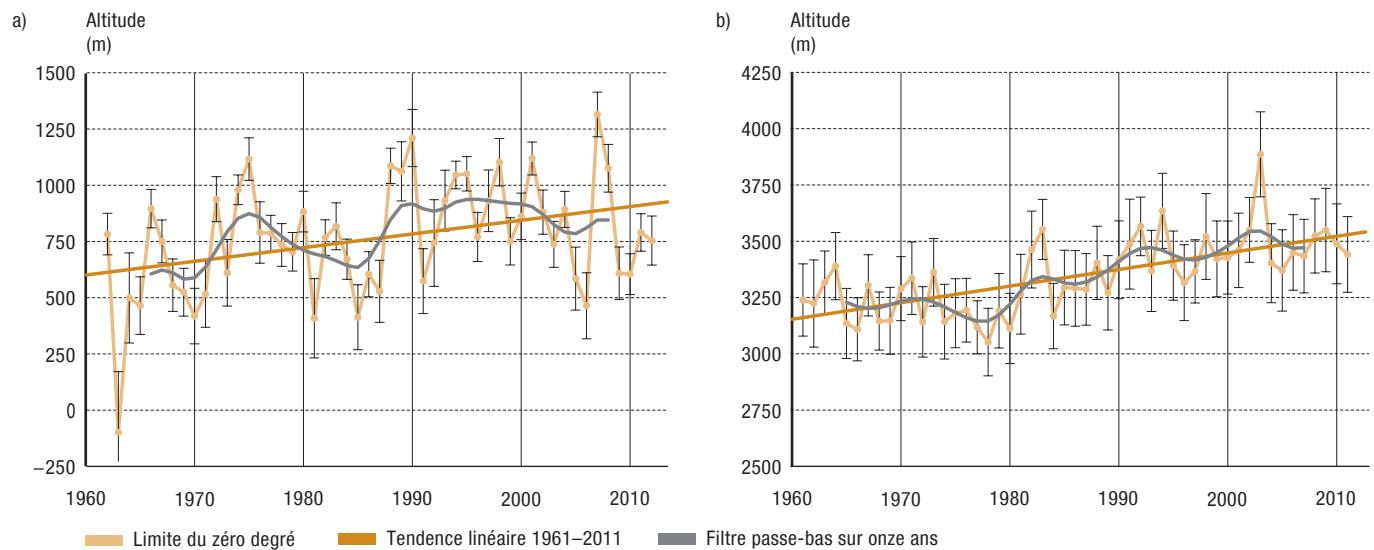


Fig. 37 > Evolution de la limite du zéro degré

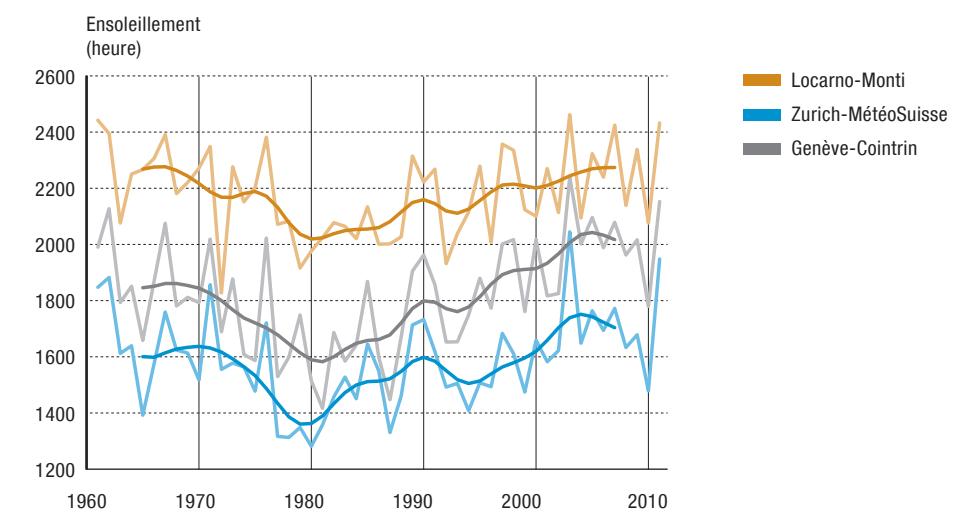
Evolution de la limite du zéro degré a) en hiver et b) en été déterminée au moyen de données de température homogènes fournies par 28 stations au sol de MétéoSuisse pendant la période allant de 1961/1962 à 2011/2012. Pour chaque année, les incertitudes liées à la détermination de la limite du zéro degré sont représentées par des barres d'erreur (lignes verticales).



Source: MétéoSuisse (2012a)

Fig. 38 > Durée d'ensoleillement

Durée d'ensoleillement en heures par année civile et évolution selon un filtre passe-bas (filtre gaussien sur onze ans) pour la période 1961–2011.



Source: MétéoSuisse (2012b)

est clair que les périodes pendant lesquelles la durée d'ensoleillement est faible et la couverture nuageuse relativement importante sont sous l'influence des basses pressions (plus grande fréquence ou plus longue durée des perturbations), et que les périodes pendant lesquelles la durée d'ensoleillement est importante et la couverture nuageuse faible essentiellement sous l'influence des zones de hautes pressions. D'autre part, la présence de brouillard dans les stations de mesure de basse altitude, pendant les mois les plus froids de l'année en particulier, a des effets sur la durée d'ensoleillement annuelle de ces stations.

Le réchauffement du climat est depuis longtemps désigné comme responsable de la fonte des glaciers alpins. Néanmoins, il existe nombre d'autres indicateurs qui reflètent les conséquences des changements climatiques sur l'environnement naturel de la Suisse. L'eau des rivières et des lacs se réchauffe, le pergélisol fond, la végétation subit des modifications de sa phénologie, les oiseaux et les plantes migrent. Indirectement, une pression plus ou moins forte peut aussi être observée sur la société et l'économie. Les besoins en chauffage diminuent, ceux en climatisation augmentent et les conditions d'enneigement des stations de sports d'hiver de basse altitude se dégradent. Il est possible que les changements climatiques exercent aussi des effets sur la santé, comme par exemple sur les maladies respiratoires (asthme, allergies au pollen), les maladies qui sont exacerbées par la pollution de l'air, les maladies liées à la propagation d'insectes ou de tiques infectés, ou celles liées à des épisodes de canicule. Mais les séries de données sont souvent trop courtes pour établir avec certitude des liens de causalité.

3.4.1 Hydroosphère

Débit des cours d'eau

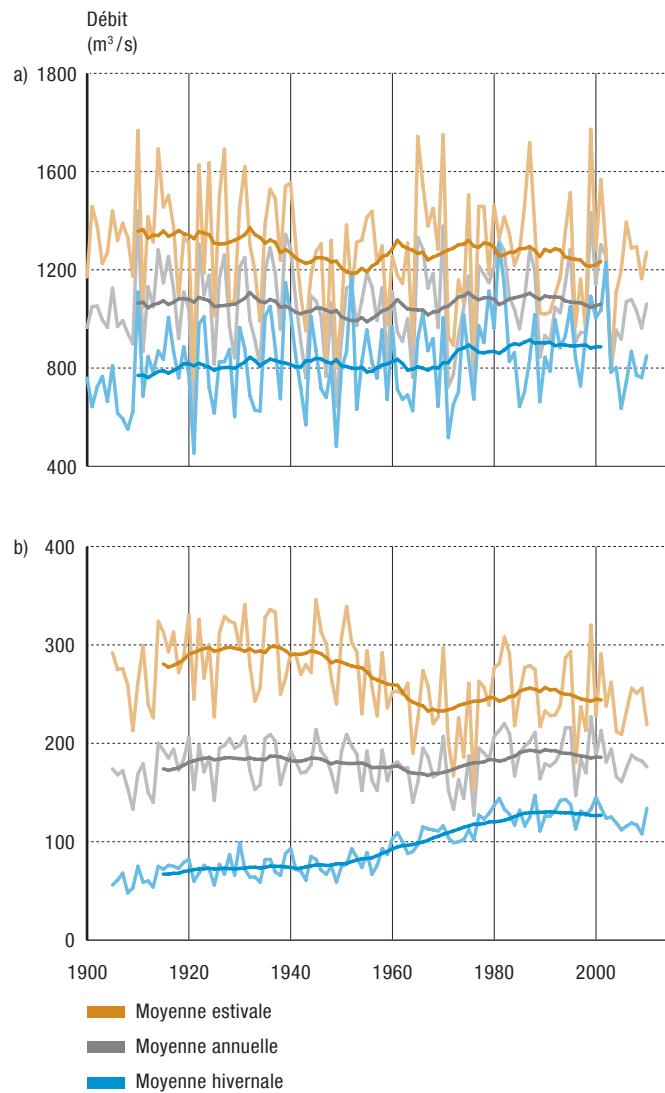
Le régime des précipitations commande dans une large mesure le débit saisonnier d'un cours d'eau. En Suisse, en plus des quantités précipitées, l'altitude des bassins versants de même que l'orientation de l'écoulement (versant Nord ou Sud des Alpes) ont une influence sur le régime hydrologique (Weingartner et Aschwanden 1992). Dans les régions alpines, le débit maximal intervient en été en raison de la fonte de la neige et des glaciers. Sur le Plateau et le Jura, en revanche, les faibles précipitations neigeuses ne sont pas à même d'entraîner d'importants retards dans les pics de débits. Le débit est alors dominé par le rapport entre précipitations et évaporation. Toutefois d'autres facteurs modulent également l'écoulement du cours d'eau, comme la nature du bassin versant et l'infiltration. Depuis une centaine d'années, le débit naturel des cours d'eau subit des variations additionnelles, engendrées par les mesures de gestion des eaux mises en place. Ces perturbations anthropiques proviennent notamment de la déviation des cours d'eau, de la rétention d'eau dans les lacs de barrages et des mécanismes de régulation des lacs, des déversements d'eaux de refroidissement et de l'irrigation. Le récent rapport de synthèse du projet «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (OFEV 2012c) résume les possibles modifications des régimes hydrologiques.

La pression croissante du climat sur l'environnement se fait ressentir de différentes manières sur les bassins versants du pays. Dans le bassin du Rhône et du Rhin, le changement

voque en ce qui concerne les débits saisonniers, et ce depuis plus d'une vingtaine d'années. Comme le montre la figure 39, les débits estivaux diminuent et les débits hivernaux augmentent. En hiver, cette tendance s'explique, d'une part, par une légère augmentation des précipitations et, d'autre part, par l'effet de la température sur l'altitude de la limite pluie-neige. Une part plus grande des précipitations aboutit ainsi directement dans le débit hivernal. En été, le changement provient

Fig. 39 > Débits des cours d'eau

Moyennes annuelles, estivales et hivernales pour le débit du a) Rhin-Bale et du b) Rhône-Porte du Scex entre 1900–2010. Les moyennes mobiles sont calculées sur 20 ans.



a la source des cours d'eau (moins d'accumulation de neige en hiver). Ce contraste saisonnier est accentué par la présence des bassins d'accumulation alpins. Des grandes quantités d'eau sont retenues en altitude pendant l'été et utilisées pendant l'hiver pour la production d'électricité, ce qui renforce le débit hivernal. La tendance est différente dans les bassins versants fortement englacés (pas représenté). Sous l'effet de la hausse des températures, la fonte des glaciers débute plus tôt dans l'année et un renforcement des débits est observé en été comme en hiver (Hänggi et al. 2011).

Température des cours d'eau

Tout au long de l'année, la température des cours d'eau varie sous l'influence directe des conditions météorologiques. L'augmentation de la durée d'ensoleillement et des températures au sortir de l'hiver mène ainsi à des températures maximales en été. L'amplitude des contrastes de température saisonniers, de même que la température moyenne annuelle varie non seulement sous l'influence des situations météorologiques, mais aussi selon l'emplacement des cours d'eau. En région alpine, les variations saisonnières sont atténuées en raison des apports d'eau froide issue de la fonte de la neige ou des glaciers à l'écoulement de la rivière en été. Sur d'autres bassins, les exfiltrations dans les rivières de l'eau souterraine jouent un rôle de régulateur, la température dans le sous-sol restant relativement constante toute l'année. Dans d'autres régions, c'est la présence d'un lac qui caractérise la température de la rivière située en aval. Bien que la tendance à long terme de la température d'un cours d'eau dépende de l'état de l'atmosphère, faisant de cet élément un bon indicateur climatique, la part à attribuer à des sources anthropiques est importante. L'apport d'eau chaude provenant des circuits de refroidissement ou des stations d'épuration perturbe le cycle naturel de la température d'un cours d'eau. Le circuit de refroidissement de la centrale de Mühleberg élève par exemple la température de l'Aar de 1,3 °C en moyenne annuelle, avec une hausse pouvant atteindre 3,4 °C en hiver (Jakob et al. 2010). Afin d'éviter que ces hausses de température n'engendrent des conséquences écologiques irréversibles, l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) prévoit que le réchauffement des eaux ne soit pas supérieur à 3 °C par rapport à une température aussi peu influencée que possible. Dans les tronçons du cours d'eau appartenant aux zones à truites, le réchauffement ne doit pas être supérieur à 1,5 °C.

Depuis les années 1960, les relevés de température de tous les grands cours d'eau de Suisse montrent une nette tendance à la hausse (figure 40). Si cette tendance est partiellement due aux ouvrages techniques, l'influence du climat est bien présente. La figure 40 montre que la hausse de la tem-

apparue dans les années 1987 et 1988 est également d'ordre climatique et reflète le changement de l'indice de l'oscillation nord-atlantique. Dans l'étude de Jakob et al. (2010), on voit que les changements sont nuancés en fonction des bassins versants considérés. L'évolution est par exemple plus marquée pour les cours d'eau du Plateau que pour ceux des Alpes car la part d'eau de fonte qu'ils contiennent s'élève avec le réchauffement de l'air. Dans les cours d'eau qui reçoivent un apport d'eau souterraine, l'augmentation de la température est également atténuée. A la sortie des lacs, on observe en revanche un réchauffement des cours d'eau plus marqué, initié par la grande capacité thermique des lacs.

Niveau et température des eaux souterraines

L'eau de pluie qui ne s'évapore pas et une part des eaux de surface s'infiltrent par gravité dans le sous-sol. Le remplissage de ces vides constitue le réservoir d'eaux souterraines. Ces eaux s'écoulent à des vitesses relativement faibles, avant de ressortir à l'air libre, sous forme d'eau pompée dans les puits, ou alors en donnant naissance à des sources ou alimentant les cours d'eau. Ces eaux constituent une source d'eau potable très importante (80 % de l'eau potable en Suisse), et jouent un rôle primordial dans le cycle de l'eau et dans l'alimentation de certains écosystèmes. Une eau de qualité, exempte de polluants, et un maintien suffisant du niveau des eaux souterraines doivent ainsi être préservés.

Un changement dans le régime des précipitations a des conséquences sur l'alimentation naturelle des eaux souterraines. La canicule de 2003 et le déficit hydrique pluviométrique qui a persisté de 2003 à 2005 ont par exemple entraîné des niveaux très bas, historiques dans la majorité des stations de mesure du réseau national de l'Observation des eaux souterraines NAQUA. A l'inverse, les crues de 1999 et l'excédent pluviométrique qui a persisté de 2000 à 2002 ont fait apparaître des niveaux et des débits d'eaux souterraines particulièrement élevés. Bien que l'on s'attende à une augmentation de la fréquence et de la durée des périodes de sécheresse de même qu'à des événements de précipitations intenses plus régulièrement, aucune tendance ne se dégage actuellement dans les niveaux et les débits des eaux souterraines. L'alternance de ces périodes reflète pour l'heure des conditions météorologiques particulières, parfois de courte durée, mais dont les effets sont parfois visibles au-delà de l'année, particulièrement si l'aquifère se renouvelle lentement ou si les précipitations de l'année suivante ne suffisent pas à combler le déficit.

Si la température des eaux souterraines se réchauffe, l'aspect qualitatif des ressources en eaux potables pourrait aussi être modifié. En effet, la température est un des princi-

metaboliques, l'évolution et la vitesse de croissance et de composition des biocénoses. Dans ce contexte, la température des eaux souterraines est représentée afin de mettre en lien son évolution avec le réchauffement du climat. Cependant, si les conditions atmosphériques influencent d'une manière ou d'une autre la température des eaux souterraines, elle dépendra également du type d'aquifère, de la profondeur des eaux souterraines (en d'autres termes de l'épaisseur de la zone non-saturée), du temps de renouvellement des eaux, de la nature de la recharge des eaux souterraines (infiltration d'eau de pluie, de rivières ou de fonte de neige) et de l'utilisation du sol (habitations, routes, surfaces agricoles et forestières, etc.).

Sur le Plateau suisse, on observe dans la plupart des aquifères une augmentation de la température de l'eau (figure 41). A Zofingen (Argovie) par exemple, la température s'est élevée de 1,03 °C entre 1989 et 2007, une valeur même supérieure à celle de l'air (0,96 °C mesuré à Wynau, distant de quelques kilomètres). A cette station de mesure, les variations saisonnières sont faibles et il existe un décalage temporel des maxima et

de cet aquifère de même que par sa profondeur plus importante (environ 10 m alors qu'elle est de 3 m à Stans). Dans d'autres aquifères du Plateau, on observe une tendance plus neutre, voire inverse. Les raisons qui commandent cette évolution ne sont pas encore très claires et résultent sans doute d'une combinaison de facteurs hydrogéologiques et climatiques.

Température des lacs

L'évolution thermique des lacs est régie par des processus tout aussi divers que complexes qui dépendent à la fois des conditions météorologiques, de la bathymétrie (topographie du fond du lac), de l'influence des cours d'eau, des apports souterrains, et de facteurs biochimiques (composition de l'eau, abondance du phytoplancton). Parmi ceux-ci, les échanges de chaleur entre le lac et l'atmosphère ainsi que l'action du vent en tant que source de brassage dominent l'évolution de la température des lacs à toutes les profondeurs, faisant naître des profils thermiques bien distincts en fonction des saisons. En été par exemple, le profil est fortement stratifié, c'est-à-

Fig. 40 > Température des cours d'eau

Températures annuelles moyennes de l'eau mesurées à sept stations du réseau hydrologique de l'OFEV pour la période 1954–2010. Les moyennes mobiles sont calculées sur sept ans. La température de l'air à Bâle (MétéoSuisse) est également indiquée dans un but de comparaison.

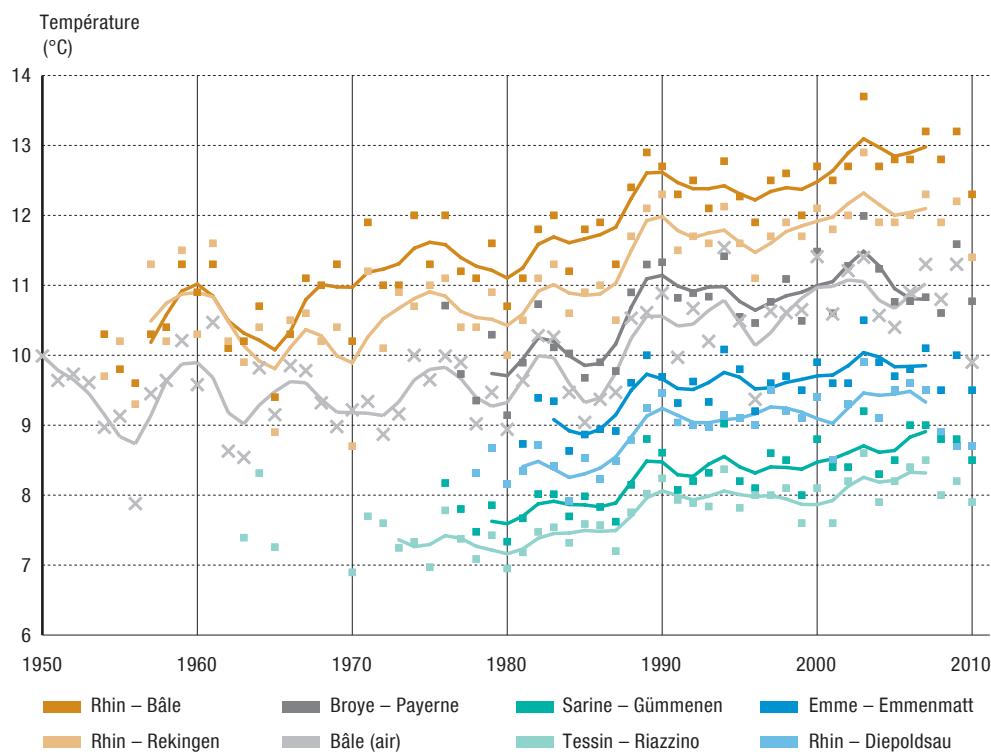
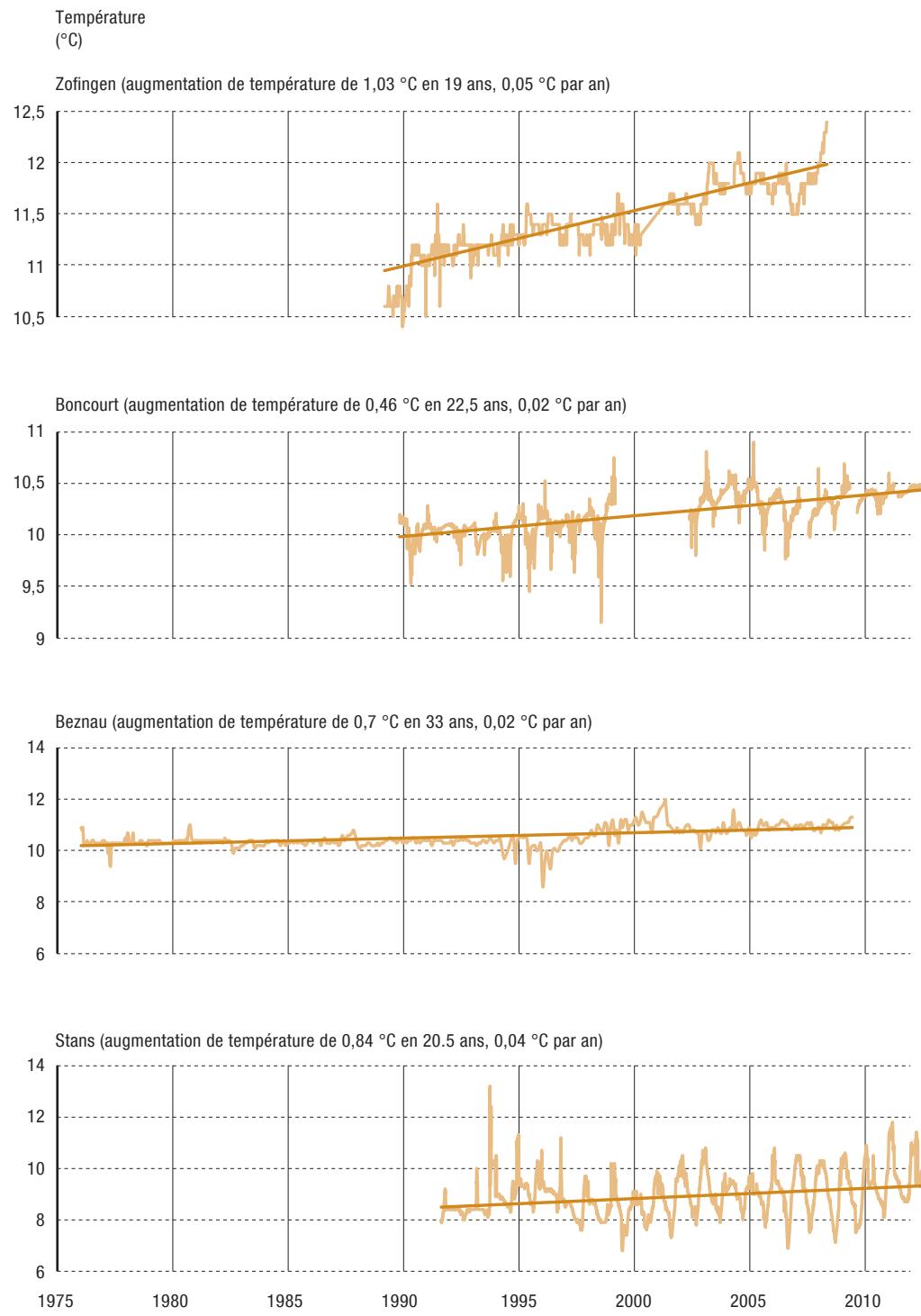


Fig. 41 > Température des eaux souterraines

Valeurs journalières ou mensuelles de la température de l'eau mesurée à 4 stations de l'observatoire national des eaux souterraines (NAQUA, OFEV 2009) entre 1976 et 2011.

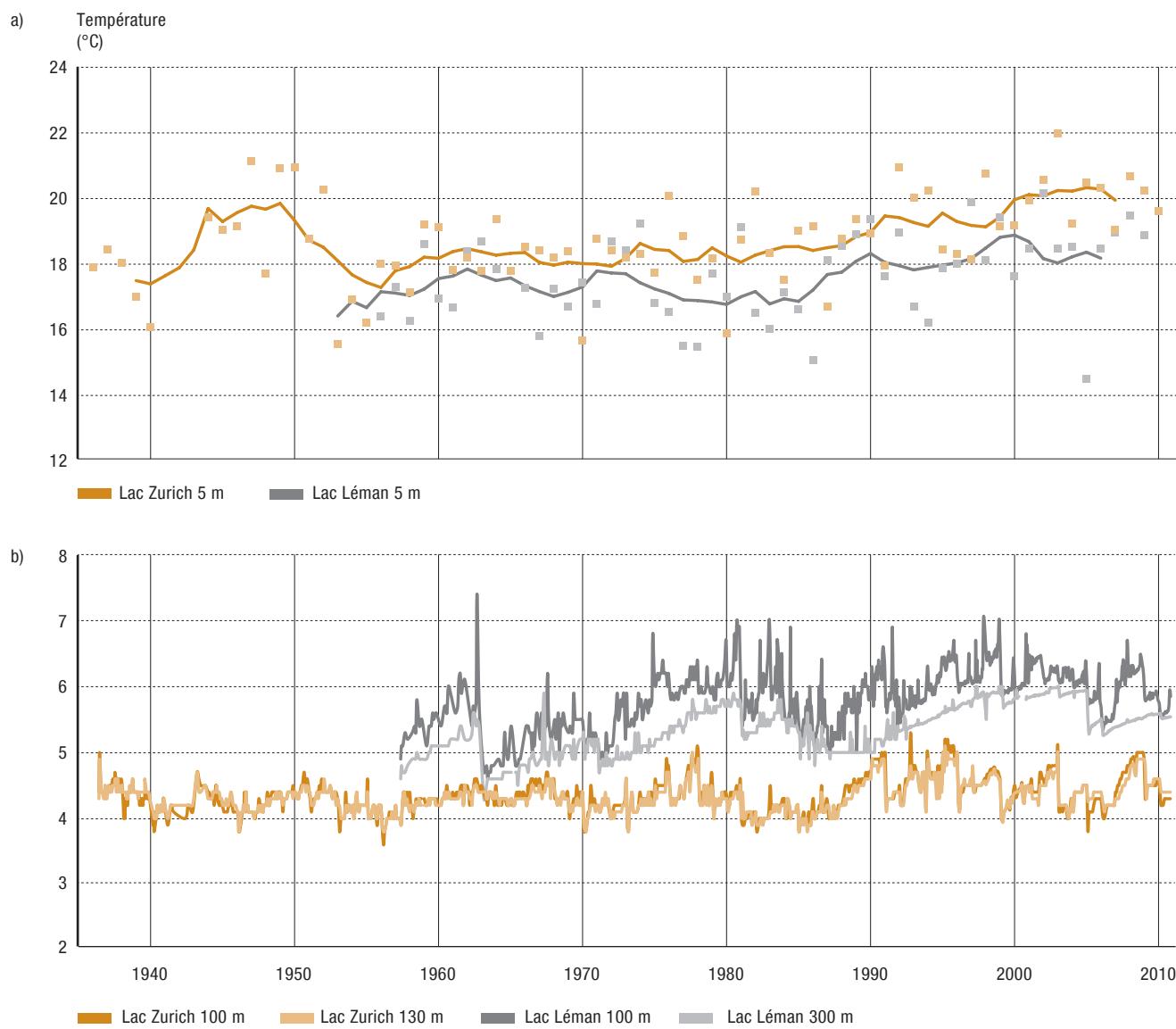


derouent, d'une couche de fond (hypolimnion) qui se réchauffe généralement peu au cours de l'année, et d'une couche intermédiaire (métalimnion) qui agit en tant que barrière thermique, minimisant les interactions entre l'épilimnion et l'hypolimnion. La structure hivernale se caractérise en revanche

vers dans les couches superficielles va en effet diminuer le gradient de densité de l'eau à travers la colonne d'eau. Des mouvements convectifs naissent et, aidés par l'action du vent sur cette structure fragilisée, font subir au lac un brassage plus ou moins complet. Sur l'ensemble des lacs du Plateau, la fré-

Fig. 42 > Températures de deux lacs du Plateau à diverses profondeurs

a) Evolution des températures estivales (valeur moyenne des mesures effectuées en juillet-août) du lac Léman (1957–2010) et du lac de Zurich (1945–2010) à 5 m de profondeur. Les températures mesurées à 5 m caractérisent l'état de l'épilimnion et sont collectées entre une et quatre fois par mois. Les moyennes mobiles sont calculées sur sept ans. b) Evolution des températures à 100 m de profondeur et au fond de chaque lac tout au long de l'année. Les températures mesurées à 100 m et plus caractérisent l'état de l'hypolimnion. Les données sont collectées plus régulièrement en été qu'en hiver.



doux et a de courtes périodes de forts vents. Dans le Lac Léman (309 m), le retournement²¹ est parfois inférieur à un événement par décennie.

Les sondages effectués dans les lacs du Plateau montrent une élévation de la température à toutes les profondeurs (Ambrusetti et Barbanti 1999, Straile et al. 2003a). L'évolution des températures estivales de l'eau de surface dans le lac Léman et le lac de Zurich met clairement en évidence ce réchauffement (figure 42a). La brève phase chaude dans le lac de Zurich vers la fin des années 1940 est la conséquence du climat doux qui y régnait ces années-là (cf. 3.3.1). Depuis 1990, les températures journalières à la surface ont dépassé à plusieurs reprises les 22,5 °C dans le lac Léman et les 24 °C dans le lac de Zurich, au point le plus profond de ces lacs. L'augmentation des minima de température au mois de juin (pas montré) atteste de l'effet des hivers plus doux et des printemps plus précoces sur la mise en place de la stratification. Tout au fond du lac, il est souvent difficile de capter le signal d'un changement de climat car la chaleur reste en partie bloquée au niveau du métalimnion pendant l'été et aussi parce que le retournement des eaux du lac réinitialise en quelque sorte le profil chaque hiver. Toutefois, dans les lacs profonds, autrefois régulièrement soumis à des retournements, on observe actuellement des périodes de réchauffement (sans retournement complet) qui se terminent par une abrupte chute des

1980, indiquant une baisse de la fréquence des épisodes de retournement complet. Les températures se sont réchauffées lentement au fond du lac, soit de 0,04 °C par décennie entre 1945 et 2008 (EAWAG 2008). Dans le lac Léman, la rareté des épisodes de brassage ne permet pas de libérer entièrement la chaleur emmagasinée en profondeur pendant plusieurs années consécutives (figure 42b). Le lac se réchauffe à un taux à peine inférieur à 0,15 °C par décennie.

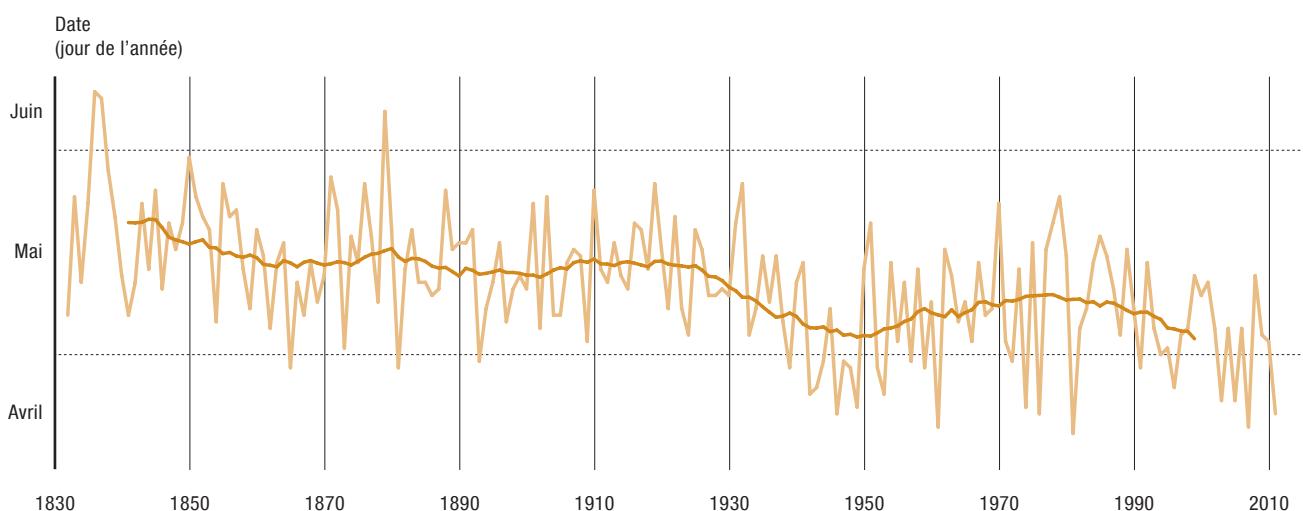
Couverture de glace à la surface des lacs

C'est avant tout la température de l'air qui détermine si les lacs gèlent en hiver et combien de temps la glace persiste. Lorsqu'un hiver est froid et long, les lacs peuvent geler plus tôt et garder plus longtemps leur couverture de glace. L'apparition d'une couverture de glace dépend également de la profondeur du lac. Un lac profond est un important réservoir de chaleur. Il doit alors subir des pertes énergétiques énormes avant que la glace ne puisse recouvrir entièrement sa surface. Selon les données historiques, le lac Léman, le lac de Brienz et le lac de Walenstadt n'ont jamais entièrement gelé, tandis que le lac de Zurich n'a gelé qu'en 1907, 1929 et 1963.

Les dates de gel et de dégel enregistrées depuis 1832 dans le lac de St-Moritz constituent la plus longue série de données de ce type en Europe. Etant donné que la variabilité de la date de dégel s'explique dans sa majeure partie par

Fig. 43 > Date de dégel de la couverture de glace du lac de St-Moritz

La date de dégel est observée entre 1932 et 2011. Elle correspond au premier jour de l'année où la glace a entièrement disparu de la surface de lac. La moyenne mobile est calculée sur 20 ans.



hausse des températures en Suisse sur la couverture de glace. En accord avec les tendances observées dans d'autres lacs et rivières de l'hémisphère nord (Magnuson et al. 2000), le lac de St-Moritz dégèle de plus en plus tôt au printemps (figure 43). En 2011, le dégel du lac a eu lieu 20 jours plus tôt que la date moyenne de dégel calculée sur toute la période d'observation. Les effets de la période chaude vers la fin de la première moitié du XX^e siècle sont visibles dans la série.

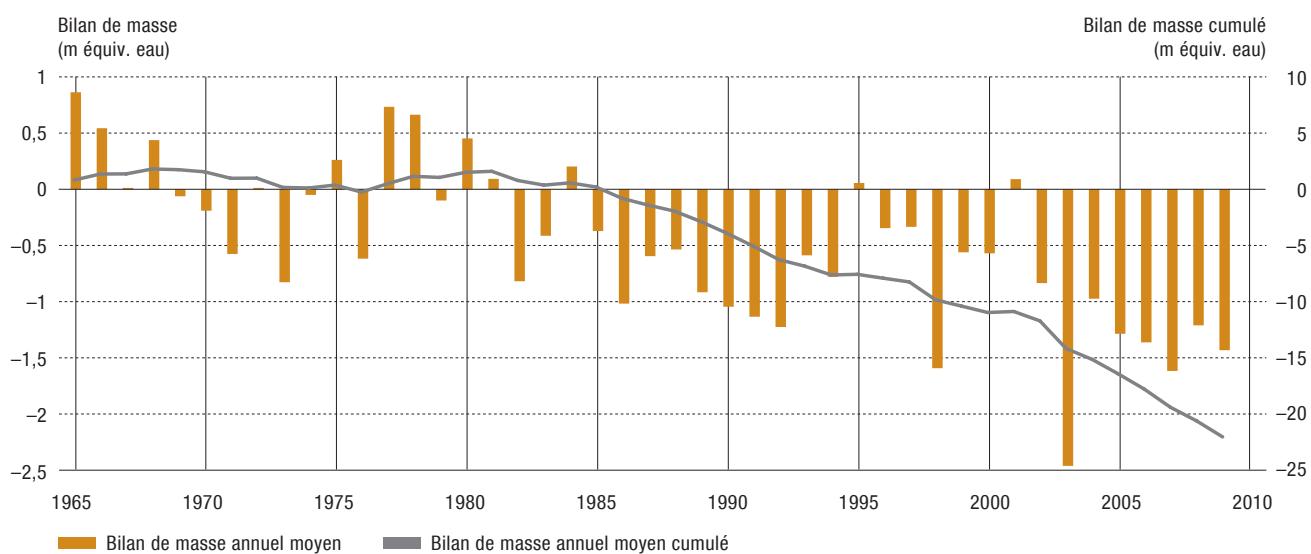
Pour les lacs de taille moyenne du Plateau, il n'est plus question de connaître les dates de gel et de dégel, mais plutôt les années où les lacs gèlent. Une étude de Franssen et Scherer (2007) portant sur onze lacs de taille moyenne du Plateau, a montré que depuis 40 ans, la fréquence à laquelle les lacs gèlent baisse et que cette baisse est plus marquée depuis 20 ans. Les variations peuvent néanmoins être importantes, même dans un cours laps de temps. Tandis qu'en 2007, aucun lac n'a gelé, la vague de froid extraordinaire de février 2012 a permis à une épaisse couche de glace de recouvrir ces lacs entièrement ou, du moins, en partie. Ce sont surtout les lacs plus profonds, qui gèlent plus rarement, qui sont concernés par ces diminutions de couverture de glace. Les lacs comme le lac de Greifen, de Pfäffikon et d'Aegeri sont, pour le moment du moins, peu touchés par l'augmentation des températures hivernales car l'apport de froid pour geler ces lacs reste suffisant.

L'élévation de la température moyenne mondiale fait reculer les glaciers un peu partout dans le monde. Cette tendance n'épargne pas la Suisse. Dans les Alpes, la température des glaciers tempérés sous la surface est partout proche du point de fusion sous pression (0 °C). De toutes petites variations de la température peuvent ainsi suffire à faire fondre la glace. Une hausse d'un dixième de degré qui persiste pendant dix ans peut faire reculer une langue glaciaire de plusieurs centaines de mètres. Les glaciers de montagne constituent ainsi des indicateurs climatiques particulièrement appropriés pour l'observation de l'environnement mondial (Haeberli et al. 2000).

Les variations de volume ou de masse d'un glacier fournissent des informations fiables sur l'évolution des conditions climatiques. L'évolution moyenne du bilan de masse de huit glaciers alpins indique que jusque vers 1980, les années de gains de volume compensaient les années de pertes mais que depuis, la tendance va dans le sens de pertes continues (figure 44). Pour toute la surface des glaciers, la perte atteint généralement entre 0,5 et 1,5 m d'équivalent eau par an²², 2,5 m en 2003 en raison de la canicule. Si l'on additionne les pertes des différentes années pour la période allant de 1980 à 2009, on obtient une perte cumulée de plus de 22 m d'équivalent eau. Bien qu'il soit difficile de connaître la masse de glace restante sur l'ensemble des Alpes, la perte annuelle de volume

Fig. 44 > Bilan de masse moyen de huit glaciers alpins

Bilan de masse annuel moyen et cumulé des glaciers alpins de Saint Sorlin (F), Sarennes (F), Silvretta (CH), Gries (CH), Sonnblickkees (A), Vernagtferner (A), Kesselwandferner (A), et Hintereisferner (A) entre 1965 et 2009.



entre 1975 et 2000 (Haeberli et al. 2007). En se basant sur le volume de glace restant en 2011, la perte actuelle de volume des glaciers alpins est estimée à 2 km³ par an ou 2 à 3% par an (Haeberli et al. à l'impression).

La variation de longueur d'un glacier (avancée ou recul de la langue glaciaire) dépend notamment de la taille de celui-ci (figure 45): les petits glaciers (p. ex. Pizol et Sardona) réagissent rapidement à la météorologie annuelle, alors que la langue des glaciers de montagne plus importants (p. ex. Trient et Tschierva) présentent des variations sensibles qui n'interviennent qu'avec un certain délai (de l'ordre de la décennie). Les grandes vallées glaciaires (p. ex. Aletsch et Gorner) réagissent encore plus lentement, avec un retard de plusieurs décennies (Hoelzle et al. 2000, Zemp et al. 2007). Dans le cas du Grand glacier d'Aletsch, la langue a reculé progressivement depuis 1879 sur une distance de près de 3 km.

Le recul des glaciers observé dans les Alpes coïncide clairement avec la tendance à la hausse des températures moyennes (Zemp et al. 2007). Les valeurs qui vont exceptionnellement à l'encontre de cette tendance s'expliquent par les conditions météorologiques (durée d'ensoleillement réduite, précipitations hivernales plus importantes). Ces prochaines années, le recul des glaciers alpins se poursuivra, indépendamment de l'évolution de la température: en effet, leur ex-

atteint (Zemp et al. 2006). Si les températures augmentent encore jusqu'à la fin du XXI^e siècle (GIEC 2007a), il faut s'attendre à un recul accru des glaciers dans de nombreuses régions des Alpes, voire à leur complète disparition (Zemp et al. 2006).

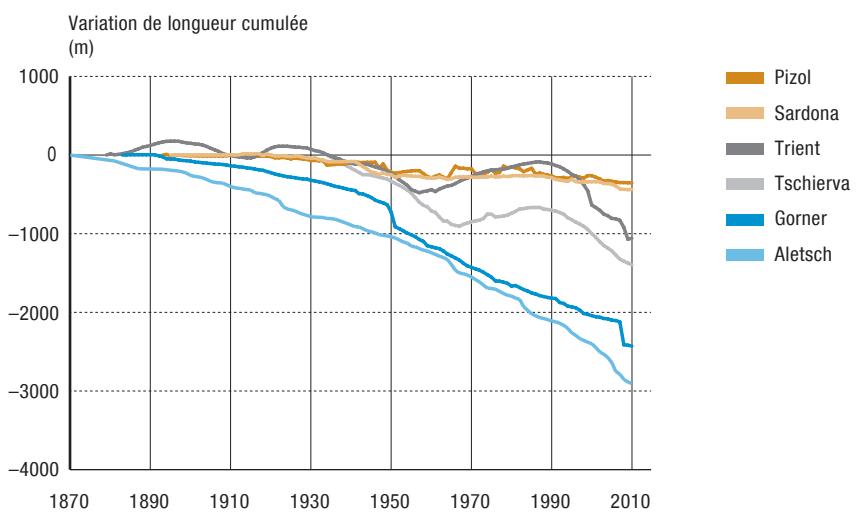
Variations de température du pergélisol

Le pergélisol (ou permafrost) est une portion du sous-sol dont la température reste toute l'année inférieure ou égale à 0 °C. Les régions arctiques et antarctiques comprennent de grands volumes de pergélisol, mais bon nombre de pentes d'éboulis, de glaciers rocheux²³, de substrats rocheux et de sols des régions de haute montagne sont eux aussi gelés en permanence. En Suisse, entre 5% et 6% de la surface du pays est constituée de pergélisol, une surface deux fois plus grande que celle occupée par les glaciers. Dans les Alpes, son épaisseur varie de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres, comme dans les régions les plus élevées du massif du Mont Rose.

Le pergélisol réagit de différentes manières aux variations de bilan énergétique qui affectent sa surface. Si la température du sous-sol se situe juste en dessous du point de fusion, aucune variation de température n'est observée car l'énergie est utilisée pour faire fondre la glace sous la surface. Au contraire, si le sous-sol est sec et ses tempéra-

Fig. 45 > Variations de longueur de six glaciers alpins

Variations annuelles cumulées de la longueur des glaciers du Pizol (0,21 km², 0,6 km de long en 1973), de Sardona (0,36 km², 0,7 km de long en 1973), du Trient (6,4 km², 4,9 km de long en 1973), de Tschierva (6,2 km², 4,75 km de long en 1973), du Gorner (59,73 km², 13,5 km de long en 1973) et d'Aletsch (86,63 km², 24 km de long en 1973) entre 1879 et 2010.



tables. La couverture neigeuse hivernale peut intervenir dans ce bilan en agissant comme couche isolante. D'abondantes chutes de neige en début de saison hivernale empêchent ainsi le sol de se refroidir efficacement par perte de rayonnement infra-rouge et favorisent des températures élevées du pergélisol l'été suivant. En été, lorsque le sol n'est plus recouvert de neige, sa couche supérieure dégèle dans une proportion dépendant de la température de l'air et de l'intensité du rayonnement qui atteint sa surface. L'épaisseur de cette «couche active» constitue un signal direct des conditions climatiques saisonnières (PERMOS 2010). La figure 46 présente la profondeur maximale de la couche active du glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch, en Haute-Engadine, et du Schilthorn, dans l'Oberland bernois. La série temporelle de Murtèl-Corvatsch montre une légère tendance à l'accroissement de l'épaisseur de la couche active, avec des valeurs maximales pour les années 2009 et 2010. En d'autres endroits, comme dans l'éboulement des Lapires (VS non représenté) ou au Schilthorn, la profondeur de la couche dégelée varie plus fortement, parce que

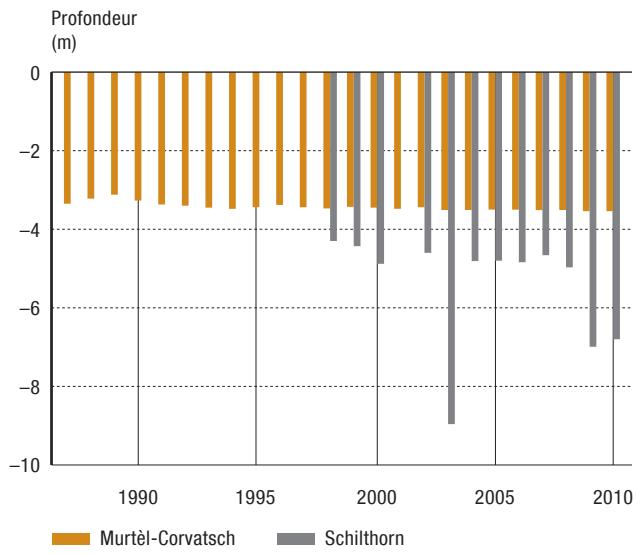
Les anomalies de température, comme celles enregistrées lors de la vague de chaleur de l'été 2003, se reflètent alors dans les données (figure 46).

La figure 47 présente l'évolution de la température à des profondeurs d'environ 10 à 16 m à sept sites de forage du Réseau suisse de monitoring du pergélisol PERMOS. A ces profondeurs, les effets journaliers des conditions météorologiques sont éliminés et les variations de température qui suivent celles de surface avec un retard d'une demi-année, ne relèvent dès lors que de l'influence des conditions hivernales et estivales. Au contraire des températures de l'air, les séries d'observations ne permettent pas de dégager de tendance généralisée pour tous les sites pris en compte, mais les anomalies météorologiques extrêmes, telles que les étés chauds de 2003 et 2009 et les hivers chauds ou froids, sont clairement visibles. Une série de facteurs peuvent en être à l'origine:

- > la couverture neigeuse, variable d'un site à l'autre, modifie la signature du bilan énergétique à la surface du sol;
- > la nature du site (éboulement ou substrat rocheux);

Fig. 46 > Profondeur maximale de la couche active

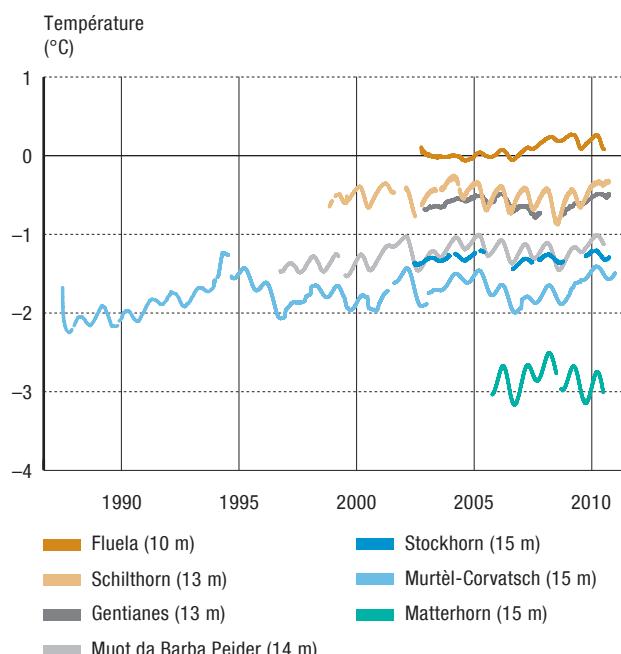
La profondeur de la couche active est mesurée dans les glaciers rocheux de Murtèl-Corvatsch de 1987 à 2010 et du Schilthorn de 1998 à 2010.



Source: PERMOS (2012)

Fig. 47 > Température du pergélisol

Températures mesurées entre 10 m et 16 m de profondeur à sept sites de forage dans les Alpes de 1991 à 2010.



Source: PERMOS (2012)

l'air sont déjà supérieures à la moyenne à long terme; > la température et le contenu en glace du sous-sol peuvent empêcher le réchauffement en profondeur. Dans les régions de pergélisol chaud²⁴ ou si la température sous la surface est juste en dessous du point de fusion, une grande partie de la chaleur qui pénètre dans le sol est utilisée pour dégeler le sol (effet de la chaleur latente).

Ce dernier point met en évidence le fait que la température du sous-sol ne fournit pas une image complète des effets du climat sur le pergélisol. Des températures constantes dans le sous-sol ne signifient donc pas qu'il n'y a aucun changement dans le pergélisol.

Les valeurs élevées de température du pergélisol, comme celles que l'on observe vers le milieu des années 1990, et suite aux étés 2001 et 2009 (figure 47), au glacier rocheux du Murtèl-Corvatsch (et dans la plupart des autres sites) témoignent avant tout de la présence d'une couverture de neige précoce et du fort enneigement des automnes-hivers précédents ces

températures (Permos 2010, Vonder Muehli et al. 2004).

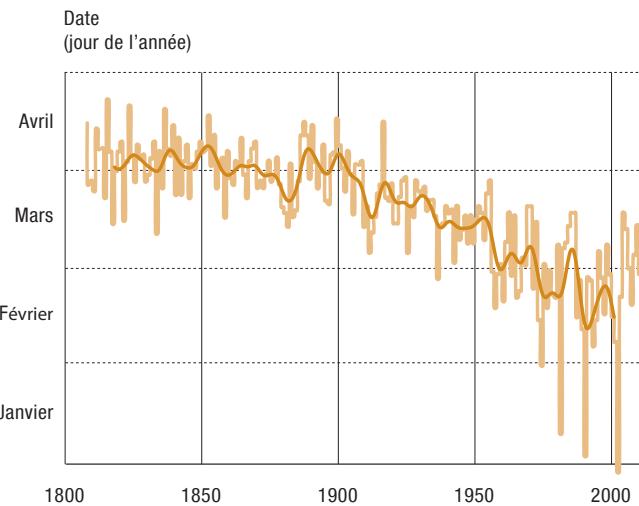
3.4.3 Végétation et forêt

Floraison des cerisiers à Liestal et du marronnier à Genève

Chez les plantes, la date d'occurrence de phénomènes tels que la floraison ou la feuillaison au printemps dépend fortement de la température de l'air et peut donc varier considérablement d'une année à l'autre. Les changements climatiques peuvent ainsi influencer le développement et les étapes de croissance de nombreuses espèces végétales. Les données phénologiques²⁵ sont ainsi de bons indicateurs des conséquences locales d'un changement de climat pour la végétation. Les deux plus longues séries suisses de données phénologiques, répertoriant respectivement la date du déploiement de la première feuille de marronnier à Genève (figure 48) et celle de la floraison de cerisiers dans la campagne près de Liestal (figure 49), montrent une tendance vers des phases printanières plus précoce (Defila et Clot 2001). L'analyse des observations réalisées par le réseau phénologique suisse de-

Fig. 48 > Début de la feuillaison du marronnier officiel de Genève

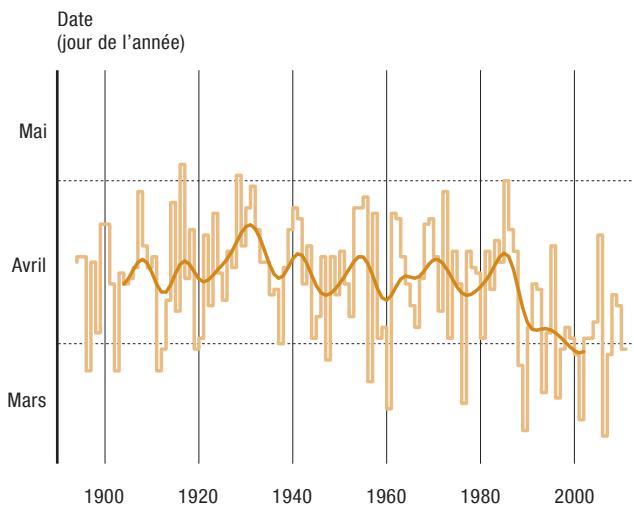
Date du début de la feuillaison pendant la période 1808–2012. La moyenne glissante est établie sur 20 ans.



Source: MétéoSuisse (2012a)

Fig. 49 > Début de la floraison des cerisiers à Liestal

Date du début de la floraison pendant la période 1894–2012. La moyenne glissante est établie sur 20 ans.



Source: MétéoSuisse (2012a)

Bien que l'évolution annuelle des plantes dépende de divers facteurs environnementaux, et notamment des conditions météorologiques, on perçoit clairement dans la tendance à long terme les effets du climat sur l'évolution de la végétation à Genève et à Liestal. La série montrant la date de floraison des cerisiers indique qu'elle varie considérablement d'une année à l'autre mais qu'un avancement est perceptible depuis une trentaine d'années. La floraison intervient entre 15 et 20 jours plus tôt qu'au milieu du XX^e siècle. Quant au marronnier, l'apparition de sa première feuille a peu varié au cours du XIX^e siècle, mais on note un net avancement depuis le début du XX^e siècle. La date la plus tardive fut enregistrée le 23 avril 1816 et la plus précoce le 29 décembre 2002. Toutefois, la précocité de cet événement est aussi influencée par d'autres facteurs, comme le climat local du centre ville de Genève et son changement avec le développement de la zone urbaine.

Début de la saison des pollens de graminées

En Suisse, les pollens de graminées constituent les principaux allergènes. La date du début de la floraison des graminées revêt donc une importance capitale pour les personnes allergiques. Le début de la saison des pollens de graminées, tout comme la floraison des cerisiers, est en étroite corrélation avec les températures printanières, en particulier celles des mois de mars à mai. Le début est défini comme la date à laquelle ces pollens dépassent pour la première fois une concentration moyenne journalière de 20 pollens/m³, ce qui correspond au seuil à partir duquel la charge pollinique est considérée comme moyenne. Depuis 1982, la date du début de la floraison des graminées semble avoir avancé d'une semaine environ, mais sans que cette tendance linéaire soit statistiquement significative (figure 50).

La durée de la saison des pollens de graminées, qui dépend non seulement des conditions météorologiques mais aussi de l'agriculture, est passée de 109 à 86 jours depuis 1982.

La mesure des pollens de MétéoSuisse ne sert pas seulement à adresser des mises en garde ciblées aux personnes allergiques: elle fournit également des informations importantes sur la réaction de la végétation aux modifications des températures printanières. Le début de la saison des pollens d'autres espèces allergènes comme le bouleau, le frêne, le noisetier et l'aulne se fait selon un modèle très similaire à l'indice du printemps (figure 51).

L'indice du printemps en tant que mesure récapitulative

Dans le cadre de son réseau d'observation phénologique, MétéoSuisse étudie depuis 1951 les étapes de croissance et de développement des plantes. Le réseau d'observation phénolo-

altitudes. D'une manière générale, on constate que pour diverses espèces végétales, les phases phénologiques printanières tendent à être plus précoces dans toute la Suisse. Pour caractériser globalement le développement de la végétation au printemps, les dix premiers stades de croissance observés dans l'année ont été résumés en une seule valeur: l'indice du printemps. A l'aide d'une analyse en composantes principales, méthode permettant de structurer de grands ensembles de données, on détermine (pour la période allant de 1950 à aujourd'hui) l'écart par rapport à la moyenne de toutes les stations d'observation.

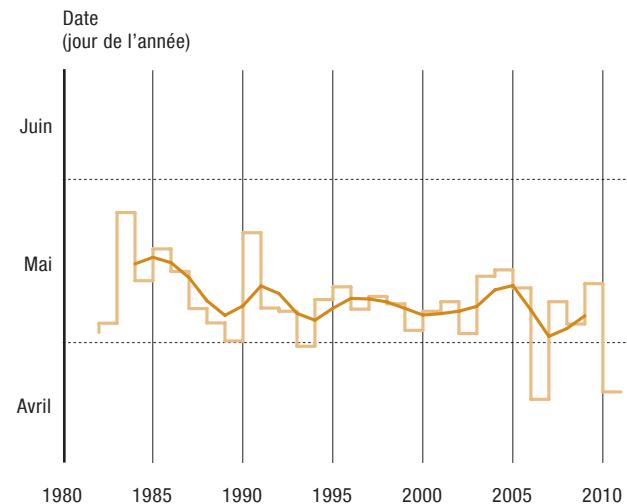
La figure 51 montre qu'entre 1989 et 2003, la végétation s'est le plus souvent développée très tôt dans l'année, qu'en 2010, elle s'est développée à un rythme normal et que 2011 aura été une année extrêmement précoce. L'évolution de l'indice du printemps au fil des ans met en lumière les effets des changements climatiques sur la végétation dans toute la Suisse.

Espèces végétales du Plateau aux étages montagnards

La Suisse présente, avec plus de 13 000 espèces de plantes vasculaires, bryophytes, algues, champignons et lichens recensées, une grande diversité végétale (Cordillot et Klaus

Fig. 50 > Début de la saison des pollens de graminées

Date moyenne du début de la saison des pollens de graminées pendant la période 1982–2011 pour les stations de mesure de Bâle, Buchs (SG), Genève, Neuchâtel et Zurich. La tendance est indiquée par une moyenne glissante établie sur cinq ans.



Source: MétéoSuisse (2012b)

climat, de son sous-sol, et des propriétés de ses sols (OFEV 2010). De même, certaines activités humaines, telles que l'agriculture extensive en régions montagneuses, ont favorisé parfois la diversité de ces milieux. En revanche, sous la contrainte de certaines pratiques d'exploitation et d'utilisation du sol, des niches écologiques ont disparu et, avec elles, certaines espèces spécifiques. Sur le Plateau par exemple, l'intensification de l'agriculture et l'augmentation de la production conduisent à une uniformisation des communautés de plantes. Les effets du climat sur les espèces végétales apparaissent également comme un facteur influençant la diversité. Il est probable que les épisodes de fort déficit hydrique favorisent l'arrivée ou l'expansion d'espèces tolérant la sécheresse au détriment d'autres espèces. Afin de palier au stress thermique, certaines espèces pourraient entamer une migration altitudinale. Même si le nombre d'espèces reste sensiblement identique, l'uniformisation des paysages du Plateau (voire au-delà) qui peut en découler et la perte de spécificités locales constituent une atteinte à la biodiversité.

Le monitoring de la biodiversité, MBD, recense le nombre d'espèces vasculaires indigènes et néophytes observées par surface d'échantillonnage sur un réseau national comprenant plus de 2000 sites. Ces données, collectées tous

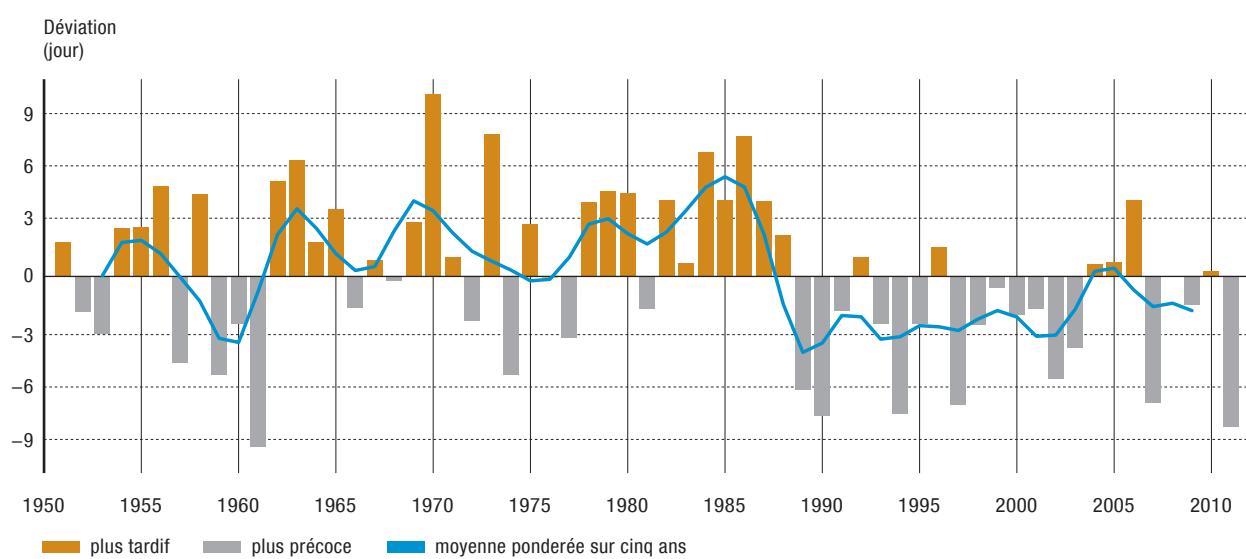
les ans. Bien que les relevés MBD aient démarre pendant une période de climat invariablement chaud, les changements de composition végétale, s'ils sont effectivement influencés par le climat, reflètent une tendance engagée depuis longtemps (OFEV 2012e). On constate qu'entre les 2 relevés achevés jusqu'à lors, les deux groupes de plantes ont progressé dans les zones tempérées, mais plus fortement pour les espèces introduites par l'homme (figure 52). S'il est vrai que les températures élevées favorisent particulièrement la propagation des espèces néophytes, la progression de leur nombre tient aussi de facteurs indépendants du climat, telle leur attraction vers les centres urbains. Il faut noter également que la présence importante d'espèces néophytes dans les étages montagnards (étage des herbages) est relativement nouvelle, et que l'extension de leur aire de distribution au-delà de leur zone climatique pourrait être la conséquence du réchauffement de ces zones anciennement froides.

Espèces végétales des étages alpins

De fortes amplitudes de température journalières ou saisonnières, un manteau neigeux persistant, une courte période de végétation, des vents parfois tempétueux, des avalanches et autres événements naturels, tel est le milieu extrême auquel

Fig. 51 > L'indice du printemps

L'indice du printemps est un indicateur intégré permettant de déterminer la déviation des phases phénologiques printanières de la date moyenne établie sur la période 1950–2011.



beneficiaire de conditions plus clémentes ne se traduit pas nécessairement par un allongement de la période de croissance. Les plantes alpines sont en effet souvent plus sensibles aux signaux photopériodiques saisonniers qu'à la température de l'air. Toutefois, si la durée d'enneigement est fortement raccourcie, les pertes respiratoires engendrées par une longue exposition à des températures élevées pourraient même s'avérer néfastes (Körner 2005). Les plantes alpines confrontées à un climat plus chaud ont alors trois options: survivre à ces conditions, notamment à travers des adaptations évolutives, migrer vers des habitats plus favorables, ou alors disparaître (Walther et al. 2005a).

L'évolution de la composition florale de l'étage alpin a été étudiée par Walther et al. (2005a) sur une période couvrant plus d'un siècle. Les résultats se basent sur les relevés effectués à des altitudes de 2959 à 3262 m sur dix sommets dans la région de la Bernina (Grisons), au début du XX^e siècle (Rübel 1912), dans les années 1980 (Hofer 1992) et au début du XXI^e siècle (Walther et al. 2005b). Il ressort que les espèces de plantes se sont enrichies sur tous les sommets entre chacun des relevés (figure 53). Tandis que le taux d'augmentation était de 1,3 espèce par décennie entre les deux premiers relevés, il s'est accéléré vers la fin du XX^e siècle pour atteindre 3,7 espèces par

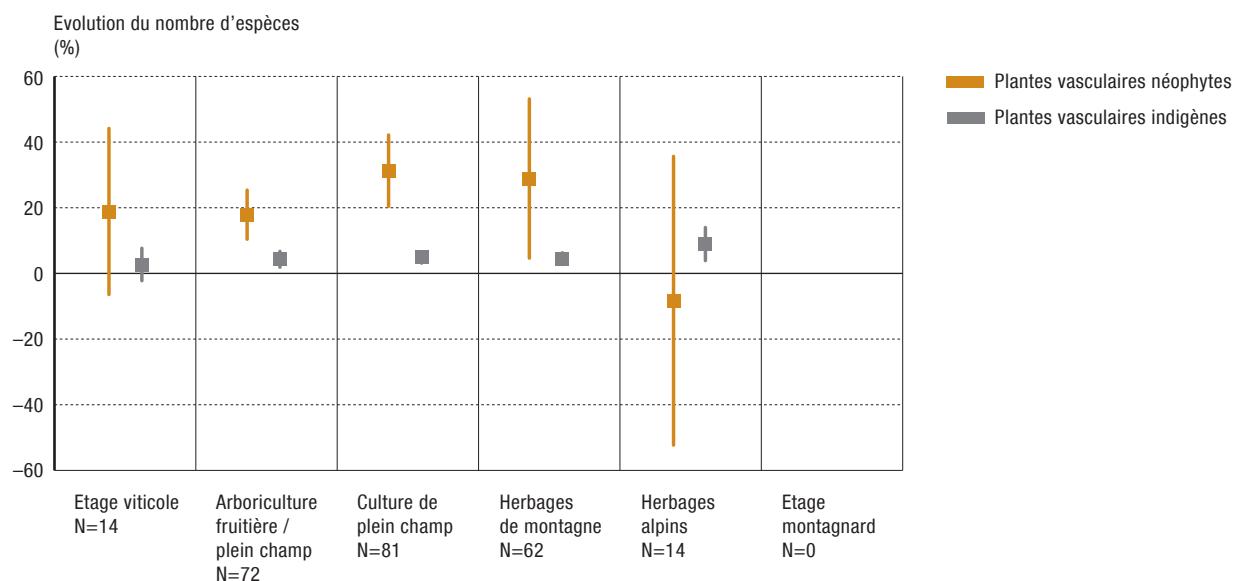
de basse altitude, dont l'impulsion tient sans doute du réchauffement du climat particulièrement marqué en région alpine. On assiste ainsi à une uniformisation de la flore des sommets de montagne (Jurasinski et Kreyling 2007). Malgré le faible potentiel compétitif des espèces spécialisées des hautes altitudes, l'arrivée de nouvelles plantes n'a pas (encore?) eu d'incidences sur leur abondance. Les espèces qui se situent à la limite de l'échelle altitudinale ne devraient pas disparaître dans les Alpes même si le réchauffement se poursuit (Körner 2009). La diversité topographique qu'offrent les Alpes devrait en effet leur permettre de trouver des micro-habitats appropriés. En revanche, il est probable que l'on assiste à un rétrécissement de leur habitat par l'élévation de sa limite altitudinale.

Indicateurs des changements touchant les forêts

De nombreux indices montrent que les changements climatiques ont d'ores et déjà une incidence sur les forêts. La plupart des observations concernant les changements remontent aux deux à trois dernières décennies, ayant débuté à la fin des années 1970. L'élévation des températures et l'augmentation de la fréquence des sécheresses qui sont liées aux changements climatiques peuvent agir de différentes façons sur la forêt et ses fonctions:

Fig. 52 > Progression des espèces de plantes vasculaires non indigènes

Evolution des plantes vasculaires non indigènes (néophytes) introduites par l'homme depuis 1500 par rapport aux autres plantes vasculaires. La progression moyenne du nombre d'espèces par surface de mesure entre le premier (2001–05) et le second (2006–10) relevé du monitoring de la biodiversité est représentée pour chaque étage altitudinal avec un taux de fiabilité de 95 %. N est le nombre de surfaces de mesure.



- > infliger des dommages potentiellement fatals;
- > limite de la forêt: l'allongement des périodes de végétation et la hausse des températures peuvent augmenter la croissance et entraîner une élévation de la limite de la forêt;
- > interactions au sein de la forêt: l'équilibre entre plantes et animaux, par exemple la relation entre hôtes et insectes ou microorganismes, peut changer car ils ne réagissent pas tous de la même façon aux changements climatiques. Le risque d'invasion d'insectes catastrophique augmente;
- > concurrence: les plantes néophytes envahissantes, de même que les insectes et les microorganismes, peuvent modifier la situation de concurrence dans les forêts.

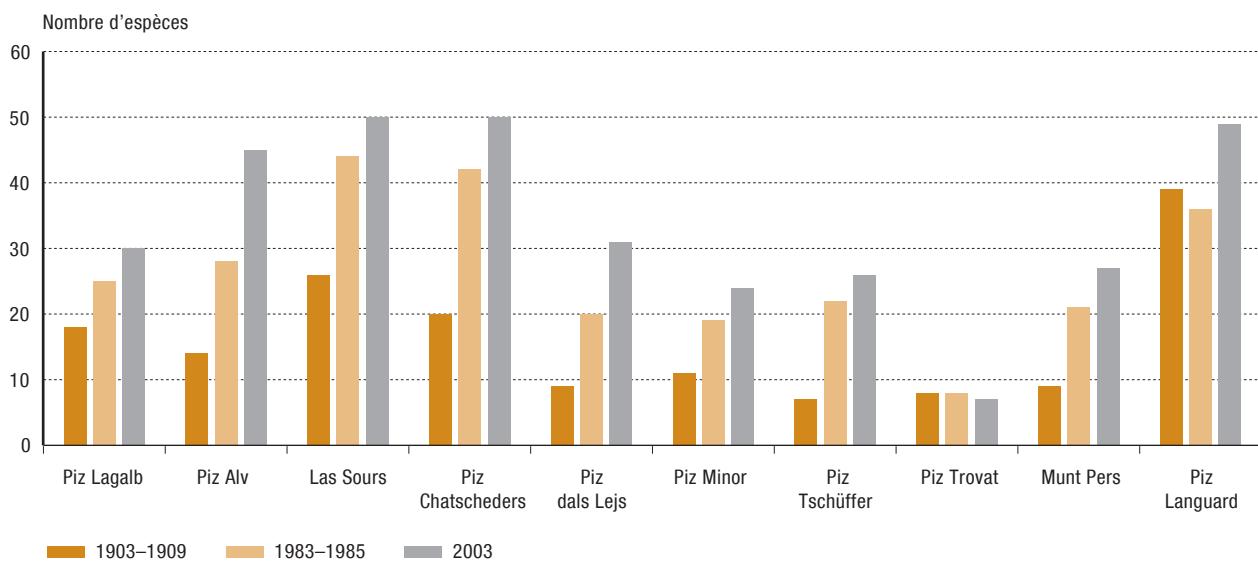
Pour estimer les conséquences des changements climatiques sur les forêts, des indicateurs sont nécessaires à des fins de description et d'évaluation. Ainsi, la disponibilité de l'eau, de même que la croissance et l'état des arbres, sont de bons indicateurs. Leur évaluation, c'est-à-dire la définition de valeurs limites et de seuils de dommages, fait encore souvent l'objet de recherches visant à approfondir la question.

non seulement du rayonnement solaire et des précipitations mais aussi de la capacité de rétention d'eau du sol et des propriétés de la végétation. La figure 54 met en évidence l'augmentation de la sécheresse estivale dans les forêts suisses au mois d'août (mois généralement le plus sec de l'année en Suisse) pendant la période allant de 1976 à 2010. L'indice EtR/EtP (évapotranspiration réelle/potentielle) indique dans quelle mesure l'évapotranspiration s'est réduite en raison du rayonnement solaire et/ou de la diminution de l'offre en eau. La valeur la plus basse est atteinte en 2003.

Une augmentation de la sécheresse estivale n'est toutefois pas forcément synonyme de «stress» ou de dommage. Il existe de nombreuses stations où l'élévation des températures est bénéfique pour les forêts, pour autant que les ressources en eau soient suffisantes. Ainsi, Jolly et al. (2005) ont constaté pendant la sécheresse de 2003 que la croissance des arbres augmentait au-dessus de 1200 m, alors qu'elle était souvent freinée aux altitudes inférieures à cause du manque d'eau (Dobbertin 2005). Les peuplements en danger se situent plus particulièrement dans les endroits secs et là où les sols peu profonds ont de faibles capacités de rétention d'eau. Il y a aussi un risque pour les peuplements particulièrement sensibles. Il s'agit là par exemple des peuplements situés à basse

Fig. 53 > Nombre d'espèces florales sur dix sommets de la région de la Bernina

Le comptage des espèces provient de trois relevés effectués entre 1903 et 2003.



gnent. Des évaluations récentes de séries temporelles de l'état des couronnes ont fait apparaître une relation avec le climat. Ceci semble confirmer la tendance représentée à la figure 54 (Dobbertin et al. en préparation).

Après l'ouragan Lothar, le printemps chaud de l'an 2000 et les arbres fraîchement tombés ont d'abord favorisé le développement du bostryche typographe (*ips typographicus*). Par la suite, la canicule et la sécheresse de l'été 2003 ont affaibli les épicéas, ce qui a mené à la plus grande attaque de bostryches jamais survenue en Suisse (Meier et al. 2005). Pendant un certain temps, les exploitations forcées du bois se sont presque multipliées par vingt par rapport à la fin des années 1990.

Dans les régions très sèches comme les vallées intralpines sèches du Valais, la croissance diminue, la mortalité croît et le pin est remplacé par le chêne pubescent, qui supporte mieux la sécheresse (Rigling et al. 2006). Une augmentation de la mortalité a été constatée entre 1990 et aujourd'hui par rapport à la période allant de 1970 à 1989 (Giuggiola et al. en préparation).

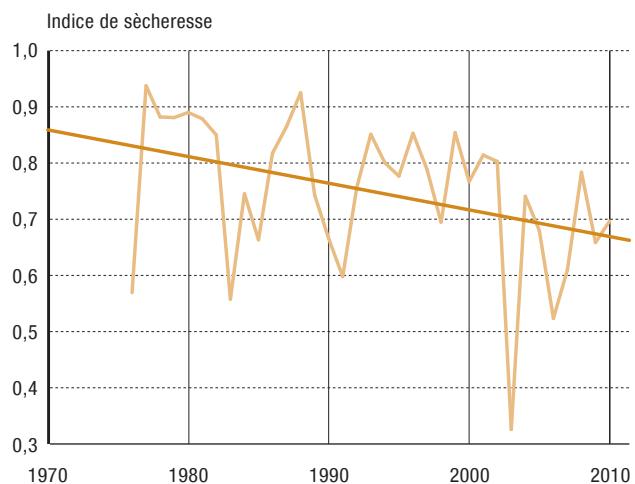
En Suisse, les hivers plus chauds ont eu entre autres comme conséquence que le gui, un semi-parasite qui vit sur des espèces d'arbres comme le sapin, le pin et certains feuillus, s'est déplacé de 200 m vers le haut (Dobbertin et al.

Rigling et al. 2006).

Le cycle de la tordeuse grise du mélèze constitue un exemple de relation hôte-insectes perturbée, probablement par les changements climatiques. Par le passé, la tordeuse se multipliait de façon particulièrement importante à des intervalles relativement réguliers de huit ans. Depuis 1981, il n'a pas été observé de sommet particulièrement marqué dans les niveaux de population de la tordeuse (Esper et al. 2007). On ignore pour l'heure si un nouvel équilibre est en train de s'instaurer entre la tordeuse et le mélèze ou si des dommages vont apparaître (p. ex. la régénération des peuplements entravée par le manque d'éclaircissement).

Fig. 54 > Tendance de l'indice de stress hydrique

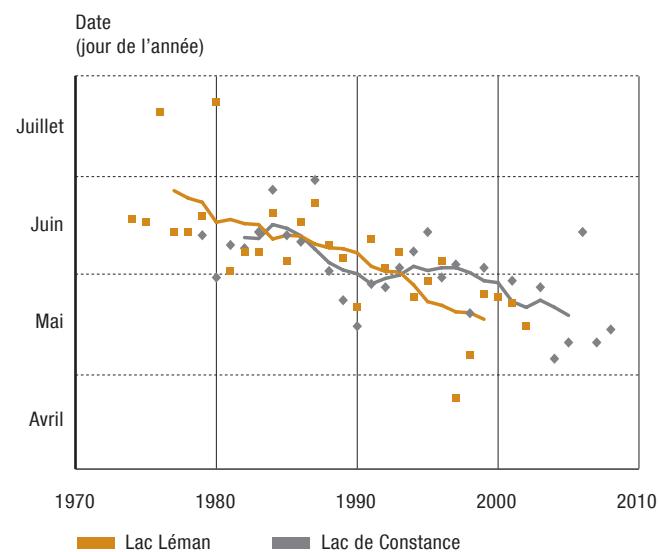
Evolution de la valeur moyenne de l'indice de stress hydrique (*EtR/EtP*) en août pendant 35 ans (1976–2010) sur 952 sites de Suisse, avec indication de la tendance.



Source: Remund et al. (2011)

Fig. 55 > Date d'apparition de la phase des eaux claires

Les dates sont obtenues en se basant sur les données de transparence maximale des eaux du lac Léman (1974–2002) et du lac de Constance (1979–2008). Les moyennes mobiles sont calculées sur sept ans.



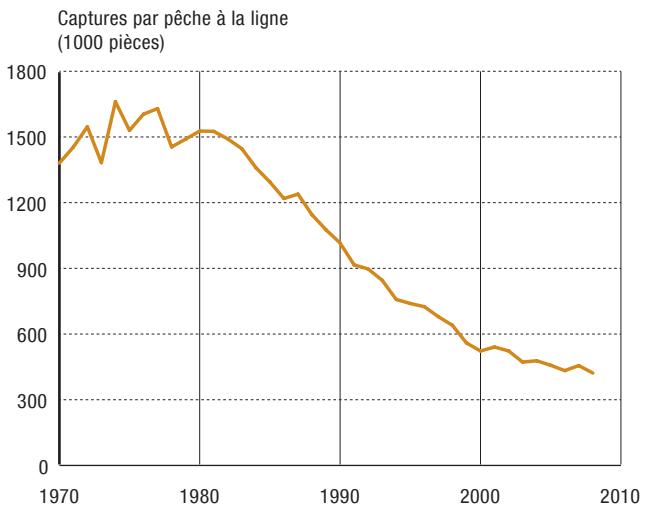
Sources: INRA (2011), Universität Konstanz (2011)

sance. De petites perturbations du climat peuvent ainsi engendrer des changements pour une espèce, qui pourront ensuite se répercuter sur la dynamique de toute la chaîne alimentaire²⁶ et éventuellement se traduire par des modifications écologiques de grandes échelles (Scheffer et al. 2001).

Il est difficile d'évaluer l'impact du climat sur les organismes végétaux aquatiques car leur croissance dépend également de facteurs non climatiques (disponibilité en nutriments, turbidité) dont l'évolution est parfois le fruit de mesures écologiques politiques. Toutefois, des changements dans la date d'occurrence de certaines étapes de la dynamique saisonnière qui se déroule dans les lacs peuvent être mis en lien avec les conditions météorologiques. En effet, le développement printanier du plancton induit une baisse de transparence dans les lacs qui est suivie par une phase de transparence maximale, appelée «phase des eaux claires». Cette phase est causée par l'activité de broutage du phytoplancton par le zooplancton, et est liée au climat par le fait que le démarrage du zooplancton dépend des températures de la fin de l'hiver et du début du printemps (Anneville et al. 2002, Straile et al. 2003b). La date d'apparition de la phase des eaux claires sert ainsi d'indicateur des effets du climat sur la dynamique des communautés phytoplanctoniques.

Fig. 56 > Captures de truites de rivière

Prises de truites de rivière des pêcheurs amateurs en Suisse au cours de la période 1970–2008. Les données concernant les captures de truites de 1971 à 2001 ont été reconstituées à partir de la statistique obligatoire de la pêche.



Source: OFEV (2012f)

Toutefois, depuis la fin des années 1980, la tendance qui se dégage est un avancement de la phase des eaux claires (figure 55), engendré par des hivers plus cléments et le développement plus précoce du zooplancton herbivore.

3.4.4 Le monde animal

Effectifs de truites de rivière

La truite de rivière est le poisson le plus important pour la pêche de loisir en Suisse. Or la statistique suisse de la pêche a enregistré une nette diminution des prises de truites au cours des 30 dernières années, en particulier dans les zones de basse altitude (figure 56). Parallèlement, la température des cours d'eau alpins et préalpins a augmenté à tous les niveaux d'altitude (Hari et al. 2006). Toutefois, elle est plus marquée dans les régions les plus basses.

Bien que les captures de poissons dépendent de différents paramètres, une partie au moins du recul constaté en Suisse pour les truites de rivière s'explique par la diminution des populations. La hausse de la température de l'eau a des conséquences négatives pour les populations.

La truite de rivière a besoin d'eau fraîche pour grandir et se reproduire. La hausse des températures incite les poissons à migrer vers l'amont, alors même que les cours d'eau, dans les Alpes et les Préalpes, traversent des obstacles naturels ou artificiels difficilement franchissables pour les poissons²⁷. Cela réduit l'habitat de la truite de rivière.

La hausse de température de l'eau augmente la fréquence d'apparition de la maladie rénale proliférative (MRP). C'est dans les zones de basse altitude que les truites en sont victimes²⁸.

Lorsque des épisodes de chaleurs estivales extrêmes se répètent, certaines populations sensibles peuvent disparaître, comme cela a été le cas pour les ombres²⁹ du Rhin en aval du lac de Constance durant la canicule de l'été 2003.

Evolution des effectifs des oiseaux nicheurs

Les changements climatiques et les changements des habitats qui en découlent ont des répercussions diverses sur les espèces d'oiseaux nicheurs (Kestenholz et al. 2008). Les espèces dont l'aire de distribution est centrée dans la zone méditerranéenne (p. ex. le bruant zizi) profitent des températures plus élevées. Les étés toujours plus chauds vont par contre bientôt amener les espèces alpines, comme le lagopède alpin, à se retirer des zones les moins élevées de leur aire de distribution. De plus en plus d'espèces hivernent dans les zones de nidification, tel le pigeon ramier qui recherchait autrefois en hiver des régions plus chaudes. La ponte qui commence ainsi tôt dans l'année leur permet d'élever un plus grand nombre de jeunes et par conséquent d'augmenter leurs effectifs. De

nification et profitent ainsi d'une plus longue période de reproduction.

Le climat a une influence sur la distribution des espèces, comme le montre une étude dans laquelle l'aire de distribution des espèces a été modélisée en tenant compte de l'effet des changements climatiques et des changements d'utilisation du sol au XXI^e siècle (R. Maggini, en préparation). Les prédictions indiquent³⁰ que de nombreuses espèces vont étendre leur aire de distribution, alors que d'autres vont la réduire. En règle générale, ces changements dans la distribution s'accompagnent de changements dans les effectifs. Une extension de l'aire de distribution repose sur une croissance de l'effectif. Dans le cas d'une baisse des effectifs, une partie croissante de l'aire de distribution initiale ne sera plus occupée.

Deux groupes d'espèces d'oiseaux nicheurs ont été définis en fonction des gains, respectivement des pertes de surfaces relatives prédictes par cette étude. Les 20 espèces avec la plus grande augmentation, respectivement diminution, ont été sélectionnées pour le calcul du Swiss Bird Index SBI® Climate Change. L'indice permet de suivre l'évolution moyenne

et l'autre (SBI® CC minus³¹) pour les espèces qui vont réduire leur aire de distribution à l'intérieur de la Suisse.

La figure 57 montre que les effectifs des espèces pour lesquelles une extension de l'aire de distribution est pronostiquée ont fortement augmenté en moyenne depuis 1990. Par contre, les espèces pour lesquelles une perte de surface est pronostiquée ne subissent pas de baisse moyenne aussi forte. Ceci peut avoir plusieurs raisons. Les oiseaux nicheurs préfèrent retourner aux territoires occupés autrefois. Un début de printemps précoce et les températures douces pendant la période de reproduction ont aussi des effets positifs pour ces espèces, même si, à long terme, elles perdront une partie de leur aire de distribution.

3.4.5 Société et économie

Effets des vagues de chaleur sur la mortalité

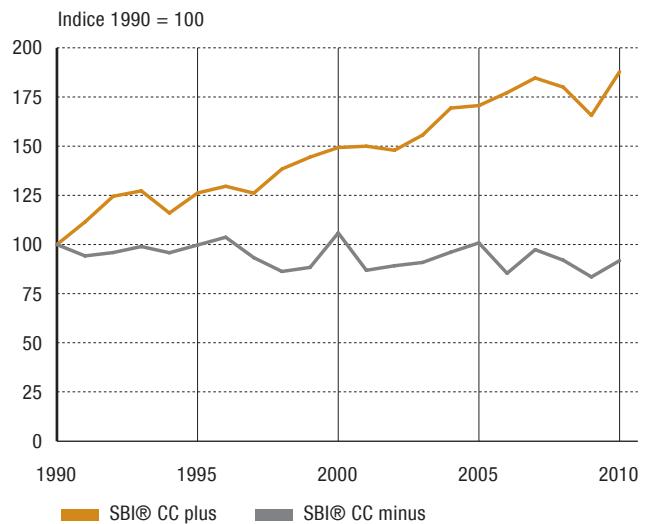
Les vagues de chaleur, appelées aussi canicules, constituent une agression directe pour l'organisme. Le corps humain, exposé à de hautes températures, doit alors tenter de se refroidir, et c'est ce qu'il fait au moyen de la transpiration. Lorsque la période d'exposition se prolonge, les premiers effets sur la santé se traduisent notamment sous la forme de déshydratation, de crampes ou de syncope de chaleur. Dans certains cas, le corps perd ses capacités de régulation thermique et de graves complications peuvent survenir. Le coup de chaleur, qui se manifeste lorsque la température corporelle augmente au-delà de 40 °C, peut même engager le pronostic vital. Tandis que les personnes âgées sont particulièrement vulnérables en raison de leur faible transpiration, les nourrissons risquent la déshydratation.

Le bilan des décès liés à la canicule de l'été 2003 illustre la gravité des conséquences pour la santé de l'exposition à des températures élevées. Selon les résultats du projet européen CANICULE (Robine 2008), la canicule de l'été 2003 a occasionné 70 000 décès supplémentaires en Europe. Par rapport à la mortalité moyenne enregistrée au mois d'août entre 1998 et 2002, la mortalité a augmenté de 37 % en France, 28 % au Portugal, 25 % au Luxembourg, 23 % en Espagne et 22 % en Italie. En Suisse, une surmortalité estimée à 975 victimes a également été observée suite à la canicule de 2003 (OFSP 2012a). Ce sont les villes qui ont été les plus touchées en raison du microclimat très chaud qu'il y règne. En effet, des îlots de chaleur urbains se forment par manque de circulation de l'air, par forte absorption du rayonnement solaire par les surfaces bâties et par dégagement de chaleur des activités humaines.

L'effet des canicules sur la mortalité est difficile à établir sur une longue période car le taux de décès dépend avant tout de la croissance démographique et des progrès de la médecine. La figure 58 met dès lors en lien le nombre de jours

Fig. 57 > Evolution des effectifs de 2 groupes d'oiseaux nicheurs (2 groupes d'espèces définis selon le Swiss Bird Index Climate Change)

Evolution actuelle des effectifs des oiseaux nicheurs pour lesquels on pronostique une forte réduction ou une forte extension de l'aire de distribution en Suisse d'ici la fin du XXI^e siècle. Les valeurs annuelles correspondent à la moyenne géométrique de la valeur indexée de chaque espèce (Zbinden et al. 2005).



Source: Station ornithologique suisse (2012)

2006 ont enregistré plus de quinze jours de canicule. Il s'avère que trois des quatre années avec la part de mortalité estivale la plus élevée coïncident avec les étés particulièrement caniculaires. Cette relation devrait s'estomper dans le futur si la mise en œuvre progressive de mesures cantonales (ex. Plan d'urgence canicule) s'avère efficace.

Propagation des tiques et cas d'encéphalite à tiques

Les tiques se tiennent souvent dans les sous-bois des forêts de feuillus, en lisière de forêt, ou dans les clairières, jusqu'à une altitude de 1500 m. Les morsures de tiques peuvent transmettre à l'homme la borréliose de Lyme, une maladie bactérienne et, plus rarement, la MEVE³⁴ (méningo-encéphalite verno-estivale, communément appelée «encéphalite à tiques»), une infection virale. Chaque année, plusieurs milliers de suisses contractent la borréliose (figure 59). Le nombre de cas estimé semble avoir baissé entre 2008 et 2010, avant d'augmenter à nouveau. Les raisons de ces fluctuations n'ont pas encore été clarifiées. En revanche, la déclaration obligatoire des cas de MEVE en Suisse met en évidence une augmentation à partir de la fin des années 1990 (figure 60). L'Office fédéral de la santé publique (OFSP) a déclaré la quasi-totalité des cantons du Plateau comme zones à risque et recommande

En Suisse, les modifications du climat ont induit une propagation des tiques en altitude (Morán Cadenas et al. 1997) et un allongement de la durée d'activité saisonnière des tiques (Burri et al. 2011). Les tiques sont sensibles aux conditions météorologiques, particulièrement aux hautes températures et faibles précipitations. Ainsi, la diminution des précipitations estivales et les étés chauds dégradent les conditions de vie des populations de tiques et peuvent influencer la circulation des agents pathogènes. A très long terme, les changements climatiques pourraient provoquer un déplacement des régions d'endémie du virus de la MEVE vers des zones d'altitude plus élevée ainsi que vers des latitudes plus septentrionales (OcCC/ProClim- 2007, Randolph et Rogers 2000). Par contre, en ce qui concerne la borréliose de Lyme, une récente étude a montré que les tiques infectées par l'agent pathogène responsable de cette maladie survivent mieux que leurs congénères saines lorsque l'air est sec et les températures élevées, laissant présager une augmentation de la densité des tiques infectées lors d'un réchauffement climatique (Herrmann et Gern 2010).

La progression actuelle de la MEVE ne peut être directement corrélée aux changements climatiques. L'augmentation des cas de MEVE enregistrés pourrait s'expliquer en partie

Fig. 58 > Mortalité en période de canicule

Nombre de jours de canicule en été (moyenne de huit stations du Plateau) et part de la mortalité estivale à la mortalité annuelle de la population.

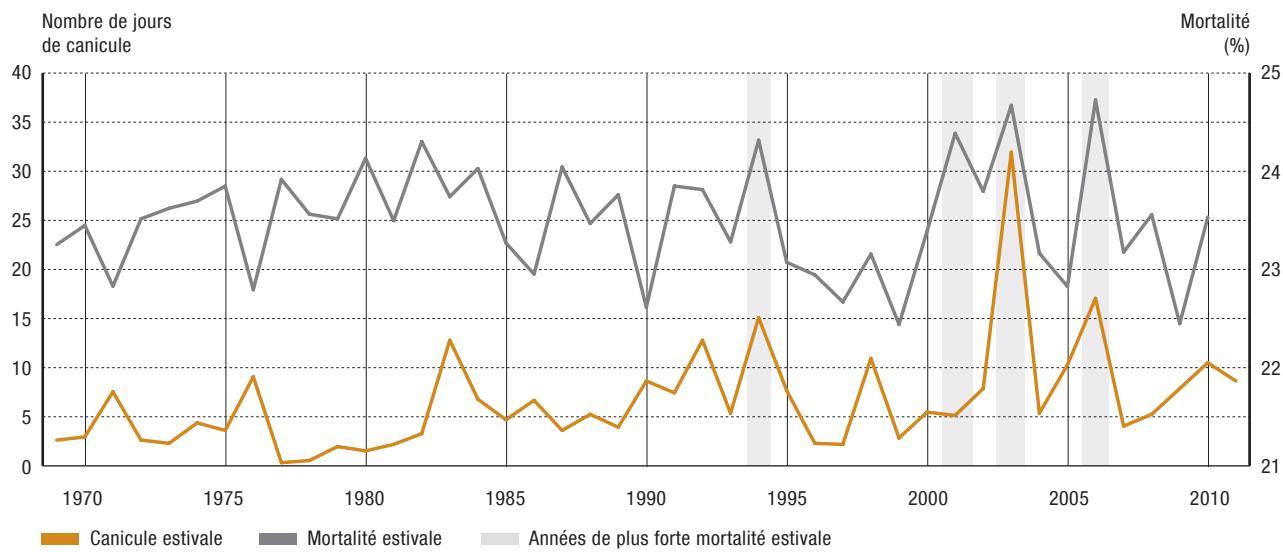
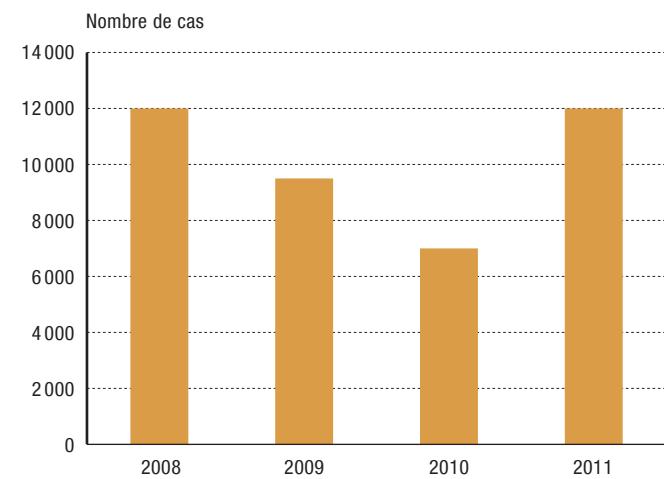


Fig. 59 > Personnes atteintes de la borrélioïse de Lyme

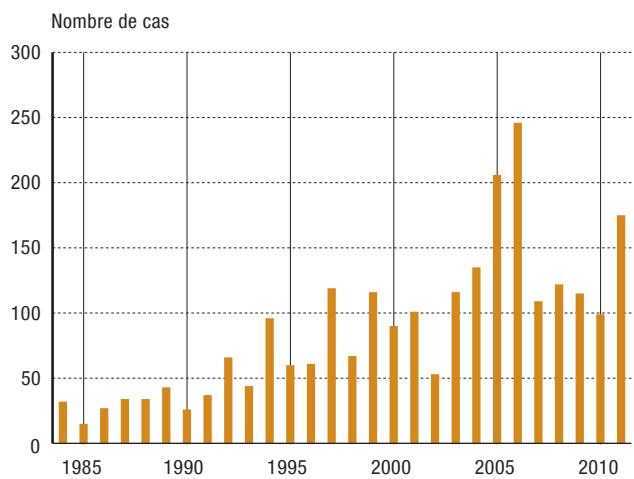
Nombre annuel de cas de la borrélioïse de Lyme de 2008 à 2011.



Source: OFSP (2012c)

Fig. 60 > Personnes atteintes de l'encéphalite à tiques

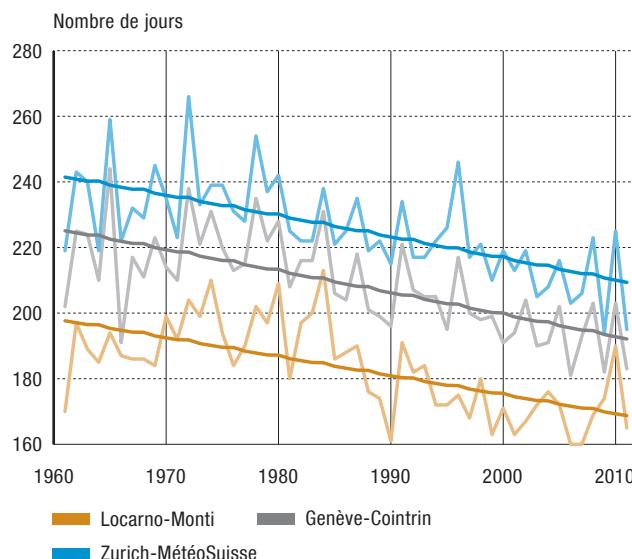
Nombre annuel de cas d'encéphalite à tiques de 1984 à 2011.



Source: OFSP (2012d)

Fig. 61 > Jours de chauffage

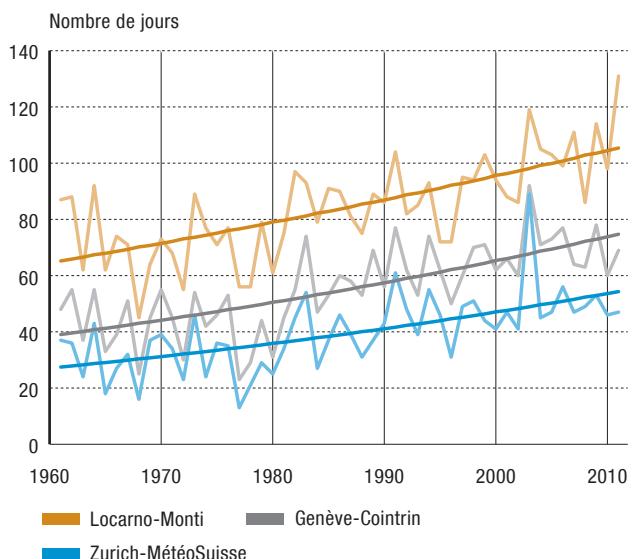
Nombre de jours par an où la température journalière est inférieure à 12 °C pendant la période 1961–2011.



Source: MétéoSuisse (2012b)

Fig. 62 > Jours de climatisation

Nombre de jours par an où la température journalière est supérieure à 18,3 °C pendant la période 1961–2011.



Source: MétéoSuisse (2012b)

la période d'activité de ces acariens (Burri et al. 2011). De plus, la chaleur influence aussi les comportements pendant les loisirs ainsi que l'habillement des personnes, ce qui accroît la probabilité de contact avec des tiques (Randolph et al. 2008).

Jours de chauffage et jours de climatisation

On appelle «jours de chauffage» les jours pendant lesquels la température extérieure moyenne ne dépasse pas 12 °C, parce qu'il faut alors généralement chauffer les locaux pour y maintenir une température de 20 °C. C'est d'ailleurs sur les jours de chauffage que se fonde le calcul des «degrés-jours de chauffage». Ces derniers sont utilisés officiellement pour calculer l'influence des conditions météorologiques sur la consommation de combustible destiné à chauffer l'eau et les bâtiments sur l'ensemble du territoire, ainsi que pour analyser les émissions de CO₂ qui y sont liées (cf. 3.1.2).

Les jours de climatisation sont utilisés ici comme un simple indicateur des conditions météorologiques dans lesquelles les températures considérées comme agréables sont dépassées à l'intérieur des locaux, ce qui suscite le désir d'enclencher la climatisation. Comme il n'existe pas de définition officielle des jours de climatisation et que ceux-ci ne sont pas enregistrés de manière systématique, c'est MétéoSuisse qui les a calculés pour le présent rapport sur la base de la définition utilisée aux Etats-Unis. Cette dernière part de l'idée que l'on recourt à la climatisation les jours où la température extérieure moyenne dépasse 18,3 °C (65 degrés Fahrenheit). Les jours de chauffage et les jours de climatisation constituent donc un indicateur de la mesure dans laquelle il faut chauffer les locaux en hiver et les rafraîchir en été.

L'évolution des jours de chauffage montre que l'on a de moins en moins besoin de chauffer en Suisse (figure 61). On constate sur les trois sites (nord, sud et ouest de la Suisse) un fort recul des jours de chauffage: de cinq à sept jours de moins par décennie, soit en tout 15 % de moins pendant la période 1961–2011.

S'agissant des jours de climatisation, une forte augmentation est observée, allant de cinq à huit jours de plus par décennie, soit en tout 50 à 70 % de plus pour la période 1961–2011 (figure 62). Bien qu'il soit sans doute inhabituel en Suisse de recourir à la climatisation dès que la température atteint 18,3 °C, cet indicateur permet de montrer que les besoins de climatisation ont augmenté dans toutes les régions du pays au cours des 50 dernières années.

Les rapports périodiques soumis à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques rendent compte de manière exhaustive des mesures prises en Suisse dans le cadre de la politique climatique (Confédération suisse 2009b). Comme les émissions de CO₂ générées en Suisse pour produire de l'énergie représentent environ 80 % des émissions de gaz à effet de serre, les mesures de politique climatique mettent l'accent sur la réduction de ces émissions. Les principaux indicateurs montrent que ces mesures ont un effet positif sur l'évolution des émissions. A ce jour, les objectifs n'ont cependant été que partiellement atteints. Il reste encore beaucoup à faire, en particulier dans le domaine des transports.

3.5.1 Aperçu des mesures de réduction des émissions

La politique climatique de la Suisse repose sur diverses politiques sectorielles, qui s'inscrivent à leur tour dans une stratégie générale de développement durable. Le Protocole de Kyoto et la loi sur le CO₂ constituent les bases légales de la mise en œuvre des mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le tableau 1 présente les principales mesures prises dans les diverses politiques sectorielles.

En Suisse, le CO₂ est le principal gaz à effet de serre. Il représente quelque 80 % des émissions de gaz à effet de serre (cf. 3.2.1). La loi sur le CO₂ tente d'agir contre cette part élevée d'émissions. La plupart des mesures de protection du climat prises par les différentes politiques sectorielles ont dès lors spécifiquement pour objectif de réduire ou de prévenir les émissions de CO₂ énergétique.

Outre les efforts visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, il devient de plus en plus important de s'adapter aux effets des changements climatiques. La première partie de la stratégie d'adaptation du Conseil fédéral (OFEV 2012g) a été adoptée en 2012 (cf. 3.6).

3.5.2 Bases légales

Période 2008–2012

La politique climatique suisse est axée sur les objectifs du Protocole de Kyoto et de la loi sur le CO₂. Dans le cadre de ce protocole, la Suisse s'est engagée à réduire de 8 %, par rapport aux chiffres de 1990, la somme des émissions de six gaz à effet de serre produites en moyenne sur la période allant de 2008 à 2012. Le protocole autorise la prise en compte de l'effet de puits de carbone de la forêt et, dans une certaine mesure, l'achat de certificats de réduction des émissions étrangers. Dans le même temps, la loi sur le CO₂ doit permettre de réduire de 10 %, par rapport à 1990, les émissions de CO₂ dues à l'utilisation d'agents fossiles comme source d'énergie. Cette réduction doit être opérée, d'une part, en augmentant l'effica-

Pour atteindre ces objectifs, la loi sur le CO₂ permet également de recourir à des certificats de réduction des émissions étrangers et à l'effet de puits de carbone de la forêt.

Les objectifs de la loi sur le CO₂ et du Protocole de Kyoto sont compatibles. La réduction de 10 % des émissions de CO₂ visée par le droit suisse répond aussi aux exigences du Protocole de Kyoto, à condition que la somme des émissions des autres gaz reste à peu près constante. La loi sur le CO₂ contient en outre un objectif pour les combustibles (–15 %) et un objectif pour les carburants (–8 %). La réduction des émissions doit être possible en recourant à diverses mesures:

- > mesures librement consenties par les milieux économiques et les particuliers;
- > mesures prises dans le cadre d'autres politiques sectorielles (p. ex. SuisseEnergie, RPLP);
- > taxe (incitative) sur le CO₂ prélevée sur les combustibles;
- > affectation partielle de la taxe sur le CO₂ (au financement de mesures dans le secteur du bâtiment);
- > exonération de la taxe sur le CO₂ et système d'échange de quotas d'émission pour les entreprises produisant beaucoup d'émissions;
- > centime climatique perçu sur les carburants;
- > mécanismes de flexibilité du Protocole de Kyoto (achat de certificats de réduction des émissions issus de projets à l'étranger);
- > prescriptions en matière d'émissions de CO₂ applicables aux voitures neuves.

A la fin 2010, les différentes conventions volontaires conclues ou sur le point d'être conclues sous l'égide de l'Agence de l'énergie pour l'économie (AEnEC) et la convention particulière passée entre le DETEC et l'industrie suisse du ciment couvraient quelque 44 % des émissions de CO₂ de l'économie suisse et concernaient plus de 2000 entreprises. Les conventions conclues avec l'AEnEC portent avant tout sur des mesures liées à la consommation d'énergie des installations fixes (chauffages, processus industriels).

Le centime climatique, qui est également une mesure librement consentie par l'économie, a été introduit en 2005: un supplément de 1,5 centime perçu sur chaque litre d'essence ou de diesel permet de constituer des fonds pour le financement de projets de réduction des émissions en Suisse et à l'étranger. En 2007, le Parlement a approuvé deux nouvelles mesures: l'introduction en janvier 2008 de la taxe sur le CO₂ prélevée sur les combustibles, qui s'élevait alors à 12 francs par tonne de CO₂, et l'octroi d'allégements fiscaux pour les biocarburants. Suite à l'introduction de la taxe sur le CO₂ prélevée sur les combustibles, plus de 1000 entreprises ont à ce jour

Politiques sectorielles et mesures	Nom de la politique ou de la mesure	Objectifs et/ou activités concernés	Gaz à effet de serre concernés	Statut	Période d'application de la mesure
Climat	Loi sur le CO ₂	Réduction de 10 % des émissions moyennes de CO ₂ énergétique sur la période 2008 à 2012 par rapport à 1990.	CO ₂	appliqué	en vigueur depuis le 1.5.2000
	Système d'échanges de quotas d'émission (cap and trade)	Flexibilité pour respecter les accords négociés pour les entreprises énergivores	CO ₂	appliqué	en vigueur depuis 1.1.2008
	Taxe d'incitation sur le CO ₂ appliquée aux combustibles fossiles	<ul style="list-style-type: none"> - 12 francs/t CO₂ sur les combustibles fossiles en 2008 et 2009, - augmentation à 36 francs/t CO₂ à partir de 2010 	CO ₂	appliqué	en vigueur depuis 1.1.2008
	Exemption de la taxe sur le CO ₂ (négociation d'objectifs)	Limitation des émissions afin d'être exempté de la taxe sur le CO ₂	CO ₂	appliqué,	en vigueur depuis le 1.1.2008
	Programme Bâtiments national d'assainissement (volet national)	Assainissement des bâtiments existants	CO ₂	appliqué	en vigueur depuis 1.1.2010
	Centime climatique	0,015 francs/litre de diesel ou d'essence => financement de projets de réduction en Suisse et à l'étranger	CO ₂	appliqué	en vigueur de 2005 à 2012
	Utilisation des mécanismes de flexibilité selon le Protocole de Kyoto	Certificats de réduction des émissions pour respecter les accords négociés dans le cadre du Protocole de Kyoto	CO ₂	appliqué	possible depuis 2008
Climat / Energie	Accords volontaires avec le commerce et l'industrie	Réduction des émissions de CO ₂ et de l'utilisation de l'énergie	CO ₂	appliqué	possible depuis 2000
	Programme Bâtiments national d'assainissement (volet cantonal)	Utilisation accrue des énergies renouvelables, réduction de la déperdition de chaleur, installations techniques	CO ₂	appliqué	en vigueur depuis 1.1.2010
	Programme SuisseEnergie; plan d'action pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique	Cible spécifique par secteur	CO ₂	appliqué	en vigueur depuis 2001
	Programmes cantonaux supplémentaires dans le domaine des bâtiments	Supplément au programme national	CO ₂	appliqué	en vigueur depuis 1.1.2010
	Code de construction élaboré par les cantons	Consommation d'énergie des bâtiments limitée	CO ₂	processus d'adoption par les cantons en cours	en vigueur depuis 1.1.1992, adapté en 2000, 2008
	Programmes d'économie d'énergie (Programme Suisse Energie)	Réduction des émissions de CO ₂ et d'énergie	CO ₂	appliqué	lancé en 2001

(suite page suivante)

Emissions (Directive Aircraft Engine Emissions Charges)		Réduction des émissions de NO _x locales et pendant la phase de croisière		Ozone	planifié	au niveau européen en 2009
Renforcement du règlement pour le NO _x des moteurs d'avion		Réduction des particules de suie nanométriques		Suie et traînées de condensation	planifié	
Introduction de normes pour la masse et le nombre de particules émises par les moteurs d'avion		Internalisation des coûts externes		CO ₂	appliqué	en vigueur depuis 2001
Redevance sur le trafic des poids lourds liée aux prestations		Réduction des polluants atmosphériques		Pollution atmosphérique	appliqué, régulièrement renforcé	en vigueur depuis 1974
Normes d'émission EURO		Réduction des émissions de CO ₂		CO ₂	appliqué	en vigueur depuis 2008
Réduction de la taxe sur les huiles minérales pour les biocarburants et le gaz naturel		Etiquette énergie pour les voitures		CO ₂ , ozone	appliqué	en vigueur depuis 2003
Prescriptions concernant les émissions de CO ₂ des voitures de tourisme		Réduction des émissions moyennes de CO ₂ des voitures de tourisme neuves		CO ₂	appliqué	en vigueur depuis 1.5.2012
Gaz synthétiques	Réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim)	Réduction de l'utilisation et des émissions de gaz à effet de serre synthétiques dans les principaux secteurs		HFCs, PFCs, SF ₆ , CFC, HCFC	appliqué	en vigueur depuis 2005
	Substances dangereuses pour l'environnement (Osubst)	<ul style="list-style-type: none"> - Limitation de l'utilisation et des émissions des gaz à effet de serre synthétiques (substance stable) et interdiction totale des CFC - Accord volontaire avec la branche pour réduire les émissions de SF₆ 		HFCs, PFCs, SF ₆ , CFC, HCFC	appliqué	en vigueur depuis 2003
Agriculture	Prestations écologiques (OPD)	Bilan de fumure équilibré, part équitable de surfaces de compensation écologique, rotation des cultures, protection appropriée du sol, sélection et utilisation ciblée des produits de traitement des cultures, bien-être des animaux		CH ₄ , N ₂ O, CO ₂	appliqué	en vigueur depuis 1998
	Stratégie Climat pour l'agriculture	Réduction des gaz à effet de serre de l'agriculture		CH ₄ , N ₂ O, CO ₂	adopté et à préciser dans le cadre de la politique agricole	lancée en 2011
	Programme d'utilisation durable des ressources naturelles	Utilisation efficace des ressources naturelles		CH ₄ , N ₂ O, CO ₂	appliqué	en vigueur depuis 2008

des sols, changement d'utilisation des sols et forêts (LULUCF)	forestières (LFo)	compensée par une afforestation sur une surface équivalente			
	Gestion durable des forêts (LFo)	Dans les forêts, les volumes récoltés ne doivent pas excéder l'accroissement	CO ₂	appliqué	inscrite depuis 1993
	Programme bois 21	Utilisation accrue du bois comme combustible	CO ₂	terminé	lancé en 2001 et terminé en 2008
	Plan d'action Bois	Augmentation de la récolte et de l'utilisation du bois à 8,5*106 m ³ /a	CO ₂	appliqué	lancé en 2008 et terminé en 2012
Déchets	Loi sur la protection de l'environnement (LPE)	Recyclage des déchets	CO ₂	appliqué	en vigueur depuis 1997
	Ordonnance sur le traitement des déchets (OTD)	Mise en décharge de déchets combustibles interdite	CH ₄ , CO ₂	appliqué	en vigueur depuis 2000
	Usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) – Charte du climat	Augmentation de l'efficacité énergétique des UIOM et optimisation de la récupération de matières de valeur telles que le fer et les métaux non ferreux	CO ₂	adopté	en vigueur depuis 2012

Source: Adapté de Confédération suisse (2009b)

éte exonérées de la taxe sur le CO₂.

En été 2009, le Parlement a décidé d'affecter un tiers des recettes de la taxe sur le CO₂ prélevée sur les combustibles (mais au plus 200 millions de francs par an) au financement de mesures destinées à réduire les émissions dans le secteur du bâtiment. Comme la taxe sur le CO₂ est passée à 36 francs par tonne avec effet au 1^{er} janvier 2010, l'affectation partielle du produit de cette taxe permet de mettre près de 200 millions de francs par an à disposition du Programme Bâtiments.

Afin d'évaluer si l'objectif en terme de réduction des émissions de gaz à effet de serre est atteint, le bilan des émissions au sens du Protocole de Kyoto (tous les gaz) a été estimé pour la période 2008–2012 sur la base d'un scénario d'émission faible et élevée et en tenant compte des certificats de réduction des émissions étrangers, de l'effet de puits de carbone des forêts suisses et des quotas d'émission reportés sur la période d'engagement suivante (tableau 2). Ce bilan montre que l'atteinte de la valeur cible est encore entachée de grandes incertitudes. Selon l'hypothèse d'une évolution moyenne, l'écart à l'objectif serait proche de zéro; l'objectif serait donc atteint. Mais un scénario négatif n'est pas exclu et l'objectif pourrait être manqué. Cette difficulté à stabiliser les émissions est le résultat d'évolutions divergentes. En effet, les mesures, qui certes ont eu des effets positifs, sont largement compensées par la croissance constatée dans le domaine des transports, ainsi que par la tendance générale à l'accroissement des émissions résultant de la croissance économique et démographique.

Période 2013–2020

La loi sur le CO₂ a été révisée pour la période postérieure à 2012. En décembre 2011, le Parlement a décidé de réduire, à l'horizon 2020, les émissions de gaz à effet de serre de notre pays d'au moins 20 % par rapport à leur niveau de 1990. Comme la loi sur le CO₂ révisée met l'accent sur les prestations de réduction fournies en Suisse, les potentiels de réduction indigènes sont exploités, et des impulsions sont données en vue d'accroître l'utilisation d'agents énergétiques renouvelables à faible taux d'émissions, de favoriser l'innovation technologique et de soutenir la création d'emplois dans des secteurs d'avenir. Les mesures indigènes d'amélioration de l'efficacité présentent en outre l'avantage de réduire la dépendance de la Suisse envers les importations d'énergie et de contribuer à réduire les atteintes à la santé dues à la pollution atmosphérique. La loi sur le CO₂ révisée entrera en vigueur le 1^{er} janvier 2013.

Les nouvelles bases légales s'inscrivent donc dans la continuité de l'actuelle loi sur le CO₂. Les mesures et instruments qui ont fait leurs preuves sont reconduits et améliorés, et de nouvelles mesures sont introduites:

- > taxe (incitative) sur le CO₂ prélevée sur les combustibles;
- > affectation partielle de la taxe sur le CO₂ (au financement de mesures dans le secteur du bâtiment);
- > exonération de la taxe sur le CO₂ et système d'échange de quotas d'émission pour les entreprises produisant beaucoup d'émissions;
- > obligation, pour les importateurs de carburants fossiles, de compenser les émissions de leurs produits;
- > obligation, pour les exploitants de centrales thermiques à combustibles fossiles, de compenser les émissions de ces dernières;
- > mécanismes de flexibilité du Protocole de Kyoto (achat de certificats de réduction des émissions provenant de projets réalisés à l'étranger).
- > Prescriptions concernant les émissions de CO₂ des nouvelles voitures de tourisme

3.5.3 Consommation et émissions de CO₂ des voitures neuves

En 2002, le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) a conclu une convention avec l'Association des importateurs suisses d'automobiles (AISA) qui vise à réduire la consomma-

Tableau 2 > Réalisation des objectifs du Protocole de Kyoto

Valeurs annuelles pour la période 2008–2012.

	Emissions de gaz à effet de serre en millions de tonnes d'éq.-CO ₂ par an
Emissions estimées 2008–2012	51,4 à 53,1
Certificats de réduction des émissions étrangers (Centime Climatique)	-3,0 à -2,8
Effet de puits de carbone des forêts suisses	-1,8 à -0,4
Quotas d'émission reportés sur la période d'engagement suivante (banking par les entreprises participant au système d'échange de quotas d'émission)	0,25 à 0,35
Emissions nettes 2008–2012	46,9 à 50,3
Valeur cible du Protocole de Kyoto (selon l'allocation des droits d'émission par l'ONU)	48,6
Ecart (une valeur négative signifie un dépassement des objectifs)	-1,7 à +1,7

Source: OFEV (2012h)

voitures neuves aurait dû être abaissée à 6,4 l/100 km en 2008. A noter que le nombre de voitures neuves vendues se rapportent aux véhicules recensés par l'association des importateurs suisses d'automobiles (autosuisse). Les voitures introduites par les importateurs indépendants et privés ne sont pas considérées. Le nombre total de voitures neuves mises en circulation s'élevait, selon l'Office fédéral de la statistique, à 327 955 (OFS 2012a).

En 2011, la consommation moyenne des voitures neuves³⁵ s'élevait à 6,4 l/100 km, ce qui correspond à une valeur moyenne d'émissions de 155 g de CO₂/km. L'objectif fixé pour 2008, clairement manqué à l'époque, n'aura donc pu être atteint qu'avec trois ans de retard. Au vu de cette situation, le Parlement a décidé d'introduire, comme l'Union européenne, une valeur cible contraignante de 130 g de CO₂/km. Les dispositions découlant de cette décision sont entrées en vigueur en mai 2012 et la valeur cible doit être atteinte, en moyenne par le parc des voitures neuves, d'ici 2015. Les importateurs qui manquent leur objectif doivent s'acquitter, à titre de sanction, d'un certain montant pour chaque gramme de CO₂ qui dépasse la valeur cible. Les prescriptions concernant les émissions de CO₂ sont accompagnées d'une étiquette-

de carburant lors de la répartition des véhicules dans les catégories d'efficacité.

Sous la pression des objectifs contraignants, les émissions moyennes des voitures neuves ont nettement diminué depuis 2008. La tendance à la baisse du poids des véhicules, qui semblait se dessiner en 2008 et 2009, ne s'est pas confirmée (tableau 3). Comme le montre la figure 63, la motorisation des véhicules a néanmoins affiché une forte tendance à la baisse (downsizing). La cylindrée moyenne des voitures neuves est en effet passée de 1987 cm³ en 2006 à 1780 cm³ en 2011. Pendant la même période, la part des véhicules ayant une cylindrée inférieure à 1800 cm³ est passée de 42 % à près de 60 %.

La part des véhicules diesel a fortement augmenté jusqu'en 2005, puis s'est à peu près stabilisée autour de 30 %. Si les émissions moyennes de CO₂ des véhicules diesel ont longtemps été inférieures à celles des véhicules à essence, les proportions se sont inversées au cours des dernières années (158 g/km contre 153 g/km en 2011). Cette évolution est due au fait que le «downsizing» concerne avant tout les véhicules à essence et que les versions diesel sont surtout commercialisées (et achetées) pour les véhicules dotés d'une motorisation

Tableau 3 > Evolution de la consommation des voitures neuves

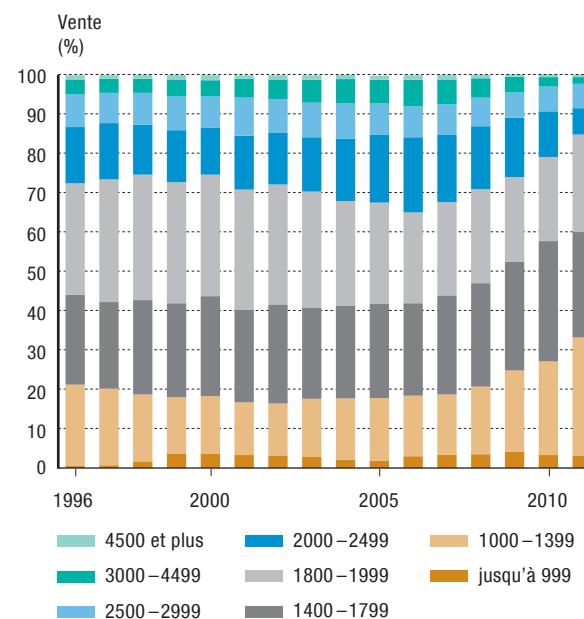
Evolution des ventes et des valeurs moyennes en matière de consommation de carburant, d'émissions de CO₂ et de poids pour les voitures de tourisme mises en circulation pour la première fois.

	Voitures neuves vendues (auto-suisse)	Consommation moyenne en l/100 km	Emissions moyennes en g de CO ₂ /km	Poids moyen en kg
2003	265 696	7,99	195	1440
2004	266 605	7,82	192	1462
2005	257 886	7,67	189	1478
2006	265 482	7,62	187	1491
2007	282 059	7,43	183	1502
2008	286 341	7,14	175	1473
2009	256 974	6,86	167	1448
2010	279 908	6,62	161	1456
2011	294 082	6,39	155	1483
Objectif visé par la Convention		2008: 6,40		

Source: auto-suisse (2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012)

Fig. 63 > Ventes de voitures neuves selon la catégorie de cylindrée

Voitures neuves: part des différentes catégories de cylindrées (en cm³) vendues pendant la période 1996–2011.



Source: auto-suisse (2012)

a essence.

3.5.4 Mesures dans le domaine des bâtiments

En Suisse, les bâtiments sont responsables de plus de 40% des émissions indigènes de CO₂ et de la consommation d'énergie. Plus de deux tiers des bâtiments sont chauffés aux énergies fossiles et environ un million et demi de bâtiments auraient besoin d'un assainissement énergétique. Le potentiel étant reconnu, la Confédération et les cantons mettent en œuvre diverses mesures de réduction des émissions de CO₂ et de la consommation d'énergie dans le cadre de la législation sur le CO₂ et sur l'énergie.

Programmes d'encouragement (figure 64): depuis 2000, la Confédération verse chaque année aux cantons des contributions globales pour les programmes visant à encourager l'utilisation économique et rationnelle de l'énergie ainsi que le recours aux énergies renouvelables et la récupération de la chaleur.

En outre, le Programme Bâtiments, qui est mené depuis 2010 dans tout le pays par la Confédération et les cantons, encourage l'assainissement de l'enveloppe des bâtiments par des subventions uniformes pour l'ensemble de la Suisse (volet national) et promeut l'utilisation des énergies renouvelables,

plus haut (volet cantonal). Ce programme est financé par l'affectation partielle des recettes de la taxe sur le CO₂ prélevée sur les combustibles et par les contributions cantonales.

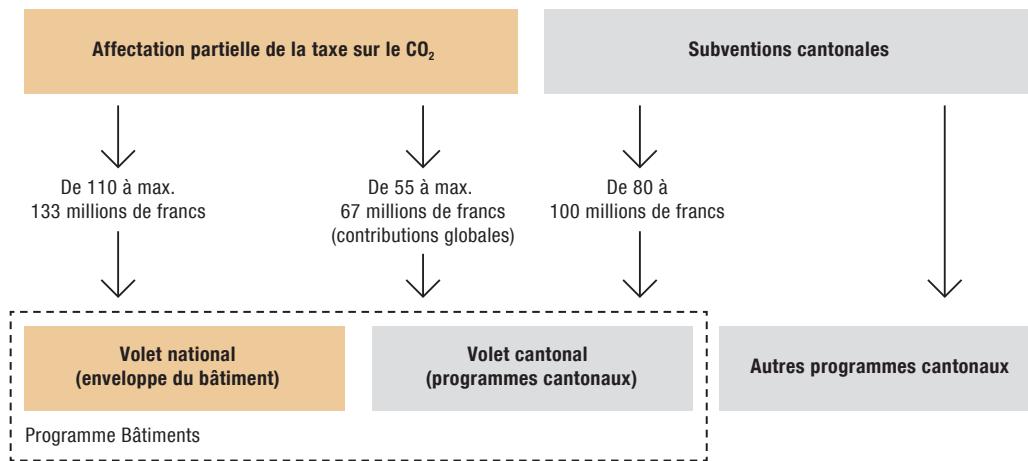
A cela s'ajoutent d'autres programmes cantonaux dans le domaine de l'énergie: encouragement de mesures supplémentaires dans le bâtiment et du photovoltaïque, offre de conseils en énergie, etc.

Financement des programmes d'encouragement (figure 64): la loi sur le CO₂ constitue la base légale du Programme Bâtiments. Elle prévoit que pendant une période de dix ans, un tiers du produit de la taxe sur le CO₂ prélevée sur les combustibles, mais au maximum 200 millions de francs par an, devra être consacré à la promotion des mesures visant à réduire les émissions de CO₂ des bâtiments (affectation partielle de la taxe sur le CO₂). Dans le cadre de la révision de la loi sur le CO₂ pour la période postérieure à 2012, le Parlement a porté ce plafond de 200 à 300 millions de francs par an.

Deux tiers au moins de l'affectation partielle du produit de la taxe sont consacrés chaque année au volet national du programme (de 110 jusqu'à un maximum de 133 millions de francs). Un tiers au plus est injecté dans les budgets cantonaux sous forme de contributions globales (de 55 jusqu'à un maximum de 67 millions de francs). Le montant versé à chaque

Fig. 64 > Vue d'ensemble des programmes d'encouragement visant à réduire les émissions de CO₂ et des flux financiers dans le domaine du bâtiment

Le schéma ci-dessous présente la structure suisse d'encouragement dans le domaine du bâtiment et les valeurs indicatives des flux financiers: les fonds effectivement disponibles varient en fonction du produit de la taxe sur le CO₂ et du budget alloué par les cantons aux programmes d'encouragement dans le domaine du bâtiment.



obtenir des contributions globales, le canton doit mettre à disposition une enveloppe budgétaire d'un montant au moins égal à ces dernières. Ainsi, un montant de 80 à 100 millions de francs par an provenant des budgets cantonaux vient s'ajouter chaque année au volet cantonal du programme.

Dans le cadre d'autres programmes cantonaux qui ne font pas partie du Programme Bâtiments, des fonds supplémentaires sont mis à disposition pour des mesures visant à réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂. En 2011, quelque 60 millions de francs ont été versés au titre de ces programmes.

Un total de 300 à 400 millions de francs est donc disponible chaque année pour l'encouragement des mesures d'assainissement énergétique dans le domaine du bâtiment.

Efficacité des programmes d'encouragement: les aides cantonales accordées aux assainissements de bâtiments, aux chauffages à bois, à la récupération de chaleur, aux panneaux solaires, aux rénovations et nouvelles constructions MINERGIE, aux pompes à chaleur, etc. ont permis de mettre en œuvre, pendant la période allant de 2001 à 2011, des mesures qui, sur l'ensemble de leur durée de vie, permettront d'éviter l'émission de quelque 14,1 millions de tonnes de CO₂ (effet de tous les programmes cantonaux).

Les effets de réduction de l'assainissement énergétique de l'enveloppe des bâtiments, c.-à-d. de l'isolation des toits, des façades, etc. s'élèvent à 1,8 million de tonnes de CO₂ sur toute la durée de vie des mesures prises en 2010 et 2011. Ce chiffre peut paraître modeste, mais il ne manquera pas de croître au cours des huit années restantes du programme (effet du volet national).

Les mesures d'encouragement prises pendant la période allant de 2001 à 2011 auront permis, sur l'ensemble de leur durée de vie, d'éviter l'émission de 15,9 millions de tonnes de CO₂. La figure 65 montre l'évolution des économies de CO₂ au fil des ans. Les oscillations qui marquent la période allant de 2001 à 2008 sont essentiellement dues à la diversité des facteurs d'efficacité des mesures mises en œuvre l'année en question. Par exemple, si des aides ont été accordées pour un grand nombre de chauffages à bois au cours d'une année donnée, l'effet de réduction des émissions de CO₂ augmente. De plus, le modèle de calcul a évolué au fil des ans, ce qui explique notamment la baisse d'efficacité enregistrée pour les années 2007 et 2008. Une comparaison détaillée des valeurs annuelles n'est donc pas possible. Les fonds disponibles au titre des programmes d'encouragement ont fortement augmenté à partir de 2009 et le Programme Bâtiments a été introduit en 2010. L'effet de réduction des émissions de CO₂ des programmes d'encouragement dans le domaine du bâtiment devrait continuer à augmenter dans les années à venir.

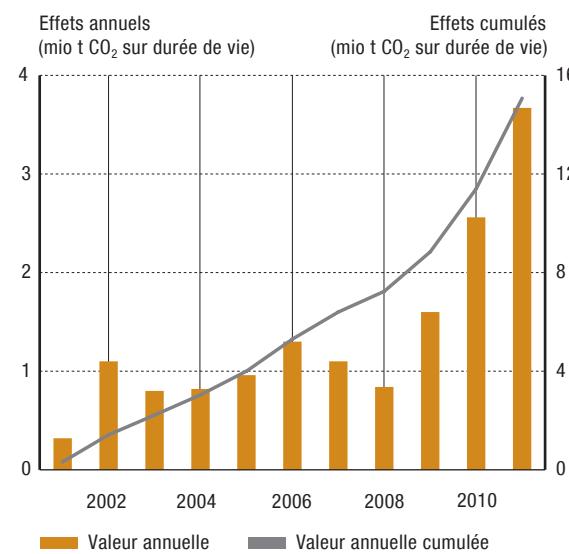
domaine du bâtiment. Il s'agit essentiellement du modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC), qui définit le cadre des législations cantonales en matière d'énergie et fixe de façon contraignante certaines valeurs limites de consommation. De plus, des mesures indirectes telles que des labels (MINERGIE, Cité de l'énergie, etc.), des normes (SIA), des offres de formation et des mesures de communication, viennent renforcer l'efficacité des mesures directes. Dans le cadre de l'aménagement du territoire, du droit du bail et du droit fiscal, des incitations supplémentaires sont mises en place afin de favoriser l'utilisation économe de l'énergie.

3.5.5 Evolution des nouvelles énergies renouvelables

La force hydraulique joue traditionnellement un rôle important en Suisse, du fait de sa topographie et de la disponibilité de ressources en eau considérables. Par conséquent, la part des énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie (et en particulier dans la production d'électricité) y est élevée en comparaison européenne. La stratégie suisse pour le développement durable considère qu'assurer un approvisionnement en énergie durable et respectueux du climat est un défi clé. Par conséquent, il faut améliorer l'efficacité énergétique et encourager l'utilisation des énergies renouvelables.

Fig. 65 > Emissions de CO₂ évitées grâce aux programmes d'encouragement dans le domaine du bâtiment

Evolution des émissions de CO₂ évitées grâce aux programmes d'encouragement dans le domaine du bâtiment pendant la période allant de 2001 à 2011 (effets cumulés sur la durée de vie des bâtiments).



Source: OFEN (2012b)

énergies renouvelables dans la production d'électricité et de chaleur. Il s'agit en particulier de prendre en compte les nouvelles énergies renouvelables (p. ex. le solaire). Comme les prix des agents énergétiques conventionnels continueront d'augmenter à l'avenir, les énergies renouvelables gagneront en compétitivité.

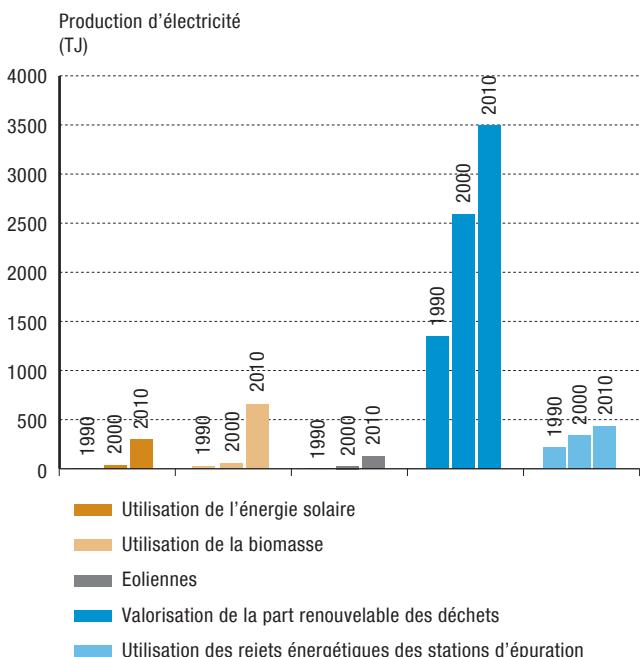
En 2010, les énergies renouvelables ont couvert près de 19,5 % de la consommation totale d'énergie. C'est l'hydraulique qui apporte la plus grande contribution (12,2 %), suivie par la biomasse (bois et biogaz, 4,3 %), la part renouvelable des déchets (1,2 %) et la chaleur ambiante (1,2 %). D'autres sources d'énergie renouvelables, par exemple le solaire et l'éolien, ne couvrent pour l'heure qu'une part minime de la consommation d'énergie. Les nouvelles énergies renouvelables (solaire, éolien, biomasse, part renouvelable des déchets, chauffage à distance et chaleur ambiante) connaissent toutefois un développement marqué depuis 1990. Depuis cette année-là, la production d'électricité de source renouvelable (hydraulique non comprise) a plus que triplé et la production de chaleur d'origine renouvelable a doublé.

La plus grande part (et la plus forte croissance en termes absolus) provient de la part renouvelable des déchets (figure 66). Cette situation s'explique par l'agrandissement et la modernisation de nombreuses usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) pour des raisons liées à la politique de gestion des déchets et à la protection de l'air. La part renouvelable des déchets comprend les déchets renouvelables des UIOM, des chaudières à déchets renouvelables, des installations à gaz de décharge et à biogaz.

L'énergie renouvelable effectivement produite à partir des eaux usées, à savoir le gaz d'épuration et le biogaz provenant d'installations d'épuration communales et industrielles, a plus que doublé. L'énergie tirée de la biomasse a elle aussi fortement augmenté depuis 1990, surtout dans le domaine de la production d'électricité, où elle a été multipliée par 25. Sont comptabilisés comme de la biomasse les chauffages à bois automatiques, les chauffages en partie au bois et les installations de biogaz agricole. L'éolien et le solaire n'étaient guère présents en 1990. La part de l'éolien dans la production d'électricité à partir des nouvelles énergies renouvelables

Fig. 66 > Production nette d'électricité des nouveaux agents renouvelables

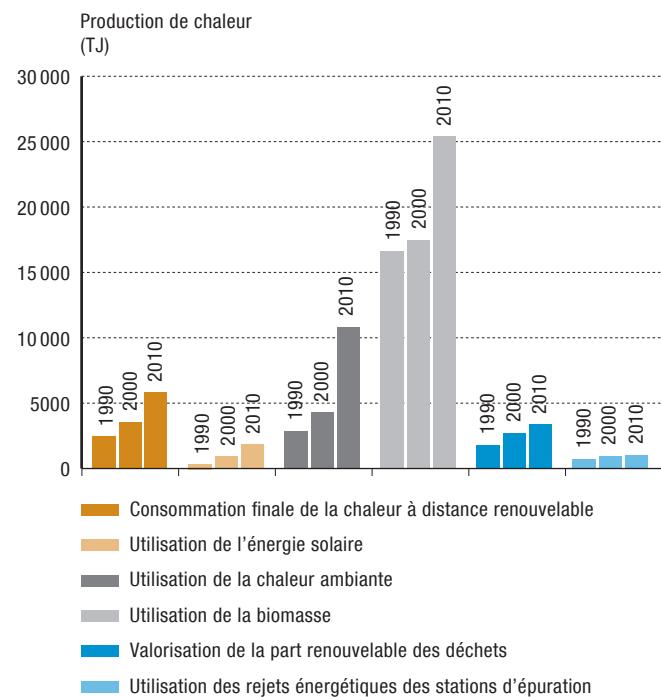
Evolution de la production nationale entre 1990 et 2010.



Source: OFEN (2011b)

Fig. 67 > Production de chaleur des nouveaux agents renouvelables

Evolution de la production nationale entre 1990 et 2010.



Source: OFEN (2011b)

La production de chaleur a elle aussi augmenté pour toutes les nouvelles énergies renouvelables (figure 67). La chaleur solaire utilisée a triplé, ce qui constitue la plus forte augmentation relative. En chiffres absolus, c'est toutefois la quantité annuelle d'énergie tirée de la biomasse et de la chaleur ambiante qui a le plus augmenté. Dans ces deux domaines, on observe une croissance particulièrement forte depuis 2005.

Comme on ne pourra, dans le meilleur des cas, que limiter l'élévation des températures et les modifications du régime des précipitations, l'adaptation aux effets des changements climatiques est appelée à prendre de plus en plus d'importance, en Suisse comme dans d'autres pays. C'est la raison pour laquelle le Conseil fédéral met en place une stratégie d'adaptation qui définit le cadre d'une procédure coordonnée au niveau fédéral. Cette stratégie d'adaptation comporte deux volets: le premier, qui a été adopté le 2 mars 2012, décrit les objectifs, les défis et les champs d'action de l'adaptation aux changements climatiques (OFEV 2012g). Sur cette base, des mesures concrètes d'adaptation seront élaborées, puis présentées sous une forme résumée, et coordonnées dans un plan d'action à paraître d'ici fin 2013, qui constituera le deuxième volet de la stratégie. Cette stratégie, qui porte sur les mesures d'adaptation au niveau de la Confédération, se focalise sur les secteurs les plus exposés: gestion des eaux, agriculture, économie forestière, gestion des dangers naturels, énergie, tourisme, gestion de la biodiversité, santé et développement territorial.

Certaines solutions choisies pour répondre aux changements climatiques ne sont pas seulement très coûteuses, mais accroissent encore la pression exercée sur les ressources naturelles. Ainsi, sous l'effet conjugué de la baisse des précipitations et d'une consommation élevée, l'eau pourrait ponctuellement venir à manquer. Par ailleurs, si certaines réactions aux changements climatiques – comme la viabilisation de domaines skiables à haute altitude ou le recours accru à la climatisation dans les villes – entraînent une hausse de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre, les causes du problème risquent d'être encore amplifiées. Par conséquent, la gestion des conséquences des changements climatiques doit constamment être analysée d'un œil critique afin d'en déceler les éventuels effets indésirables. Enfin, il est indispensable de coordonner l'adaptation entre les différents secteurs concernés et de l'harmoniser avec d'autres domaines de la politique.

Le présent chapitre donne des exemples d'activités déjà en cours dans le domaine de l'adaptation aux conséquences des changements climatiques.

3.6.1 Adaptation aux événements naturels extrêmes

Crues, laves torrentielles, glissements de terrain, chutes de pierre, avalanches, tempêtes, autant de dangers naturels auxquels la Suisse est régulièrement confrontée. Ces événements, généralement engendrés par des situations météorologiques extrêmes, occasionnent des dommages aux biens, aux personnes et à l'environnement, avec des coûts qui se chiffrent en millions. Si un lien entre changements climatiques et fréquence des catastrophes naturelles ne peut être scientifique-

tres longue période, il faut reconnaître que certains événements se répètent plus régulièrement depuis quelques décennies (OFEV 2007). Au cours des 200 dernières années, seize grandes crues ont été comptabilisées, dont sept depuis les années 1970.

Afin de réduire les dommages dus aux dégâts naturels, la Confédération a changé sa manière d'aborder les dangers naturels depuis quelques années (OFEV 2007). La protection contre les dangers et la maîtrise des événements sont progressivement remplacées par une gestion intégrée des risques. Des cartes des dangers, délimitant les zones habitées menacées par des crues, des avalanches, des glissements de terrain ou des chutes de pierres, sont en train d'être achevées par les cantons³⁶, complétant ainsi la cartographie de toutes les régions de la Suisse. Ces cartes servent à établir des plans d'affection, à concevoir des mesures techniques et organisationnelles, à élaborer des plans d'urgence et à sensibiliser la population. Les cartes des dangers ont prouvé leur qualité et leur utilité lors des intempéries d'août 2005, événement naturel le plus grave de l'histoire suisse avec 3 milliards de francs de dommages. Malgré les grandes incertitudes qui pèsent sur les estimations relatives aux événements naturels rares, les zones menacées (p. ex. habitations, industrie, route, etc.) ont été correctement identifiées, comme la comparaison des cartes des dangers et les conséquences des intempéries le montrent. Les projets de protection intégrée contre les crues planifiés et mis en œuvre sur la base des cartes des dangers ont eux aussi fait leurs preuves: dans les cantons de Nidwald (à Stanserboden) et d'Obwald (à Sachseln), par exemple, des dommages considérables ont pu être évités (Camenzind et Loat 2006). La connaissance des risques a parfois aussi permis de sauver des vies. A Weggis, le danger de glissement de terrain était connu. Plusieurs bâtiments ont été évacués à titre préventif. Peu après, le versant s'est mis à glisser, emportant trois maisons, mais aucune personne n'a perdu la vie ni n'a été blessée.

L'évolution du montant des dégâts, dans le cas d'événements naturels, peut servir d'indicateur de l'efficacité des mesures préventives de protection contre les événements naturels. Si on omet les crues d'août 2005, qui, comme mentionné, constituent l'événement le plus coûteux jamais surveillé en Suisse, il n'y a pas de tendance vers une augmentation du montant des dommages lors d'événements extrêmes (figure 68). Entre 1972 et 2011, les intempéries ont entraîné des dégâts pour 13,6 milliards de francs alors que le montant dû aux glissements de terrain et aux processus de chute n'est en comparaison que de 0,9 milliard de francs. La hausse des coûts cumulés des dommages, depuis le début des années 1970, est loin d'être proportionnelle à la croissance de la population, de la surface bâtie et de la densité des biens matériels: l'am-

biens. Cette situation positive peut alors en partie être attribuée à l'efficacité des mesures de protection mises en œuvre (OFEV et WSL 2007).

Si l'on souhaite éviter ou limiter à l'avenir les dommages liés aux événements extrêmes, il faut avant tout prendre des mesures dans le domaine de l'aménagement du territoire. Dans ce contexte, la mise en œuvre des cartes des dangers dans les plans d'affectation communaux revêt une importance primordiale. Les zones menacées doivent être évitées chaque fois que cela s'avère possible. A défaut, des mesures préventives (p. ex. des ouvrages de protection) doivent empêcher autant que possible les dommages en cas d'événements particuliers. Dans les zones bâties existantes, les mesures d'aménagement du territoire ne permettent pas à elles seules de réduire suffisamment les risques. Dans de nombreux cas, des mesures techniques de protection seront indispensables. Il n'y aura toutefois jamais de protection absolue contre les dangers naturels. Il existera toujours des événements qui dépasseront les valeurs prévues lors du dimensionnement des ouvrages de protection (surcharge). Des mesures organisationnelles appropriées permettent toutefois de réduire encore les dommages résiduels et de renforcer la protection de la population. Elles comprennent notamment la prévision, l'alerte, l'alarme, la fermeture des régions touchées, l'évacuation des personnes

en cas de dangers naturels), mis en fonction par le Conseil fédéral au début 2011, a été élaboré dans ce sens suite aux intempéries de 2005.

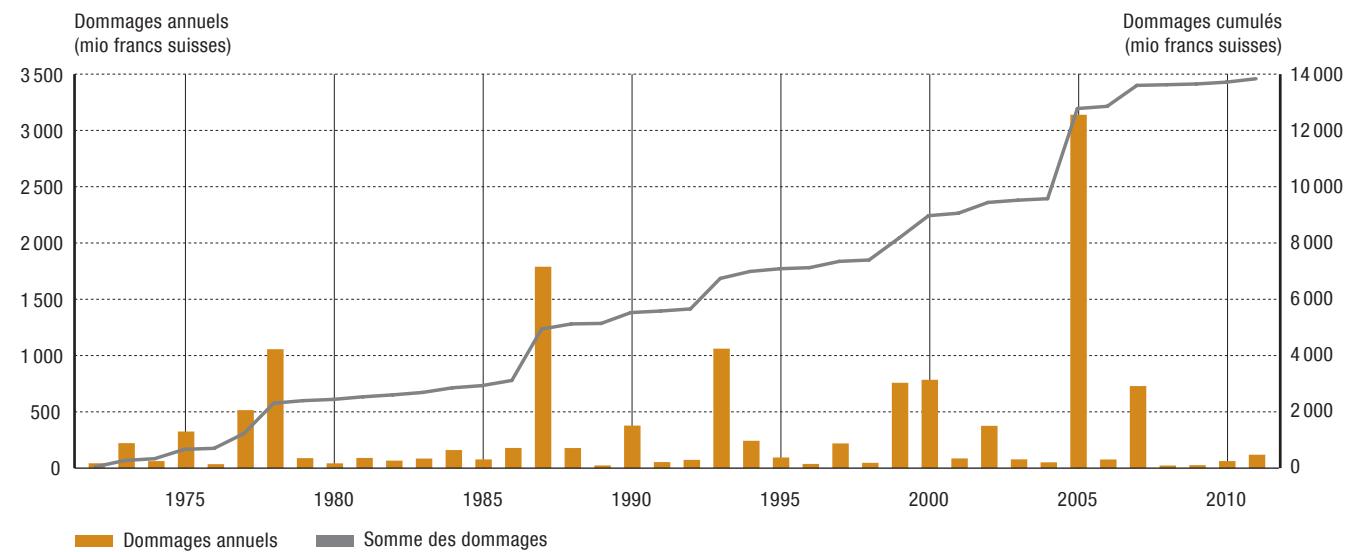
3.6.2 Utilisation d'installations d'enneigement dans les domaines skiables

Le nombre d'installations d'enneigement constitue un bon indicateur des efforts adaptatifs du secteur touristique à la dégradation des conditions d'enneigement dans l'Arc alpin. Ces installations sont non seulement essentielles au maintien d'une offre hivernale de qualité et compétitive, mais aussi à la sécurité économique au niveau local (WSL 2012).

Néanmoins, les impacts écologiques qu'engendre ce type d'installations ne peuvent être négligés. La production d'une couche de neige de 20 cm d'épaisseur sur une surface d'un hectare nécessite environ 800 tonnes d'eau et une très grande quantité d'énergie (environ 2,8 kWh par m²). Afin d'éviter de manquer d'eau, de nombreux domaines skiables construisent leur propre retenue (Müller et Weber 2007). Ces constructions, tout comme le nivellement des surfaces enneigées artificiellement, peuvent porter atteinte au paysage et à la végétation locale. Sur le plan financier, l'enneigement d'un kilomètre de piste coûte environ un million de francs par saison de ski (RMS 2010).

Fig. 68 > Coût des dommages provoqués par des intempéries

Les montants annuels des dommages et le cumul des montants (en francs constants, base 2011) inclus les intempéries causées par les crues, les laves torrentielles, les glissements de terrain ainsi que, depuis 2002, les éboulements et les chutes de pierres au cours de la période 1972 à 2011.



les sports d'hiver (figure 69). Cette proportion est nettement inférieure à celle de l'Autriche et de l'Italie. Les importants efforts financiers destinés à l'enneigement technique, estimés à 80 millions de francs par an, ont conduit à un triplement de la surface concernée depuis 2003. Au vu des quantités d'eau prélevées, on peut prétendre que l'impact de l'enneigement artificiel sur le régime de l'écoulement des eaux et la disponibilité de l'eau est négligeable au niveau national. Cependant, le niveau des cours d'eau étant généralement bas en hiver, les quantités d'eau prélevées au niveau local ont leur importance, comme dans les régions qui ne peuvent se doter de réservoirs. Lorsque les conditions d'enneigement sont extrêmement faibles, les installations techniques ne suffisent également pas à remédier au manque de neige. Pendant l'hiver 2006/2007, considéré comme le plus chaud depuis le début des mesures en 1864, le nombre de semaines où les stations de ski sont restées ouvertes, indépendamment de leur altitude, était inférieur à celui des autres années (figure 70). Etant donné que la production de neige exige des températures inférieures au point de fusion, l'enneigement artificiel constitue une solu-

domaine skiable est ouvert (figure 70), montre les limites des installations d'enneigement.

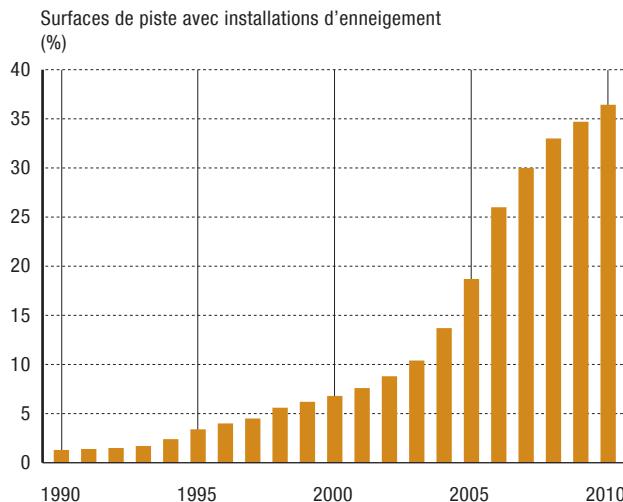
L'utilisation d'installations d'enneigement est nécessaire pour garantir l'exploitation d'un domaine skiable durant les hivers doux. Pour de nombreux touristes, un enneigement garanti constitue un critère important lors du choix d'une station de sports d'hiver (Swissinfo 2007). Pour maintenir la demande touristique élevée, malgré la dégradation des conditions d'enneigement, l'offre d'activités en plein air se diversifie. On assiste d'ailleurs à une augmentation du nombre de touristes non-skieurs (RMS 2010). Le potentiel de croissance des activités estivales est important dans certaines régions; les pertes annoncées dues à la baisse de l'enneigement devraient être en partie compensées par les recettes estivales.

3.6.3 Surface agricole utile irriguée

A l'avenir, les épisodes de canicule et de sécheresse liés aux changements climatiques devraient restreindre les quantités d'eau disponibles localement, du moins pendant certaines périodes (OcCC/ProClim- 2007). Pendant les mois d'été, il faut

Fig. 69 > Surfaces de pistes avec installations d'enneigement

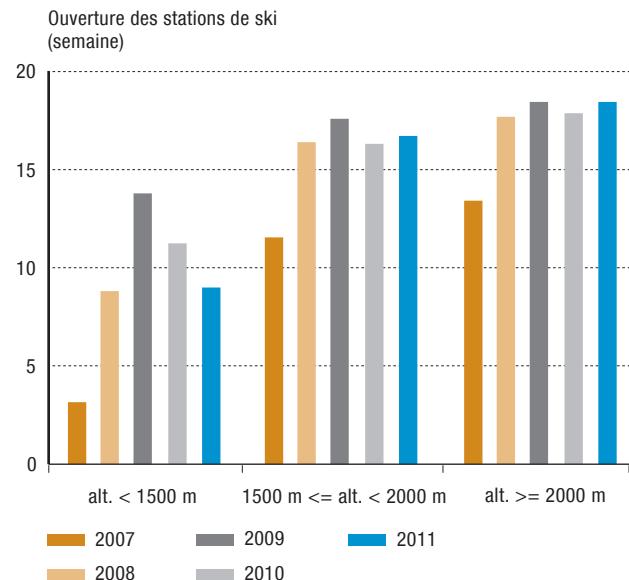
Surfaces de pistes pouvant être artificiellement enneigées, en pourcentage de la surface totale de pistes entre 1990 et 2010.



Source: Remontées Mécaniques Suisses (2010)

Fig. 70 > Nombre de semaines d'ouverture des domaines skiables

124 stations de ski ont été réparties en trois groupes selon l'altitude de leur centre de gravité. La durée d'ouverture des installations est moyennée annuellement pour chacun des groupes de stations de ski.



Source: Vanat (2011)

d'arroser leurs champs, et de l'autre, d'autres acteurs – navigation, protection des eaux, entreprises électriques et pays situés en aval de la Suisse – qui souhaitent que les cours d'eau conservent un niveau d'eau suffisant.

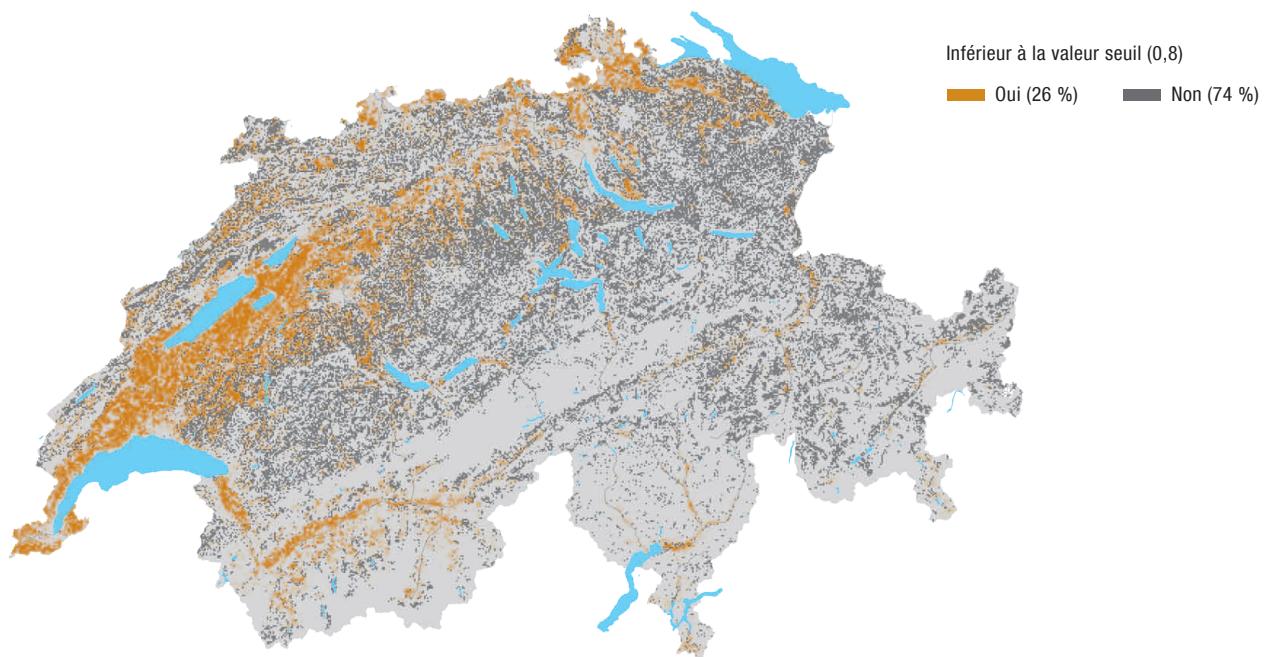
L'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) a procédé en 2006 à une enquête auprès des services cantonaux afin de connaître l'état de l'irrigation dans l'agriculture en Suisse (surfaces et cultures irriguées, consommation etc., Weber et Schild 2007). Sur la base de ces sondages, l'OFAG considère que 43 000 hectares sont irrigués régulièrement, dont l'essentiel (18 000 hectares) est constitué de prairies. Les années de sécheresse, il ressort que 12 000 hectares supplémentaires sont irrigués, pour des besoins en eau d'irrigation qui s'élèvent à 144 millions de m³ (OFAG 2008). Selon des estimations de l'OFAG, les besoins en eau pourraient atteindre 170 millions de m³ par an ces prochaines années (Schild 2008). Après avoir subventionné exclusivement, pendant vingt ans, les projets d'irrigation des vallées sèches intra-alpines du Valais et du sud des Grisons, la Confédération cofinance aussi, depuis 2005, des installations d'arrosage situées dans le reste de la

france par hectare. Ce chiffre comprend les couts de captage, de stockage et d'amenée d'eau jusqu'aux parcelles à irriguer. Entre 2005 et 2011, la Confédération a dès lors soutenu plus de 20 projets d'arrosage sur le Plateau, pour un coût total de 7,6 millions de francs. Les projets ont été financés environ pour moitié par des fonds publics. On n'observe actuellement aucune hausse des demandes émanant des différentes régions du Plateau. Le nombre et la surface des installations d'arrosage réalisées sans aide fédérale ne peuvent être qu'estimés, mais ils correspondent à la plus grande partie des surfaces irriguées sur le Plateau (Schild, comm. pers.).

L'irrigation permet actuellement d'assurer le rendement des récoltes des régions les plus touchées par un déficit en eau. Cependant, les surfaces qui présentent des besoins en irrigation sont nettement plus importantes en Suisse. Selon l'étude de Fuhrer et Jasper (2009), les régions agricoles qui subissent une baisse de rendement au moins une année sur trois totaliseraient 400 000 ha (figure 71). Ces régions sont définies selon le rapport entre l'évapotranspiration réelle et l'évaporation potentielle, compte tenu des conditions météoro-

Fig. 71 > Surfaces de terres agricoles potentiellement concernées par la sécheresse

Surfaces de terres agricoles de la Suisse pouvant subir une baisse de rendement une année sur trois (c.-à-d. lorsque le rapport entre l'évapotranspiration réelle et potentielle est inférieur à 0,8 au moins une fois tous les trois ans). Le calcul est effectué pour les périodes de végétation comprises entre 1980 et 2006 dans une grille de 500 m × 500 m.



La Confédération continuera d'évaluer les demandes de soutien d'installations d'irrigation avec retenue et selon des critères stricts, en s'appuyant sur les travaux scientifiques les plus récents. La nécessité d'irriguer devra être justifiée d'un point de vue climatologique et l'utilité de l'irrigation (aspects agronomiques et pédologiques) ainsi que sa faisabilité (aspects écologiques et techniques) devront être prouvées. L'utilisation de technologies ménageant les ressources est encouragée.

En réponse au postulat Walter 10.3533 «Eau et agriculture», le Conseil fédéral a présenté un rapport (OFEV 2012i) qui propose des solutions visant à la fois à surmonter des épisodes passagers de pénurie d'eau à l'échelon local et à relever le défi à long terme d'une raréfaction générale des ressources en eau due aux changements climatiques. Le postulat demande la mise en place d'une stratégie tenant compte de toutes les utilisations de l'eau et des règles du jeu applicables à la gestion des conflits entre utilisation et protection. Les mesures doivent reposer sur des instruments de gestion des ressources en eau et sur les infrastructures qui s'y rapportent.

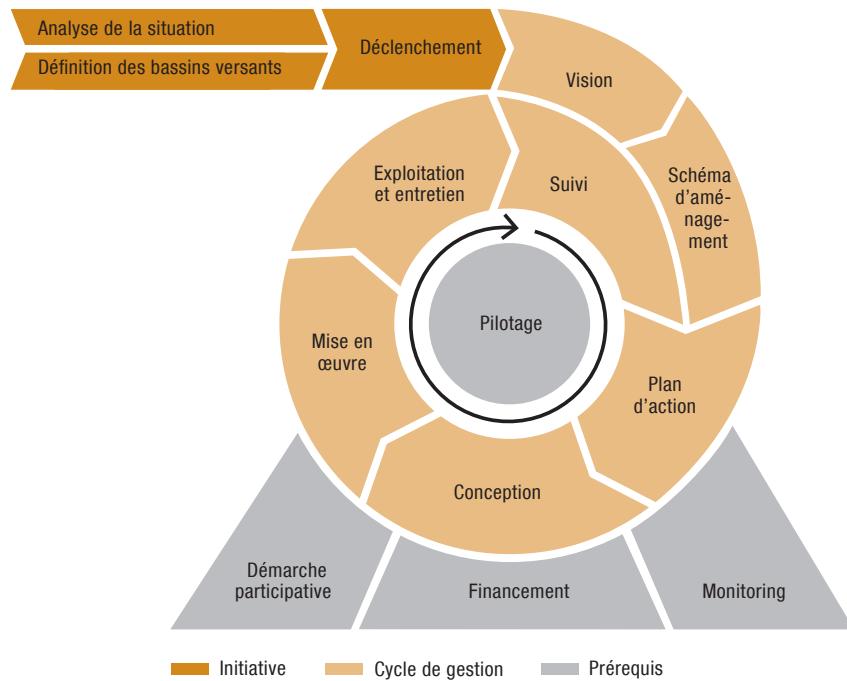
tent de plus en plus d'intérêt et d'attentes de la part de différents groupes. Ces intérêts et attentes peuvent être:

- > la protection de l'eau et des eaux contre toute dégradation susceptible de nuire à la faune, à la flore, aux écosystèmes, aux paysages et, en fin de compte, à la santé humaine;
- > la protection contre les dangers de l'eau et en particulier contre le risque de crue;
- > l'utilisation de l'eau et des eaux à diverses fins, notamment en tant qu'eau potable, eau industrielle, eau d'extinction, pour la production de denrées alimentaires, pour la production d'énergie, pour le refroidissement, pour la navigation et, dans le secteur du tourisme, pour la détente et pour l'enneigement artificiel.

Ces exigences peuvent entraîner des conflits d'intérêts, que ce soit entre la protection et l'exploitation ou entre les différentes utilisations possibles de l'eau. En règle générale, il n'y a pas de façon simple de résoudre ces conflits, mais il est possible de les atténuer en recourant aux moyens appropriés (pesée d'intérêts transparente et participative, plani-

Fig. 72 > Le processus cyclique de gestion par bassin versant

Le processus cyclique par bassin versant requiert un pilotage bien défini du processus, un règlement du financement, une démarche participative et un monitoring permanent du réseau hydrique.



regionale par bassin versant. C'est dans la gestion par bassin versant des eaux, des ressources en eau et des infrastructures qui s'y rapportent que réside le potentiel de relever les défis du futur. Paru en 2011, le document «Gestion par bassin versant – Idées directrices pour une gestion intégrée des eaux en Suisse» présente les principes de la gestion par bassin versant (Agenda 21 pour l'eau, 2011). La gestion des eaux est conçue comme un processus cyclique s'étendant sur plusieurs années, axé sur des objectifs à long terme et comprenant des processus de planification, de mise en œuvre et de surveillance. Dans son volet consacré à la stratégie sectorielle de la gestion des eaux, la stratégie d'adaptation aux changements climatiques du Conseil fédéral cite la gestion des eaux axée sur l'offre comme l'une des conditions permettant d'atteindre les objectifs formulés (OFEV 2012g).

3.6.5 Adaptation de la gestion sylvicole

La Suisse est actuellement boisée sur près d'un tiers de sa surface. En raison de son importance économique, l'épicéa est largement répandu dans notre pays, en particulier dans les zones de basse altitude. Or l'épicéa et le sapin, qui constituent

l'épicéa). Certaines espèces de chênes et d'érables, par exemple, supportent des conditions plus chaudes et plus sèches.

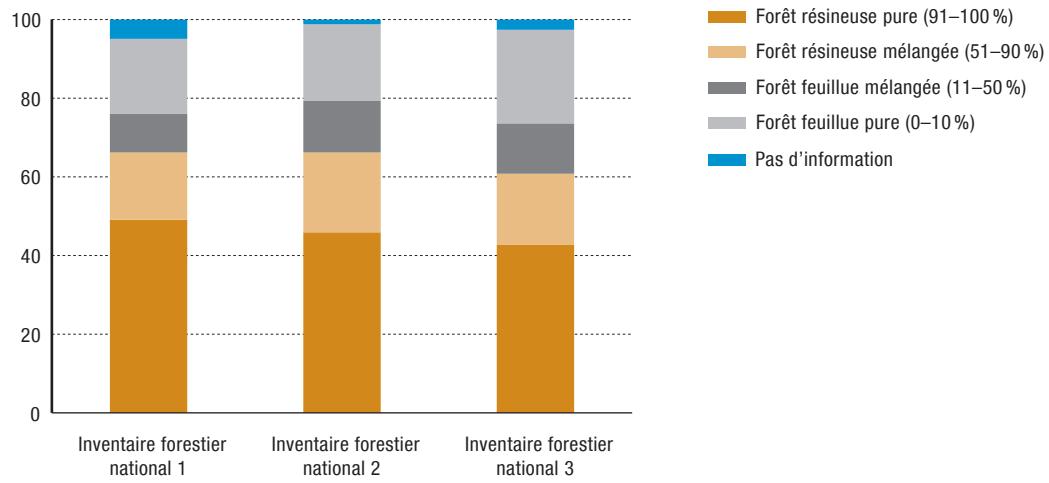
Une forêt mixte proche de son état naturel, avec une proportion élevée de feuillus indigènes, est donc mieux adaptée à des températures plus élevées et à la sécheresse que ne le sont les forêts de résineux purs ou en mélange avec des résineux. Une évaluation des trois inventaires forestiers nationaux (IFN) montre que la proportion de forêts mixtes ou pures de feuillus croît et que la proportion de forêts composées uniquement de résineux diminue (figure 73, IFRF et OFPP 1988, Brassel et Brändli 1999, Brändli 2010). Cette évolution s'est faite en raison de la prise en compte de critères écologiques (retour à des mélanges d'essences plus ou moins naturels sur le Plateau). La tendance au recul des forêts de résineux sur le Plateau devrait s'être maintenue depuis lors.³⁷

A l'avenir, l'exploitation des forêts devra davantage prendre en compte l'évolution des paramètres climatiques. Certains exemples régionaux montrent que des premiers processus d'adaptation sont en cours:

> Ces dernières années, l'influence du climat s'est révélée dans les importants dommages dus aux tempêtes et

Fig. 73 > Surfaces forestières selon le degré de mélange

Degré de mélange feuillus et résineux des surfaces forestières (en % de résineux) dans les trois inventaires forestiers nationaux (IFN) 1, 2 et 3 (1983/1985, 1993/1995 et 2004/2006)



essences adaptées au site, dans un mélange comprenant une forte proportion de feuillus (Indermühle et al.

2005). Cette démarche devrait s'appliquer de manière générale, dans la perspective d'une adaptation au réchauffement.

> Les services forestiers cantonaux et les entreprises forestières réfléchissent aux moyens d'adapter les forêts aux changements climatiques. Dans l'exploitation forestière de la ville de Baden, par exemple, on souhaite favoriser les chênes et réduire la proportion d'arbres menacés, notamment d'épicéas. On pourra ainsi donner naissance à des forêts dans lesquelles des essences adaptées au site ne souffrent guère de la concurrence d'espèces exotiques mieux adaptées aux changements climatiques (Stadt Baden 2005). En d'autres endroits, on fait exactement l'inverse: on envisage de planter davantage de douglas, un conifère nord-américain présent dans nos forêts depuis plus d'un siècle.

> En Valais, les étés chauds et secs affaiblissent les pins et augmentent leur mortalité, particulièrement à des altitudes inférieures à 1200 m. La dynamique de dépérissement des forêts de pins ne peut être influencée que de manière très limitée en évacuant les arbres infestés, en capturant les insectes et en procédant à des coupes d'éclaircie. Ce sont dès lors des chênes pubescents – une espèce déjà présente sur place et mieux adaptée au climat sec – qui germent et croissent à la place des pins. Comme cette essence n'est plus représentée partout, il incombe au service forestier d'en répandre des graines afin que la forêt persiste et continue d'assumer sa fonction protectrice (Rigling et al. 2006).

> Le Valais n'est pas la seule région où l'évolution des forêts est incertaine: en Engadine, les peuplements typiques d'arolles et de mélèzes pourraient être menacés. On craint en particulier l'apparition plus fréquente d'incendies de forêt.

Le présent rapport a montré comment les activités de l’homme en Suisse ont évolué, quelles quantités de gaz à effet de serre en ont émané et illustré avec une multitude d’exemples les effets du climat sur l’état de l’environnement naturel du pays. Des conséquences sur l’économie et la société sont également perceptibles, mais restent pour le moment confinées à des problématiques relevant de la santé et des besoins en chauffage. Il n’est par exemple pas encore possible de chiffrer les impacts des changements climatiques sur le tourisme hivernal et estival ou le rendement des récoltes, ou de déterminer les conséquences des changements de débit des eaux sur la production d’énergie. En revanche, avec l’inventaire national des émissions de gaz à effet de serre, l’évaluation de l’efficacité des mesures prises au niveau national pour réduire les émissions de gaz à effet de serre est possible. Afin d’évaluer les mesures d’adaptation de la société aux changements climatiques, il existe quelques études, mais aucun système de surveillance systématique. L’efficacité des actions entreprises devrait, avec la mise en place de la stratégie d’adaptation du Conseil fédéral, produire de nouveaux indicateurs, et donner une direction pour la poursuite des actions à entreprendre.

Ce document a montré que les bases permettant de présenter les différents éléments de la chaîne de causalité – l’homme qui modifie le climat, les conséquences diverses, les activités destinées à limiter et maîtriser les changements – sont encore très hétérogènes. On relève pour le moment des données détaillées sur l’évolution des émissions de gaz à effet de serre et un dense réseau de mesure est en place pour collecter des données météorologiques, climatologiques et hydrologiques. De même, de bons exemples présentent les effets des changements climatiques sur l’écosystème. Les raisons pour lesquelles les conséquences des changements climatiques sur la société et l’économie sont moins bien documentées sont peut-être à chercher dans certains problèmes méthodologiques, ainsi que dans l’écart temporel qui sépare les causes des conséquences du réchauffement. Mais cette situation est probablement aussi due en partie au fait que l’on n’a longtemps pas accordé suffisamment d’importance à la détection précoce des tendances dans le domaine de la politique climatique. Il est pourtant indispensable de disposer de bases de décision appropriées pour juger des mesures à prendre. Il est donc important de mettre en place ou de développer la saisie systématique des données pertinentes là où des lacunes considérables subsistent.

La documentation de la gestion des effets des changements climatiques n’en est qu’à ses débuts. Des systèmes de surveillance performants sont indispensables pour évaluer les mesures et contrôler leurs résultats, ainsi que pour prévenir les évolutions indésirables. Pour réaliser ces tâches, la collaboration entre les différents services concernés de la Confédération et des cantons devrait être intensifiée.

Afin d’utiliser les ressources de manière efficace et d’obtenir des données permettant des comparaisons, les relevés doivent être étendus afin de combler les lacunes, renforcés, analysés en profondeur à l’aide d’études additionnelles, et coordonnés avec les instruments existants de l’observation de l’environnement au niveau national et international. Les résultats doivent être accessibles au plus grand nombre possible d’utilisateurs potentiels dans le monde politique, dans les milieux économiques et dans la société. Dans cette optique, il est notamment prévu de rééditer périodiquement la présente publication avec des données mises à jour, sous une forme toujours plus étendue et couvrant les préoccupations naissantes. On peut suivre l’évolution des principaux indicateurs sur le site internet de l’OFEV mis à jour régulièrement (<http://www.bafu.admin.ch/umwelt/indikatoren>).

1. Les différents gaz à effet de serre sont convertis en une unité commune, appelée équivalent CO₂, selon un calcul qui tient compte du potentiel de réchauffement global du gaz en question par rapport au potentiel de réchauffement du CO₂.
2. Le calcul des émissions de gaz à effet de serre s'effectue selon le «principe territorial». S'agissant du transport aérien, la consommation de carburant des vols intérieurs et des vols internationaux est enregistrée séparément; seule la consommation intérieure est déterminante pour le Protocole de Kyoto et la loi sur le CO₂.
3. Le calcul des émissions de gaz à effet de serre s'effectue selon le «principe territorial». S'agissant du trafic routier, il prend en compte l'essence et le diesel vendus dans toutes les stations-service de Suisse. L'essence étant moins chère chez nous qu'à l'étranger, de nombreux frontaliers font le plein en Suisse, ce qui augmente les ventes enregistrées dans notre pays. Pour le diesel, la situation est inversée, mais dans des proportions plus faibles. Globalement, il en résulte une exportation de carburant qui constitue la catégorie «tourisme à la pompe».
4. Voitures de tourisme, motocycles, et véhicules de transport de personnes.
5. Véhicules de transport de choses, véhicules agricoles et industriels.
6. Sont inclus dans la prestation kilométrique du transport privé de personnes, les voitures de tourisme, cars privés, motocycles et cyclomoteurs, indigènes et étrangers, sans les minibus et les camping cars (mesurée en véhicules-kilomètres). Dans la prestation kilométrique du transport de marchandises sont inclus les véhicules légers (poids total inférieur ou égal à 3,5 tonnes) et véhicules lourds, indigènes et étrangers, sans les véhicules agricoles et industriels.
7. Prestation du transport de personnes ou de marchandises: Somme des kilomètres parcourus par les personnes ou les marchandises en un an (exprimée en personnes-kilomètres ou tonnes-kilomètres).
8. La surface de référence énergétique représente les surfaces habitables nécessitant un chauffage ou une climatisation.
9. Les émissions spécifiques sont calculées en divisant les émissions de CO₂ de la combustion des combustibles fossiles par le nombre de logements occupés en permanence ou par les surfaces de référence énergétique.
10. La valeur ajoutée brute est la plus-value conférée aux biens et aux services par les processus de production et de prestations, sous déduction de toutes les prestations préalables.
11. La valeur ajoutée brute de l'industrie est calculée au prix constant de 2005 en francs pour l'industrie manufacturière (selon catégorie NOGA 2008: 5 à 43).
12. La valeur ajoutée brute des services est calculée au prix constant de 2005 en francs (selon catégorie NOGA 2008: 45 à 98).
13. Emissions de CH₄ provenant de la fermentation entérique du cheptel bovin.
14. Emissions de CH₄ provenant de la fermentation entérique et de la gestion du fumier des vaches laitières par kg de lait.
15. Les valeurs pour les années 1991 à 1995 sont obtenues par interpolation linéaire.
16. La valeur ajoutée brute de l'agriculture est calculée au prix constant de 2005 en francs (selon catégorie NOGA 2008: 1 à 3).
17. Une productivité des végétaux affaiblie diminue l'apport de matières organiques dans les sols.
18. Gaz combustible utilisé dans les villes et obtenu par cokéfaction du charbon.
19. Le produit intérieur brut mesure la valeur des biens et services produits dans le pays pour autant qu'ils ne soient consommés pour produire d'autres biens et services.
20. Les pays industrialisés ou en transition, appelés Parties visés à l'Annexe I de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) sont: Allemagne, Australie, Autriche, Bélarusse, Belgique, Bulgarie, Canada, Croatie, Danemark, Espagne, Estonie, Etats-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Japon, Lettonie, Liechtenstein, Lituanie, Luxembourg, Monaco, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République tchèque, Roumanie, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord, Slovaquie, Slovénie, Suède, Suisse, Turquie et Ukraine.
21. Le retournement des eaux signifie que les eaux profondes et les eaux de surface du lac se mélangent. Ce processus a lieu lorsque la densité des eaux de surface devient supérieure à celle des eaux du fond du lac. Si un faible gradient de densité persiste, le vent peut favoriser le brassage.
22. Le bilan de masse des glaciers s'exprime en équivalent eau. Cette unité indique, en mètres ou en millimètres, la quantité d'eau contenue dans les corps de glace qui ont fondu ou sont venus s'ajouter au glacier (1 mm correspond à 1 litre d'eau par mètre carré). On tient ainsi compte du fait que la densité de la glace et des névés peut varier d'un endroit à l'autre, ainsi qu'en fonction de la profondeur, ce qui implique que des volumes identiques peuvent emmagasiner des quantités d'eau différentes.

24. Pergélisol avec une température juste inférieure à 0 °C.
25. La phénologie traite des stades de développement qui surviennent de manière récurrente dans la nature. Un calendrier phénologique indique, par exemple, le moment où les cerisiers fleurissent, où les baies de sureau mûrissent, où les feuilles des marronniers changent de couleur, etc.
26. De façon schématique, il y a d'abord le phytoplancton (algues, cyanobactéries, puis les poissons et le zooplancton (p. ex. crustacés) qui broutent le phytoplancton et, enfin, les prédateurs. Ceux-ci englobent le necton (poissons, tortues, mammifères marins), les oiseaux et l'homme.
27. Dans les cours d'eau suisses, sur 100 m, on compte en moyenne entre une et deux barrières d'une hauteur d'au moins 15 cm (Peter 1998).
28. La MRP engendre des taux de mortalité élevés chez les truites. Cette maladie est provoquée par un parasite unicellulaire. Elle n'est actuellement présente qu'en dessous de 800 m d'altitude environ.
29. Tout comme la truite de rivière, l'ombre appartient à la famille des salmonidés.
30. Pour les scénarios climatiques, nous partons des scénarios d'évolution A1F1 et B2 du GIEC (GIEC 2000), régionalisés pour la Suisse (N. E. Zimmermann, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL). Ces scénarios climatiques sont combinés avec les scénarios de l'évolution de l'utilisation du sol spécialement développés pour la Suisse par Bolliger et al. (2007): «Libéralisation» a été combinée avec A1F1 et «forte réduction de la production agricole» avec B2. Les changements dans les aires de distribution des espèces d'oiseaux sont évalués sur la base de ces deux situations extrêmes.
31. Blongios nain, Goéland leuchophée, Tourterelle des bois, Chevêche d'Athéna, Engoulevent d'Europe, Martinet à ventre blanc, Martin-pêcheur d'Europe, Guêpier d'Europe, Huppe fasciée, Pic épeichette, Hirondelle de rochers, Bergeronnette printanière, Rossignol philomène, Tarier pâtre, Monticole bleu, Rousserolle turdoïde, Hypolais polyglotte, Loriot d'Europe, Bruant zizi, Bruant fou.
32. Gélinotte des bois, Lagopède alpin, Tétras lyre, Grand Tétras, Cigogne blanche, Vanneau huppé, Chevêchette d'Europe, Chouette de Tengmalm, Pic tridactyle, Accenteur alpin, Traquet motteux, Merle à plastron, Grive litorne, Locustelle luscinioïde, Cassenoix moucheté, Niverolle alpine, Venturon montagnard, Bec-croisé des sapins, Bouvreuil pivoine, Bruant des roseaux.
33. Voir définition sous 3.3.3. La période estivale correspond aux mois de juin, juillet et août.
34. Les données proviennent des déclarations des laboratoires et des médecins.
35. Les données se réfèrent aux véhicules enregistrés par auto-suisse.
36. Les cartes de danger contiennent des informations détaillées sur les causes, le déroulement, l'extension géographique, l'intensité et la probabilité d'occurrence des événements naturels.
37. Les trois premiers Inventaires forestiers nationaux présentent l'état en 1983/1985, 1993/1995, 2004/2006. Les relevés du quatrième inventaire ont été effectués de 2009 à 2011; les premiers résultats sont disponibles depuis mars 2012.

Agenda 21 pour l'eau 2011: Gestion par bassin versant – Idées directrices pour une gestion intégrée des eaux en Suisse. Berne, 20 p.

Ambrosetti W., Barbanti L. 1999: Deep water warming in lakes: an indicator of climate change. *J. Limnol.* 58: 1–9.

Anneville O., Souissi S., Ibanez F., Druart J.-C., Angeli N. 2002: Temporal mapping of phytoplankton assemblages in Lake Geneva: annual and interannual changes in their patterns of succession. *Limnol. Oceanogr.* 47(5): 1355–1366.

auto-suisse 2004/2005/2006/2007/2008/2009/2010/2011/2012: rapport sur la réduction de la consommation normalisée de carburant des voitures de tourisme 2011 dans le cadre de l'Ordonnance sur l'énergie. Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Bader S. 2004: Die extreme Sommerhitze im aussergewöhnlichen Witterungsjahr 2003. *Arbeitsbericht n° 200*, MétéoSuisse Zurich, 23 p.

Begert M., Schlegel T., Kirchhofer W. 2005: Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology* 25: 65–80.

Beniston M. 1997: Variations of snow depth and duration in the swiss alps over the last 50 years: Links to changes in large-scale climatic forcings. *Climatic Change* 36: 281–300.

Bolliger J., Kienast F., Soliva R., Rutherford G. 2007: Spatial sensitivity of species habitat patterns to scenarios of land use change (Switzerland). *Landscape Ecology* 22: 773–789.

Brändli U.-B. 2010: Inventaire forestier national suisse. Résultats du troisième inventaire 2004–2006. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, Birmensdorf et Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne, 312 p.

Brassel P., Brändli U.-B. 1999: Inventaire forestier national suisse. Résultats du deuxième inventaire 1993–1995. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, Birmensdorf et Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne, 442 p.

ISBN 3-258-05897-X.

Burri C., Basic V., Maeder G., Patalas E., Gern L. 2011: Microclimate and the zoonotic cycle of tick-borne encephalitis virus in Switzerland. *Journal of Medical Entomology* 48: 615–627.

Camenzind R., Loat R. 2006: Wichtige Aufgaben der Nutzungsplanung. Schweizer Gemeinde n° 7/8.
<http://www.bafu.admin.ch/naturgefahren/01922/11411/index.html?lang=de>

CCNUCC (Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques) 2012. Greenhouse Gas Inventory Data.
http://unfccc.int/ghg_data/items/3800.php

CH2011 2011: Swiss Climate Change Scenarios CH2011. C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, et OcCC, Zurich, 88 p.

ISBN: 978-3-033-03065-7

CIPEL (Commission internationale pour la protection des Eaux du lac Léman) 2011: données fournies par M. François Rapin.
<http://www.cipel.org>

Confédération suisse 2009a: Loi fédérale sur le développement de l'infrastructure ferroviaire. (LDIF), 742.140.2.
http://www.admin.ch/ch/f/rs/742_140_2/index.html

Confédération suisse 2009b: Switzerland's Fifth National Communication under the UNFCCC, Second National Communication under the Kyoto Protocol to the UNFCCC. Office fédéral de l'environnement, Berne, 248 p.

Confédération suisse 2012: Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2010: National Inventory Report 2012 including reporting elements under the Kyoto Protocol. Submission of 13 April 2010 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Office fédéral de l'environnement, Berne.

Cordillot F., Klaus G. 2011: Espèces menacées en Suisse. Synthèse des listes rouges, état 2010. Etat de l'environnement n° 1120, Office fédéral de l'environnement, Berne, 111 p.

Defila C., Clot B. 2001: Phytophenological trends in Switzerland. *International Journal of Biometeorology* 4: 203–207.

Dobbertin M. 2005: Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European Journal of Forest Research* 124: 319–334.

Dobbertin M., Rigling A. 2006: Pine mistletoe (*Viscum album* ssp. *austriacum*) contributes to Scots pine (*Pinus sylvestris*) mortality in the Rhône valley of Switzerland. *Forest Pathology* 36: 309–322.

Dobbertin M., Hilker N., Rebetez M., Zimmermann N.E., Wohlgemuth T., Rigling A. 2005: The upward shift in altitude of pine mistletoe (*Viscum album* ssp *austriacum*) in Switzerland – the result of climate warming? *Int. J. Biometeorol.* 50: 40–47.

EAWAG (Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasser-reinigung und Gewässerschutz) 2008: Du milieu naturel au verre d'eau – une eau potable de qualité pour aujourd'hui et pour demain. *Eawag News* 65, Eawag, Dübendorf.
http://www.eawag.ch/medien/publ/eanews/news_65/index_FR.html

Ecoplan, Sigmoplan 2007: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse). Schlussbericht. Mandants: Office fédéral de l'environnement et Office fédéral de l'énergie. En allemand avec résumé en français.
<http://www.bafu.admin.ch/klima/00469/00810/00813/index.html?lang=fr> [état 16.08.2007]

Engadiner Post 2012: <http://www.engadinerpost.ch/>

Franssen H. J., Scherrer S. C. 2007: Freezing of lakes on the Swiss plateau in the period 1901–2006. *Int J. Climatol.* 28: 421–433. doi:10.1002/joc. 1553.

Frei C., Schär C. 2001: Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *J. Climate* 14, 1568–1584.

Führer J., Jasper K. 2009: Bewässerungsbedürftigkeit von Acker- und Grasland im heutigen Klima. *Agrarforschung* 16 (10), 396–401.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) 2000: Scénarios d'émissions, Rapport spécial du Groupe de travail III du GIEC, Résumé à l'intention des décideurs. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève, 22 p. ISBN 92-9169-113-1.

GIEC 2007a: Changements climatiques 2007 – Les éléments scientifiques, Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Résumé à l'intention des décideurs, Résumé technique et Questions fréquentes. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève. ISBN 978 0521 88009-1.

GIEC 2007b: Bilan 2007 des changements climatiques: Conséquences, adaptation et vulnérabilité, Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Résumé à l'intention des décideurs et Résumé technique. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève. ISBN 978 0521 88010-7.

Haeberli W., Cihlar J., Barry R.G. 2000: Glacier monitoring within the Global Climate Observing System. *Annals of Glaciology* 31, 241–246.

Haeberli W., Hoelzle M., Paul F., Zemp M. 2007: Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps. *Annals of Glaciology* 46, 150–160.

Haeberli W., Paul F., Zemp M. (à l'impression): Vanishing glaciers in the European Alps. *The Pontifical Academy of Sciences, Scripta Varia* 118.

Hänggi P., Bosshard T., Weingartner R. 2011: Swiss discharge regimes in a changing climate. In: Hänggi P., Auswirkungen der hydro-klimatischen Variabilität auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz. Dissertation, Universität Bern, 77–100.

Hari R.E., Livingstone D.M., Siber R., Burkhardt-Holm P., Güttinger H. 2006: Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology* 12: 10–26.

Herrmann C., Gern L. 2010: Survival of *Ixodes ricinus* (Acari: Ixodidae) under challenging conditions of temperature and humidity is influenced by *Borrelia burgdorferi* sensu lato infection. *Journal of Medical Entomology* 47(6): 1196–1204. doi: 10.1603/ME10111

Hofer H.R. 1992: Veränderungen in der Vegetation von 14 Gipfeln des Berninagebietes zwischen 1905 und 1985. *Ber. Geobot. Inst. Eidgenoss. Tech. Hochsch. Stift. Rubel Zur* 58: 39–54.

IEA 2011: CO₂ Emissions from Fuel Combustion. International Energy Agency (IEA), 538 p.

IFRF (Institut fédéral de recherches forestières), OFPP (Office fédéral des forêts et de la protection du paysage) 1988: Inventaire forestier national suisse. Résultats du premier inventaire 1982–1986. Berichte 305, Institut fédéral de recherches forestières, Birmensdorf, 375 p. ISSN 0259-3092.

Indermühle M., Raetz P., Volz, R. 2005: LOTHAR – Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung. Synthese des Teilprogramms 6. Umwelt-Materialien n° 184, Office fédéral de l'environnement, Berne, 145 p. En allemand avec résumé en français.

Infras, Ecologic, Rütter + Partner 2007: Auswirkung der Klimaänderung auf die schweizer Volkswirtschaft (Internationale Einflüsse). Schlussbericht. Mandant: Office fédéral de l'environnement. En allemand avec résumé en français.

<http://www.bafu.admin.ch/klima/00469/00810/00813/index.html?lang=fr> [état 14.08.2007]

Infras, Prognos, TEP Energy, Basics AG 2011: Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2010 nach Verwendungszwecken. Office fédéral de l'énergie. http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/02167/index.html?lang=fr&dossier_id=02169

INRA (Institut National de Recherche Agronomique) 2011: Base de données de l'INRA de Thonon-les-Bains, Données CIPEL.

Jakob A., Binderheim E., Pfammatter F., Schädler M. 2010: Temperaturen in Schweizer Fließgewässern – Langzeitbeobachtung. Gas – Wasser-Abwasser 3/2010: 221–231.

Jolly W.A., Dobbertin M., Zimmermann N.E., Reichstein M. 2005: Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters* 32: L18409.

Jurasinski G., Kreyling J. 2007: Upward shift of alpine plants increases floristic similarity of mountain summits. *Journal of Vegetation Science* 18: 711–718.

Kestenholz M., Liechti F., Naef-Daenzer B., Schifferli L., Zbinden N. 2008: Oiseaux, météo et changement climatique. Rapport 2008 de la Station ornithologique suisse de Sempach destiné aux «Amis de la Station ornithologique», Station ornithologique suisse, Sempach, 33 p. <http://www.vogelwarte.ch/oiseaux,-meteo-et-changement-climatique.html>

Körner C. 2005: The green cover of mountains in a changing environment. In: U.M Huber., H.K.M Bugmann., M.A Reasoner. (eds.), *Global change and mountain regions. An overview of current knowledge*. Springer, Berlin, 367–375. doi: 10.1007/1-4020-3508-X_36.

of the COST Strategic Workshop April 7–9, 2008, Congress Innsbruck, Innsbruck University Press, 25–30.

<http://www.uibk.ac.at/alpinerraum/publications/vol7/koerner.pdf>

Laternser M., Schneebeli M. 2003: Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99). *International Journal of Climatology* 23: 733–750.

Livingstone D. M. 1997: Break-up dates of alpine lakes as proxy data for local and regional mean surface air temperatures. *Climatic Change* 37: 407–439.

Magnuson J.J., Robertson D.M., Wynne R.H., Benson B.J., Livingstone D.M., Arai T., Assel R.A., Barry R.G., Card V., Kuusisto E., Granin N.G., Prowse T.D., Stewart K.M., and Vuglinski V.S. 2000: Historical Trends in Lake and River Ice Cover in the Northern Hemisphere. *Science* 289 (5485): 1743–1746.

Marty C. 2008: Regime shift of snowdays in Switzerland. *Geophys. Res. Lett.* 35: L12501. doi: 10.1029/2008GL033998.

Meier F., Engesser P., Forster B., Odermatt O. 2005: Forstschutz-Überblick 2004. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf.

<http://www.wsl.ch/fe/walddynamik/waldschutz/wsinfo/fsueb/fsueb04d.pdf>

MétéoSuisse 2012a: Rapport climatologique 2011. Office fédéral de météorologie et de climatologie, Zürich, 68 p.

MétéoSuisse 2012b: Le climat aujourd’hui.

http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/fr/climat/climat_aujourd'hui.html

Morán Cadena F., Rais O., Jouda F., Douet V., Humair P.F., Moret J., Gern L. 2007: Phenology of the tick *Ixodes ricinus* and infection with *Borrelia burgdorferi* sensu lato along a north-and south-facing altitudinal gradient on Chaumont Mountain, Switzerland. *Journal of Medical Entomology* 44: 683–693.

Müller H. R., Weber F. 2007: Klimaänderung und Tourismus – Szenarienanalyse für das Berner Oberland 2030. FIF, Universität Bern, 88 p. http://www.berggebiete.ch/files/pdfs/kolumnen/klimawandel_berggebiet_mueller/Klimaenderung_Berggebiet_Bern_Szenarien_Bericht.pdf

OcCC/ProClim- 2007: Les changements climatiques et la Suisse en 2050. Conséquences pour l'environnement, la société et l'économie. Organe consultatif sur les changements climatiques et ProClim, Bern, 172 p. ISBN 978-3-907630-26-6.

OFAG (Office fédéral de l'agriculture) 2008: Informations 2008 des secteurs Développement rural, Améliorations foncières ainsi que Bâtiments ruraux et aides aux exploitations.

<http://www.blw.admin.ch/themen/00006/00056/01362/index.html?lang=fr> [état: 9.9.2008]

[état: 14.11.2011].

OFEN (Office fédéral de l'énergie) 2007: Perspectives énergétiques pour 2035 (tome 1), (tome 2), (tome 3). Office fédéral de l'énergie, Berne.

OFEN 2011a: Statistique globale suisse de l'énergie 2010. Office fédéral de l'énergie, Berne.

OFEN 2011b: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien (édition 2010). Office fédéral de l'énergie, Berne. En allemand avec résumé en français.

OFEN 2012a: données fournies par la division Economie.

OFEN 2012b: données fournies par la section Collectivités publiques et bâtiment.

OFEV (Office fédéral de l'environnement) 2007: Dangers naturels – Prévenir vaut la peine. Magazine Environnement 2/2007, Office fédéral de l'environnement, Berne.

OFEV 2009: Résultats de l'observatoire national des eaux souterraines (NAQUA) – Etat et évolution de 2004 à 2006. Etat de l'environnement n° 0903, Office fédéral de l'environnement, Berne, 144 p.

OFEV 2010: Switzerland's Fourth National Report under the Convention on Biological Diversity. Office fédéral de l'environnement, Berne, 148 p.

OFEV 2011: Environmental Impacts of Swiss Consumption and Production. A combination of input-output analysis with life cycle assessment. Environmental studies n° 1111, Office fédéral de l'environnement, Berne. En allemand avec résumé en français.

OFEV 2012a: Evolution des émissions de gaz à effet de serre depuis 1990.

<http://www.bafu.admin.ch/klima/09570/09574/index.html?lang=fr>

OFEV 2012b: données fournies par la division Protection de l'air et produits chimiques.

OFEV 2012c: Impacts des changements climatiques sur les eaux et les ressources en eau. Rapport de synthèse du projet «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro). Connaissance de l'environnement n° 1217, Office fédéral de l'environnement, Berne, 76 p.

OFEV 2012d: données fournies par la division Hydrologie.

OFEV 2012e: Traces du changement climatique? MBD-Facts 4, Office fédéral de l'environnement, Berne.

OFEV 2012f: Statistique: Pêche de loisir.

<http://www.bafu.admin.ch/jagd-fischerei/07831/07867/07871/index.html?lang=fr> [état: 09.03.2010]

Berne.

OFEV 2012h: Réalisation des objectifs de réduction du Protocole de Kyoto et de la loi sur le CO₂.

<http://www.bafu.admin.ch/klima/09570/index.html?lang=fr>
[état 17.1.2012]

OFEV (2012i): Gérer les pénuries locales d'eau en Suisse – Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat «Eau et agriculture. Les défis de demain», Office fédéral de l'environnement, Berne, 87 p.

OFEV, WSL 2007: Ereignisanalysen Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Umwelt-Wissen n 0707, Office fédéral de l'environnement, Berne et Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, Birmensdorf, 215 p.

OFEV, WSL 2012: données fournies par M. Gian Reto Bezzola.
<http://www.bafu.admin.ch/org/index.html?lang=fr>

OFEV, OFEG, MétéoSuisse 2004: Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer (en allemand avec résumé en français intitulé «Canicule de 2003: conséquences pour les eaux (Résumé)»). Schriftenreihe Umwelt n° 369, Office fédéral de l'environnement, Berne, 174 p.

<http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00533/index.html?lang=fr>

OFS (Office fédéral de la Statistique) 2011: Logements vacants en Suisse en 1.6.2011.

<http://www.bwo.admin.ch/dokumentation/00101/00104/index.html?lang=fr>

OFS 2012a: Infrastructure et véhicules.

<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/11/03.html>

OFS 2012b: Prestations de transport.

<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/11/05.html>

OFS 2012c: Bâtiments et logements

<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/09/02.html>

OFS 2012d: Population.

<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/01.html>

OFS 2012e: données fournies par M. Klaus Leemann et Fabrice Jacolet.
<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index.html>

OFS 2012f: Agriculture, sylviculture.

<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/07.html>

OFS 2012g: Comptes nationaux.

<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/04/02.html>

OFSP (Office fédéral de la santé publique) 2012a: Canicule.

<http://www.bag.admin.ch/themen/gesundheitspolitik/00403/03965/index.html?lang=fr>. [état 22.8.2007].

OFSP 2012c: données fournies par M. Altpeter Ekkerhard.

<http://www.bag.admin.ch/index.html?lang=fr>

OFSP 2012d: données fournies par M. Hanspeter Zimmermann.
<http://www.bag.admin.ch/index.html?lang=fr>

OMM (Organisation météorologique mondiale) 2007: The role of climatological normals in a changing climate. WCDMP 61, WMO-TD 1377, World Meteorological Organization, Genève.

Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug T., Kruger D., Pipatti R., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. Wagner F. 2003: Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Kanagawa.

PERMOS 2010: Permafrost in Switzerland 2006/2007 and 2007/2008. J. Noetzli, D. Vonder Muehll (eds.), Glaciological Report (Permafrost) No. 8/9 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences, 68 p.

PERMOS 2012: données fournies par Mme Jeannette Noetzli.
<http://www.permos.ch/index.html>

Peter A. 1998: Interruption of the continuum by barriers and the consequences for migratory fish. In M. Jungwirth, S. Schmutz, S. Weiss (eds.), Fish Migration and Fish Bypasses. Fishing News Books, Oxford

Peters G.P., Minx J.C., Weber C.L., Edenhofer O. 2011: Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. PNAS 108, 8903-8908. doi: 10.1073/pnas.1006388108.

Randolph S.E., Rogers D.J. 2000: Fragile transmission cycles of tick-borne encephalitis virus may be disrupted by predicted climate change. The Royal Society 267: 1741–1744.

Randolph S.E., Asokliene L., Avsic-Zupanc T., Bormane A., Burri C., Gern L., Golovljova I., Hubalek Z., Knap N., Kondrusik M., Kupca A., Pejcoch M., Vasilenko V., Žygutiene M. 2008: Variable spikes in tick-borne encephalitis incidence in 2006 independent of variable tick abundance but related to weather. Parasites & Vectors 1: 44. doi:10.1186/1756-3305-1-44, p. 1–18.

Remund J., Frehner M., Walther L., Kägi M., Rihm B. 2011: Schätzung standortspezifischer Trockenstressrisiken in Schweizer Wäldern. Schlussbericht/Version 2.3. Mandant WSL, Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel».

http://www.wsl.ch/info/organisation/fpo/wald_klima/veranstaltungen/index_DE

Rigling A., Dobbertin M., Bürgi M., Gimmi U., Graf Pannatier E., Gugerli F., Heiniger U., Polomski J., Rebetez M., Rigling D., Weber P., Wermelinger B., Wohlgemuth T. 2006: Les chênes pubescents chassent-ils les pins sylvestres valaisans? Notice pour le praticien 41, WSL, Birmensdorf. ISSN 1012-6554.

<http://www.wsl.ch/dienstleistungen/publikationen/pdf/7407.pdf>

- Robine J.-M. 2008: Excess mortality in Europe in summer 2003: The «CANICULE» project. In: Inserm, Improving Public Health Responses to Extreme Weather/Heat-Waves – EuroHEAT. Meeting Report Bonn, Germany, 22–23 March, World Health Organisation, Copenhagen. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0018/112473/E91350.pdf
- Rübel E. 1912: Pflanzengeographische Monographie des Bernina-gebietes. Engelmann, Leipzig.
- Scheffer M., Carpenter S., Foley C., Walker B. 2001: Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413: 591–596.
- Scherrer S.C., Appenzeller C., Laternser M., 2004: Trends in Swiss Alpine snow days: The role of local- and large-scale climate variability. *Geophys. Res. Lett.* 31: L13215. doi: 1029/2004GL020255.
- Schild 2008: Bewässerungen in der Schweiz: Stand und Ausblick. Géomatique Suisse, 7. En allemand avec résumé en français. http://www.geomatik.ch/fileadmin/download/2008/Fach/FA_7_2008_2.pdf
- Schorer M. 1992: Extreme Trockensommer in der Schweiz und ihre Folgen für Natur und Wirtschaft. *Geographica Bernensia*, Band G40, Geographisches Institut der Universität Bern.
- Stadt Baden 2005: Klimawanderungen. Klima und Wald früher – heute – morgen. http://www.klimawanderungen.ch/downloads/Klimadossier_Erwachsene.pdf [état 22.06.2007].
- Stadt Zürich 2011: données fournies par M. Oliver Köster. <http://stadt-zuerich.ch/wasserversorgung>
- Station ornithologique suisse 2012: données fournies par Niklaus Zbinden. <http://www.vogelwarte.ch>.
- Straile D., Jöhnk K. Rossknecht H. 2003a: Complex effects of winter warming on the physicochemical characteristics of a deep lake. *Limnol. Oceanogr.* 48: 1432–1438.
- Straile D., Livingstone D. M., Weyhenmeyer G. A., George D.G. 2003b: The response of freshwater ecosystems to climate variability associated with the North Atlantic Oscillation. In: J. W. Hurrell, Y. Kushnir, G. Ottersen, M. Visbeck (eds), *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. Geographical Monograph, 134, 263–279.
- Swissinfo 2007: Les stations de ski réfléchissent au coût du climat. http://www.swissinfo.ch/fre/dossiers/changement_climatique/rechauffement/Les_stations_de_ski_reflechissent_au_cout_du_climat.html?cid=1335276 [état 16 juillet 2007]
- Universität Konstanz 2011: données fournies par Prof. Dietmar Streile. <http://cms.uni-konstanz.de/biologie/forschung/> (Food web and population ecology).
- Vanat L. 2011. Bilan de saison 2010/2011 – Suisse, Fréquentation des domaines skiables. Données fournies par M. Laurent Vanat. <http://www.vanat.com>.
- VAW/ETHZ, EKK/SCNAT 2010: Rapport glaciologique (1881–2009). Les variations des glaciers suisses. Annuaire de la commission d'experts pour la cryosphère de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT) n° 1–126. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- Vonder Muehli D., Noetzli J., Makowski K., Delaloye R. 2004: Permafrost in Switzerland 2000/2001 and 2001/2002. *Glaciological Report (Permafrost)*, No. 2/3 of the Glaciological Commission of the Swiss Academy of Sciences and Department of Geography, University of Zurich, 86 p.
- Walther G.-R., Beissner S., Pott R. 2005a: Climate change and high mountain vegetation shifts. In: G. Broll, B. Keplin B. (eds.), *Mountain ecosystems, Studies in Treeline Ecology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 77–95.
- Walther G.-R., Beissner S., Burga C.A. 2005b: Trends in upward shift of alpine plants. *Journal of Vegetation Science* 16: 541–548.
- Weber M., Schild A. 2007: Etat de l'irrigation en Suisse. Bilan de l'enquête 2006. Office fédéral de l'agriculture, Berne, 19 p.
- Weingartner R., Aschwanden H. 1992: Discharge regime – the basis for the estimation of average flows. In: R. Weingartner, M. Spreafico (eds), *Hydrological Atlas of Switzerland*, Plate 5.2. Swiss National Hydrological and Geological Survey, Berne.
- WGMS (World Glacier Monitoring Service) 2011: données fournies par Isabelle Gärtner-Roer. <http://www.wgms.ch>
- WSL (Institut pour l'étude de la neige et des avalanches) 2012: La neige de culture. http://www.sif.ch/forschung_entwicklung/schnee/kunstschnee/index_FR [Etat 22.06.2012]
- Zbinden N., Schmid H., Kéry M. Keller V. 2005: Swiss Bird Index SBI® – Kombinierte Indices für die Bestandsentwicklung von Artengruppen regelmässig brütender Vogelarten der Schweiz 1990–2004. *Ornithol. Beob.* 102: 283–291.
- Zemp M., Haeberli W., Hoelzle M., Paul F. 2006: Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters* 33: L13504.
- Zemp M., Haeberli W., Hoelzle M., Maisch M., Paul F. 2007: Europäische Alpen bald ohne Gletscher? In: G. Altner, H. Leitschuh, G. Michelsen, E.U. Simonis, E.U. von Weizsäcker (eds.), *Jahrbuch Ökologie*, München, 68–82. ISBN 978-3-406-54817-8.