

# Constructions et infrastructures

## Auteurs

Dörte Aller

Thomas Frank

Beat Gasser

Willi Gujer

Christoph Hartmann

Alain Jeanneret

Martin Jakob

Hansjürg Leibundgut

Andreas Meier

Simon Meier

Eberhard Parlow

Christoph Ritz, Chair

Hans-Rudolf Schalcher

Roland Stulz

Esther Thalmann

Aller Risk Management

Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche EMPA

Bureau d'ingénieurs Basler & Hofmann

Chaire de gestion de l'eau urbaine, EPF de Zurich

Novatlantis

Office fédéral des routes (OFROU)

CEPE - Centre for Energy Policy and Economics, EPF Zurich

Institut für Hochbautechnik, EPF de Zurich

CFF, Unité risques naturels

Siemens Building Technologies AG

Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung

ProClim-, Académie suisse des sciences naturelles

Institut für Bauplanung und Baubetrieb

Novatlantis

Rédaction, ProClim-, Académie suisse des sciences naturelles



## 1. Introduction

### Situation

L'évolution de la démographie et de l'emploi ainsi que le comportement en matière de mobilité sont des facteurs d'influence importants pour le secteur des constructions et des infrastructures. Au cours des dernières décennies, le Plateau suisse s'est fortement urbanisé. Nombre d'agglomérations non seulement grandissent, mais s'amalgament avec d'autres. La mobilité (kilométrage) aussi a fortement augmenté. La séparation entre sphères d'habitation et sphères de travail n'entraîne pas seulement une augmentation constante du trafic, mais accroît en même temps les exigences quant au bon fonctionnement des infrastructures. L'espace d'habitation se développe en bordure ou à l'extérieur des agglomérations qui existaient jusqu'alors, dans des zones plus exposées aux risques découlant d'événements météorologiques exceptionnels. Cette évolution débouche sur un système complexe, toujours plus sensible. Simultanément, les coûts à assumer lorsque des éléments du système s'effondrent ou tombent en panne vont en augmentant.

Pour réduire ou éviter les dommages, il faut évaluer à temps et prendre en compte les risques des changements climatiques. Etant donné la longue durée de vie des constructions et des infrastructures, il importe d'adapter de bonne heure les décisions en matière d'architecture, d'aménagement du territoire, de conception des constructions et de technique du bâtiment aux changements climatiques en cours et à venir. Premièrement, cela évite de devoir prendre ultérieurement des mesures occasionnant un supplément de dépenses. Deuxièmement, un mode de construction adapté réduit les éventuels dommages dus à la météo et au climat. Et troisièmement, la sécurité et le confort en sont accrus tant dans l'habitat qu'au travail, de même que la sécurité d'exploitation dans les transports.

Les éléments urbains considérés dans ce chapitre comprennent les constructions dans les sphères d'habitation et de travail, les voies de transports et de circulation ainsi que la gestion de l'eau urbaine (cf. fig. 1, zones marquées en bleu). Les autres aspects de l'eau, tels que les cours d'eau naturels, l'eau comme danger naturel, l'offre et les besoins en eau ainsi que l'utilisation de l'eau, sont traités au chapitre sur l'économie des eaux. Le secteur énergétique fait l'objet d'un article séparé. Le chapitre „Constructions et infrastructures“ considère en outre l'agglomération comme un tout, au niveau générique, mais ne traite à cet égard que des agglomérations urbaines.

Les aspects suivants des changements climatiques sont particulièrement importants pour le secteur des constructions et des infrastructures:

- la hausse des températures / l'augmentation des vagues de chaleur
- les changements en matière de gestion des eaux
- l'augmentation des fortes précipitations d'hiver
- l'augmentation des tempêtes d'hiver
- l'augmentation des orages accompagnés de grêle, fortes pluies et rafales.

Les impacts sur les éléments urbains et les agglomérations prises comme un tout sont considérés en mettant l'accent sur deux aspects: (1) la qualité de vie en général et au travail, (2) la stabilité et le maintien de la valeur des constructions et infrastructures.

### Tour d'horizon

#### Éléments urbains: bâtiments

##### *Climat des locaux*

Les bâtiments récents disposent généralement d'une bonne isolation thermique qui permet de réduire les besoins en chauffage pendant la saison froide. En été, la chaleur pénètre un peu plus lentement, mais est alors aussi restituée plus difficilement vers l'extérieur. Le rayonnement solaire, ainsi que la chaleur dégagée par des appareils, l'éclairage et les

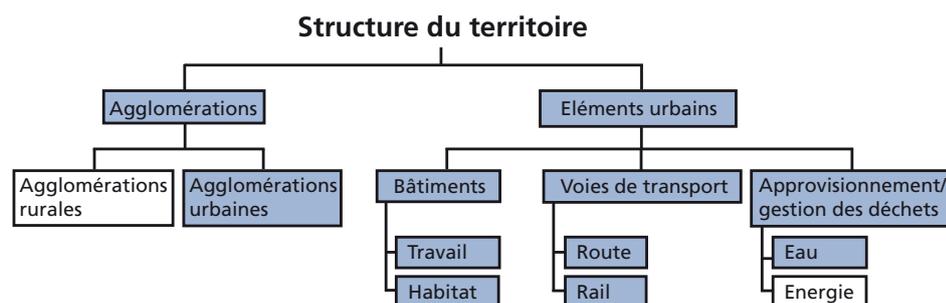


Figure 1: Aperçu des secteurs traités dans le chapitre „Constructions et infrastructures“ (marqués en bleu). Du fait des interactions avec d'autres domaines thématiques, la structure territoriale est examinée dans le sens d'une synthèse (cf. le chapitre „La Suisse urbaine“). Les agglomérations rurales ne sont pas considérées spécialement. Un chapitre séparé est consacré à l'énergie.

personnes, peut rendre nécessaire un recours à la climatisation, ceci notamment dans les bureaux et autres immeubles de services ainsi que dans les établissements industriels. La durée de la période de climatisation, de même que la probabilité des vagues de chaleur, augmentent avec le réchauffement climatique. Des mesures prévoyantes, telles que l'utilisation d'appareils faisant un usage efficace de l'énergie, le réglage de l'éclairage et des installations de protection contre le soleil, une bonne aération (par les fenêtres) et des systèmes de climatisation très efficaces, peuvent contribuer substantiellement à l'amélioration du climat des locaux.

#### *Enveloppe des bâtiments et constructions entières*

L'adaptation précoce des normes de construction est particulièrement importante en ce qui concerne l'enveloppe des bâtiments. Ces normes reposent actuellement sur des valeurs moyennes de périodes d'observation passées, or il serait urgent de les adapter au climat futur.

La menace dont peuvent faire l'objet des constructions entières découle principalement de l'augmentation attendue d'événements météorologiques extrêmes. De tels événements peuvent entraîner des dommages financiers considérables qui ne sont toutefois pas attribuables seulement aux changements climatiques. La concentration croissante des valeurs a aussi une influence importante, de même qu'une vulnérabilité en hausse et l'extension des maisons d'habitation dans des zones considérées autrefois comme exposées aux risques. C'est pourquoi l'aménagement du territoire a également une fonction importante à remplir: pour minimiser les coûts dans les secteurs exposés, il faut faire appel de façon optimale à la complémentarité entre l'aménagement du territoire et les mesures de protection.

#### **Réseau ferré et routier**

En ce qui concerne les impacts des changements climatiques sur le réseau ferré et routier, les plus gros problèmes sont à attendre au niveau des modifications du terrain, dues notamment à l'augmentation des fortes précipitations. Les laves torrentielles, crachées boueuses et glissements de terrain peuvent causer de gros dommages aux infrastructures. Sous ce rapport il faut considérer le fait que les risques naturels grandissent indépendamment des changements climatiques, en raison de la valeur croissante des infrastructures. Des stratégies de solution existent dans de nombreux cas, il convient d'en élargir raisonnablement l'application. Dans les transports routiers notam-

ment, l'évaluation des mesures nécessaires exige aussi une comparaison avec d'autres risques, en particulier ceux d'accidents de la circulation.

#### **Gestion de l'eau urbaine**

Pour ce qui a trait à la gestion de l'eau urbaine, les conséquences des changements climatiques peuvent être en partie évaluées. La probabilité est grande que l'approvisionnement en eau continuera d'être assuré malgré les modifications de la demande (p.ex. une hausse des besoins en été), grâce à une gestion optimale de l'eau. En matière de traitement des eaux usées, les températures en hausse, les périodes de sécheresse, mais aussi des précipitations intenses exigeront éventuellement des adaptations de l'exploitation des stations d'épuration.

#### **Agglomérations urbaines**

L'augmentation de la température, ainsi que les vagues de chaleur ou canicules plus fréquentes, se feront sentir de façon particulièrement accablantes dans les agglomérations urbaines. Compte tenu des conséquences sanitaires, il est urgent de prendre en compte cette évolution dans l'aménagement du territoire. Des mesures appropriées pour réduire l'exposition à la chaleur peuvent avoir pour effet positif additionnel d'améliorer aussi la qualité de l'air.

### **Lien avec d'autres thèmes**

#### **Energie**

Les économies d'énergie de chauffage sont compensées en partie par un besoin accru d'électricité pour la climatisation.

#### **Santé**

Dans les agglomérations urbaines surtout, l'exposition accrue à la chaleur peut conduire à des problèmes sanitaires.

#### **Agriculture**

Le besoin en eau accru de l'agriculture et des ménages peut mener à des conflits.

#### **Tourisme**

Le tourisme est fortement dépendant d'une infrastructure fonctionnant de façon fiable.

#### **Assurances**

Les dangers naturels peuvent conduire à davantage de dommages. Des stratégies d'adaptation aux changements climatiques peuvent diminuer la sensibilité à ces dommages (p.ex. toits vitrés incassables) ou l'augmenter (p.ex. protection antisolaire).

## 2. Bâtiments

### Climat des locaux

**Le réchauffement climatique fait augmenter aussi les besoins en climatisation. L'adaptation du mode de construction de nouveaux édifices ou de la rénovation de constructions existantes permet de climatiser les locaux en minimisant la consommation d'énergie et donc aussi les coûts.**

Les immeubles d'habitation et de bureaux récents ou rénovés disposent aujourd'hui d'une bonne, voire très bonne isolation thermique qui réduit les besoins de chauffage en hiver. En même temps, cette meilleure isolation de l'enveloppe du bâtiment diminue en été le transport vers l'extérieur de la chaleur qui a pénétré dans les locaux ou qui y a été produite. S'il y a d'importantes sources de chaleur dans le bâtiment et des apports d'énergie élevés par le rayonnement solaire, il s'ensuit une accumulation de chaleur dans les locaux, et de ce fait un besoin de climatisation, ceci avant tout dans les immeubles utilitaires (cf. chapitre „Energie“, paragraphe 2). Suite au réchauffement climatique, la période annuelle de climatisation sera plus longue et la température des locaux peut devenir accablante pendant les grandes chaleurs. De ce fait, mais aussi en raison d'exigences de confort croissantes, la climatisation prendra plus d'importance.

#### Immeubles de bureaux et autres bâtiments utilitaires

##### *Chaleur et productivité au travail*

Dans les immeubles de bureaux, des températures extérieures élevées, des sources de chaleur internes et le rayonnement solaire conduisent souvent à des conditions particulièrement désagréables. De nombreux bâtiments sont équipés de vastes façades vitrées qui laissent entrer la lumière et l'énergie solaire. A l'intérieur des locaux et dans les vitrages, la lumière est partiellement convertie en chaleur. A ceci s'ajoute le dégagement thermique des appareils électroniques tels qu'ordinateurs, photocopieuses, imprimantes etc. Une densité d'occupation élevée dans les immeubles de bureaux et l'éclairage contribuent également à la charge thermique. Une bonne isolation thermique, indispensable même sous un climat plus chaud pour réduire les besoins de chauffage et assurer un bon confort, pour corollaire que cette chaleur ne peut guère s'échapper à travers les fenêtres ou le reste de l'enveloppe du bâtiment. Il s'ensuit, pendant les jours chauds et ensoleillés, des températures élevées dans les locaux, lesquelles ne sont pas seulement désagréables, mais réduisent aussi la productivité au travail. Des études mon-

trèrent que pour des températures de plus de 26 °C en été, la productivité de travail dans les bureaux diminue.<sup>1,2,3</sup> Pendant l'été caniculaire de 2003, on a dénombré, en l'espace de quatre semaines, vingt-deux jours pendant lesquels la température d'un bureau moyen, sans réfrigération active, a dépassé 26 °C en dépit du recours au rafraîchissement nocturne (cf. fig. 2), ceci au lieu de sept jours durant un été moyen. Dans les immeubles de bureau non dotés du rafraîchissement nocturne, tels qu'ils se présentent généralement aujourd'hui, cette limite de confort est encore bien plus souvent dépassée.<sup>4</sup> Le besoin de climatisation ne se limite donc pas aux périodes de chaleur exceptionnelle, mais se présente aussi lors d'un été moyen.

##### *Adaptation de constructions existantes*

Dans les constructions existantes, le problème de la charge thermique peut être résolu par une bonne protection contre le soleil, des appareils et un éclairage bien réglés (p.ex. modulés en fonction de l'heure et des personnes présentes) et utilisant l'énergie de façon efficace, la possibilité d'ouvrir les fenêtres et l'installation de climatiseurs. Une optimisation de la technique et des effets de synergie avec la fourniture de chaleur aux locaux permettent de minimiser les investissements et les dépenses courantes. Un mode de construction bien compris peut rendre superflue l'installation de climatiseurs dans les nouveaux bâtiments. Des systèmes de „free cooling“ où des climatiseurs très performants ne consomment plus qu'une fraction de l'énergie des appareils et installations de climatisation standards actuels.<sup>6</sup> De tels systèmes utilisent autant que possible le froid disponible (p.ex. des températures extérieures basses pendant la nuit, l'évaporation, les sondes géothermiques de pompes à chaleur) pour refroidir les plafonds, sols et parois, qui peuvent ainsi, le jour suivant, absorber de nouveau de la chaleur dans l'air ambiant. Des mesures architecturales peuvent également fournir une contribution substantielle au confort climatique des locaux; elles ont trait par exemple à la protection contre le soleil (où il faut prendre en compte l'augmentation du danger de grêle et de tempête, avant tout pour les hauts bâtiments, cf. le paragraphe „Enveloppe du

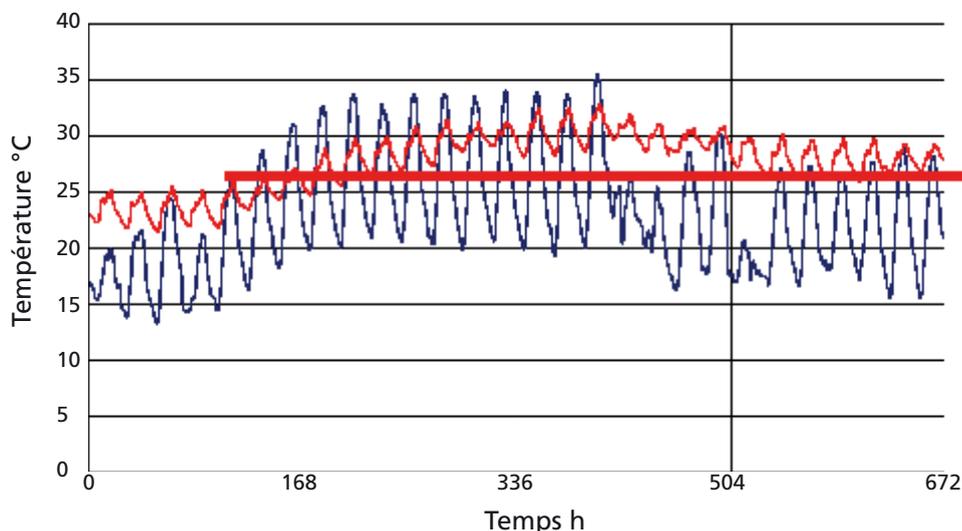


Figure 2: Evolution calculée de la température durant quatre semaines pendant l'été caniculaire de 2003, sur le site de MétéoSuisse à Zurich. Température extérieure (en bleu) et dans les locaux (en rouge) d'un bâtiment de bureaux ayant une forte proportion de vitrage (80%), une bonne protection antisolaire ( $g=0.10$ ), des charges intérieures modérées ( $15\text{W/m}^2$ ), une aération confort le jour et une aération intense la nuit ( $nL=0.3\text{h}^{-1}$ ). La limite de confort de  $26^\circ\text{C}$  (barre rouge), au-dessus de laquelle la productivité au travail diminue rapidement, est dépassée pendant plusieurs jours. (Source: Frank 2006)<sup>5</sup>

bâtiment“), à la profondeur des locaux, à la dimension et à l'orientation des fenêtres, ainsi qu'à des éléments d'architecture paysagiste tels que les arbres, les espaces verts et les installations hydrauliques.

#### *Efficacité et besoin en énergie*

Pour autant que les points critiques mentionnés soient pris en considération dans les futures constructions, on peut s'attendre dans l'ensemble à ce que les économies de chauffage soient à l'avenir plus importantes que le besoin supplémentaire d'électricité pour la climatisation. Cependant, ce changement implique un déplacement de la demande des combustibles vers l'électricité (cf. chapitre „Energie“, 2e paragraphe). Des raisons économiques et tenant à la politique en matière de ressources plaident pour une climatisation des bâtiments aussi efficace que possible (cf. chapitre „Energie“, 5e paragraphe), étant donné notamment les énormes économies d'énergie par rapport à des mesures de réfrigération inefficaces. Un défi à relever à cet égard tient au fait qu'une climatisation efficace implique une harmonisation minutieuse de différents éléments (p.ex. l'isolation, la ventilation, l'ombragement, les fenêtres). Une telle conception et planification intégrales est encore l'exception aujourd'hui. La priorité est donnée à minimiser à tous les niveaux les investissements, plutôt que les coûts du cycle de vie, ce qui fait obstacle à la réalisation de systèmes harmonisés minutieusement les uns par rapport aux autres. Il

est donc urgent d'agir aux niveaux de la politique énergétique, de la législation, des branches concernées ainsi que des maîtres-d'oeuvre et des propriétaires, exploitants et utilisateurs des bâtiments.

#### *Coûts d'adaptation*

L'adaptation d'immeubles de bureaux existants et d'autres bâtiments utilitaires, tels que centres d'achat, hôpitaux, homes, écoles etc., implique des dépenses supplémentaires, dont l'installation et l'assainissement de la climatisation et l'amélioration de la protection contre le soleil représentent la plus grande part. Selon une étude mandatée par l'Office fédéral de l'énergie<sup>7</sup>, la protection contre l'excès de chaleur causera à elle seule des coûts de 10 francs par  $\text{m}^2$  et par année. La surface de bureaux s'élève actuellement en gros à 40 millions de  $\text{m}^2$ ; la surface totale chauffée et éclairée du secteur des services est de plus de 150 millions de  $\text{m}^2$ . La climatisation de deux tiers de cette surface occasionnerait des dépenses de 1 milliard de francs par an. Cependant, le bénéfice retiré sous forme de productivité au travail et d'attractivité de la place de travail serait encore plus considérable selon les estimations, raison pour laquelle la climatisation des bâtiments deviendra un thème central ces années à venir.

#### **Immeubles d'habitation**

Dans les immeubles d'habitation, on peut renoncer en général aux climatiseurs si le mode de

construction est bien adapté et que l'on aère pendant la nuit en ouvrant les fenêtres. Une bonne protection contre le soleil, éventuellement réglée, réduit l'apport de chaleur externe. Une aération appropriée, l'air parcourant p.ex. une nappe de tubes enterrée, de même qu'une aération par les fenêtres et la nuit par des clapets et fentes évacuent la chaleur. Ces deux mesures – la réduction des apports de chaleur et l'évacuation de cette dernière – contribuent

à maintenir un climat confortable à l'intérieur des locaux. L'effet de la réfrigération nocturne peut être intensifié en exploitant la capacité de stockage à l'intérieur des locaux, par exemple par des plafonds en béton brut, des revêtements de sol sans tapis et le renforcement des combles par des plaques de plâtre. A mentionner aussi l'utilisation de sondes géothermiques comme source de froid relativement efficace du point de vue énergétique.

### Enveloppe du bâtiment

**L'augmentation attendue de l'intensité et de la fréquence des événements météorologiques extrêmes est une menace pour les éléments sensibles de l'enveloppe des bâtiments. Les normes de construction actuelles, qui reposent sur des valeurs climatiques moyennes de périodes d'observation passées, devront être adaptées au climat futur.**

Il est possible que la vulnérabilité d'éléments de construction situés sur la face extérieure des bâtiments puisse augmenter à l'avenir. D'une part, il faut compter avec une tendance à l'augmentation de la fréquence et/ou de l'intensité d'événements météorologiques exceptionnels (p.ex. fortes précipitations, tempêtes d'hiver). De ce fait, le nombre des éléments de construction susceptibles d'être facilement endommagés augmentera probablement. Ceux-ci peuvent être des systèmes d'ombrage assurant une protection contre le réchauffement climatique, les isolations thermiques et des installations permettant d'économiser ou de produire de l'énergie (p.ex. installations solaires). La diversité des matériaux utilisés pour les toits et les façades a augmenté. Les bâtiments administratifs et industriels notamment comprennent souvent des matériaux présentant une résistance insuffisante à la grêle. Il s'agit de matières synthétiques laissant passer la lumière, de tôles et de dispositifs de protection contre le soleil (cf. fig. 3).

Jusqu'à maintenant, les exigences posées à la sécurité des éléments de construction situés sur la face extérieure des bâtiments reposent sur des valeurs moyennes de périodes d'observation passées du climat, qui ont été codifiées dans des normes de construction. Non seulement les constructions techniques (telles que mâts et tours, ponts de grande portée, serres etc.) ou édifiées dans des sites extrêmes (en haute montagne, à proximité d'un cours d'eau, etc.), mais aussi les constructions normales sont concernées par l'intensification des phénomènes météorologiques. Les fixations de façades légères et de couvertures de toits, la résistance à la cassure de toits vitrés, la stabilité des systèmes d'ombrage et des installations solaires à l'égard des phénomènes météorologiques etc. doivent être contrôlées dans les constructions existantes et être adaptées au climat futur dans les nouvelles constructions.



Figure 3: Dégâts de grêle sur une façade en matière synthétique à Wetzikon, en 2004. (Source: Thomas Egli)

## Événements extrêmes et mise en danger de bâtiments entiers

**L'augmentation possible des crues, fortes précipitations, tempêtes et chutes de grêle peut mettre en danger des bâtiments et entraîner de gros dommages financiers. Cette évolution des risques exige une adaptation des normes de construction.**

### Crues

Lorsque des crues surviennent aujourd'hui, elles entraînent généralement d'importants dommages financiers dans le secteur des infrastructures. Ceci ne tient pas seulement aux changements climatiques, mais aussi à l'énorme concentration de valeurs; en d'autres termes, le risque de dommages croît du fait que l'on ne cesse de développer le réseau routier et ferroviaire, et de construire des ponts et des maisons. En outre, les constructions se sont étendues dans des régions que l'on aurait évitées autrefois, parce que jugées trop risquées.

La question de savoir si les crues deviendront plus fréquentes avec les changements climatiques ne peut pas encore être tranchée définitivement par la science (cf. chapitre „Economie des eaux“). Leur augmentation semble probable en particulier durant l'hiver et les saisons de transition. Le Plateau, les Préalpes et le Tessin seraient vraisemblablement les premiers touchés. Pour empêcher que l'ampleur des dommages dus aux crues n'augmente avec les changements climatiques, la protection contre les crues doit être réexaminée en permanence. La stratégie souple suivie à cet égard par la Suisse (cf. chapitre „Economie des eaux“, 3e paragraphe) vise à éviter en premier lieu les dommages et non pas forcément les inondations.<sup>8</sup>

### Tempêtes

Les édifices particulièrement exposés, comme par exemple les tours des émetteurs, sont soumis à des contraintes approchant la limite de stabilité lors de tempêtes de l'intensité de Lothar (décembre 1999). Si de telles tempêtes deviennent plus fréquentes, il faudra renforcer les normes de construction.

### Fortes pluies

L'augmentation attendue des précipitations de forte intensité doit être prise en compte dans le dimensionnement de l'évacuation des eaux des biens immobiliers. Sont concernés les caves et rez-de-chaussée de bâtiments situés en bordure de pentes et dans des dépressions du terrain. Ce danger pourra se présenter plus souvent aussi au centre des villes, car l'évacuation des eaux y est souvent dimensionnée pour des précipitations moins intenses.<sup>9</sup>

### Grêle

Entre 1983 et 2003, le nombre de gros passages de grêle a doublé en Suisse (longueur du passage > 100 km).<sup>10,11</sup> Les gros orages de grêle produisent des grêlons de grand diamètre. Ceux-ci causent des dommages à des matériaux sensibles des toits et des façades, comme par exemple les matières synthétiques, les tôles et les isolations extérieures. Les dispositifs d'ombrage sont en général très sensibles aux effets de la grêle.<sup>9</sup>



Figure 4: Effondrement du toit d'une halle à Waldstatt en 2006, dû à la pression de la neige. (Source: Thomas Egli)

### Charges de neige

Aux altitudes où les précipitations d'hiver tombent sous forme de neige, l'augmentation attendue de ces dernières peut avoir pour conséquence des problèmes de statique en ce qui concerne les toits. Si la charge de neige est trop élevée, ceux-ci peuvent subir d'importants dommages et même, dans le pire des cas, s'effondrer. Les halles au toit constitué de matériaux légers tels que le bois ou l'acier et atteignant une portée considérable sont particulièrement menacées, car la charge de neige est alors importante par rapport au poids propre. Les toits plats sont aussi menacés, en particulier lorsqu'en raison d'une mauvaise isolation thermique la neige tombée antérieurement s'est transformée en glace sur le toit et que de nouvelles chutes de neige viennent encore accroître la charge. Pour minimiser le risque d'effondrement des toits, l'augmentation possible de la charge de neige devra être prise en compte à l'avenir lors de la planification d'édifices privés et publics.

### Avalanches

Le danger d'avalanches peut évoluer avec le réchauffement climatique. On ne sait pas au juste aujourd'hui, si les avalanches deviendront plus fréquentes ou plus rares. Leur fréquence peut aussi changer régionalement indépendamment de l'évolution de leur nombre total. Quoi qu'il en soit, la minimisation des coûts nécessite une évaluation du risque et demande des mesures en conséquence (plan de zone, mesures de protection).<sup>8</sup> L'hiver à avalanches de 1999 a montré quelle ampleur peuvent atteindre les dommages consécutifs aux masses de neige.

### Incertitudes / questions ouvertes

De meilleurs modèles sont nécessaires pour pouvoir estimer le comportement de la température et de l'humidité dans des locaux et leur influence sur le sentiment de confort et la productivité. En outre, la question du confort thermique ne devrait pas être considérée isolément, mais examinée dans son contexte global incluant les aspects microclimatiques et énergétiques.

## 3. Voies de transport

### Réseau ferroviaire

**Les impacts des changements climatiques sur le réseau ferroviaire tiennent avant tout à l'augmentation possible des événements météorologiques extrêmes. Les fortes précipitations sont une menace pour la stabilité des sillons ferroviaires, les tempêtes et périodes de chaleur peuvent endommager les lignes de contact et les voies. Des contre-mesures permettent d'éviter une augmentation exponentielle du montant des dommages.**

#### Stabilité et sécurité des sillons ferroviaires

Les voies ferrées sont aujourd'hui déjà exposées régulièrement aux dangers naturels, en premier lieu lors d'événements météorologiques exceptionnels tels que de longues périodes de pluie ou de fortes chutes de neige. C'est ainsi que de nombreuses gares ont été inondées lors des crues d'août 2005 (cf. fig. 5). De fortes précipitations peuvent avoir pour conséquence non seulement des inondations, mais aussi des glissements de terrain et des crachées boueuses. D'autres conséquences possibles sont des accumulations d'eau sur la voie, l'érosion des bords et des laves torrentielles.



Figure 5: Crues d'août 2005 à Dornibach/SZ  
Source: CFF

#### Précipitations

L'augmentation pronostiquée des précipitations en hiver, qui tomberont davantage sous forme de pluie à basse altitude, ainsi que celle, attendue, des fortes précipitations d'hiver accroîtra la menace sur la stabilité des sillons ferroviaires. La stabilité des talus et des pentes est particulièrement mise en question. Lors de fortes précipitations, l'eau peut aussi saper le terrain sous la voie.

La fréquence future des instabilités et des problèmes d'évacuation de l'eau ne dépend pas seulement de la quantité et de l'intensité des précipitations. L'humidité du sol et la capacité des sols et empièvements à accumuler l'eau, ainsi que l'écoulement de l'eau dans des rigoles situées à proximité, sont aussi des facteurs d'influence importants. Ceci vaut notamment en été, saison durant laquelle les quantités totales de précipitations tendront à diminuer, mais où la pluie tombera plus souvent sur un sol desséché.

Il semble probable que l'instabilité des talus et des pentes croîtra avec l'augmentation des précipitations. Mis à part les lignes de chemins de fer longeant des pentes, les segments de voie aménagés en déblai sur une pente sur le Plateau et dans les Préalpes recèlent un potentiel non négligeable de glissement. Là aussi, les fortes précipitations

peuvent détrempier la voie, la rendre instable et conduire finalement à des glissements de terrain. Au-dessus de la limite des chutes de neige, les quantités importantes de précipitation en hiver peuvent entraîner une augmentation du danger d'avalanches ou entraver le fonctionnement des infrastructures (blocage d'aiguillages, limitation de la visibilité, amoncellement de neige sur la voie). Les chemins de fer disposent d'un cadastre des couloirs d'avalanche qui peuvent être une menace pour le réseau. Dans les zones critiques, les sillons ferroviaires sont aujourd'hui déjà assurés par des galeries de protection ou surveillés de près pendant les fortes chutes de neige. La protection contre d'autres couloirs d'avalanche pourrait être, si nécessaire, réalisée assez facilement.

#### *Température*

Les conséquences de l'augmentation moyenne des températures, de même que celles de vagues de chaleurs qui surviendront probablement plus fréquemment, seront avant tout indirectes en ce qui concerne la stabilité et sécurité des sillons ferroviaires. Des effets sont possibles comme conséquences du dégel du pergélisol et éventuellement de modifications des processus de dégel et de gel. L'été caniculaire de 2003 a montré les effets de températures élevées sur la stabilité des pentes. Pendant cet été exceptionnellement chaud, de nombreux éboulements et chutes de pierres ont été observés dans tout l'arc alpin, notamment à haute altitude et sur les pentes exposées au nord. Cette activité exceptionnelle en matière d'éboulements est interprétée comme indice selon lequel la déstabilisation due à la chaleur extrême se produit comme réaction presque immédiate. Etant donné que les régions à pergélisol sont situées très souvent à l'extérieur des zones d'habitation et d'infrastructures, le danger futur est limité. Dans les régions critiques, les risques et les dommages peuvent être minimisés en renforçant les mesures de sécurité (p.ex. filets de sécurité, murs de protection, surveillance).

Il est possible que l'on assiste à une diminution des chutes de pierres dans les régions situées à plus basse altitude, où les températures seront plus souvent positives à l'avenir en raison du réchauffement.

#### **Ouvrages de génie civil**

En matière de construction, on ne s'attend pas à des problèmes liés au réchauffement climatique

pour les ouvrages de génie civil tels que ponts, tunnels, passages en tranchée, etc. Normalement, une augmentation des températures de l'ordre de grandeur attendu peut être supportée sans conséquences par les ouvrages de génie civil. On ne s'attend pas non plus à des problèmes de statique en cas de tempêtes. Mais il est possible que les phénomènes d'affouillement et les problèmes d'écoulement augmentent au niveau des ponts et d'autres passages du fait de crues plus importantes.

#### **Lignes de contact et rails**

##### *Tempêtes d'hiver*

Du fait de l'augmentation attendue des tempêtes d'hiver, il faudra compter avec davantage d'arbres déracinés (cf. fig. 6). Lorsque de tels arbres tombent sur des lignes de contact ou la voie ferrée, cela entraîne généralement des retards et interruptions du trafic ferroviaire et des dommages aux infrastructures. Environ un tiers des quelque 3000 km de lignes du réseau des CFF est bordé d'un ou des deux côtés par des forêts.

Les CFF s'efforcent d'avoir sur tous les tronçons boisés un profil de forêt bien défini: des buissons et arbustes à proximité des voies et des arbres de plus grande taille à plus grande distance de ces dernières. Des arbres tombés ne peuvent ainsi plus guère causer de dommages. Cette manière de procéder est avantageuse du point de vue de la disponibilité et sécurité en cas de tempêtes, mais peu favorable en revanche en ce qui concerne l'ombrage des pentes lors de périodes de chaleur (microclimat des talus de voies ferrées).

##### *Tendance des températures / extrêmes de chaleur*

La montée des températures d'été a des impacts sur le réseau ferré. Des températures élevées persistant pendant plusieurs jours peuvent avoir pour effet de déformer les rails, vu que la dilatation thermique de ces derniers est empêchée du fait qu'ils sont soudés sans interstice l'un à la suite de l'autre. La pression qui en résulte peut entraîner un déplacement latéral des rails. Lors de la pose des rails, des mesures sont prises pour réduire cette pression et accroître la résistance latérale de la voie.

Pendant l'été caniculaire de 2003, de telles déformations des rails ont été en gros 50% plus fréquentes qu'au cours d'un été moyen. Pour ne



Figure 6: Arbre tombé sur la ligne de contact à Wiggen. (Photo: CFF)

pas risquer un déraillement, les trains doivent réduire leur vitesse en cas de déformations des rails ou renoncer même à utiliser les tronçons concernés. Compte tenu du fait que les périodes de forte chaleur deviendront nettement plus probables jusqu'en 2050, les exploitants de chemins de fer devront se prémunir contre des déformations de rails plus fréquentes. Moyennant un supplément de dépense, le processus de construction peut être adapté de manière à permettre aux rails de supporter sans dommages des températures plus élevées. Des exigences plus sévères sont appliquées aujourd'hui déjà au Tessin. Les rails sont soumis, lors de leur pose, à une température plus élevée, afin de prévenir des déformations futures.

*Augmentation relative aux tempêtes d'été?*

Les orages de chaleur en été représentent aussi un risque potentiel pour les lignes de contact, étant donné que la foudre peut entraîner des perturbations de l'exploitation et des dommages aux installations. Mais comme aucun pronostic n'a encore pu être fait jusqu'ici au sujet des tempêtes d'été, il n'est pas possible pour l'heure d'estimer si ce risque se modifiera.

*Evolution du montant des dommages*

Selon une étude de l'Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), qui montre l'évolution du montant des dommages de 1972 à 2005, la somme des coûts des dommages dus aux crues, glissements de terrain et laves torrentielles a augmenté presque linéairement au cours des trente années passées (cf. fig. 7). Le rapport souligne que la hausse de la somme des coûts des dommages est nettement au-dessous d'une évolution proportionnelle à l'accroissement de la population, de la surface des zones d'habitation et de la densité des valeurs. L'ampleur des dommages dus aux phénomènes naturels est donc inférieure à ce que laisse attendre l'évolution des valeurs. Ceci tient surtout aux mesures de protection qui ont été prises. Au vu des changements attendus, il semble probable qu'une planification prévoyante et la mise en œuvre des mesures correspondantes pourra empêcher largement une augmentation exponentielle de la somme des dommages matériels.

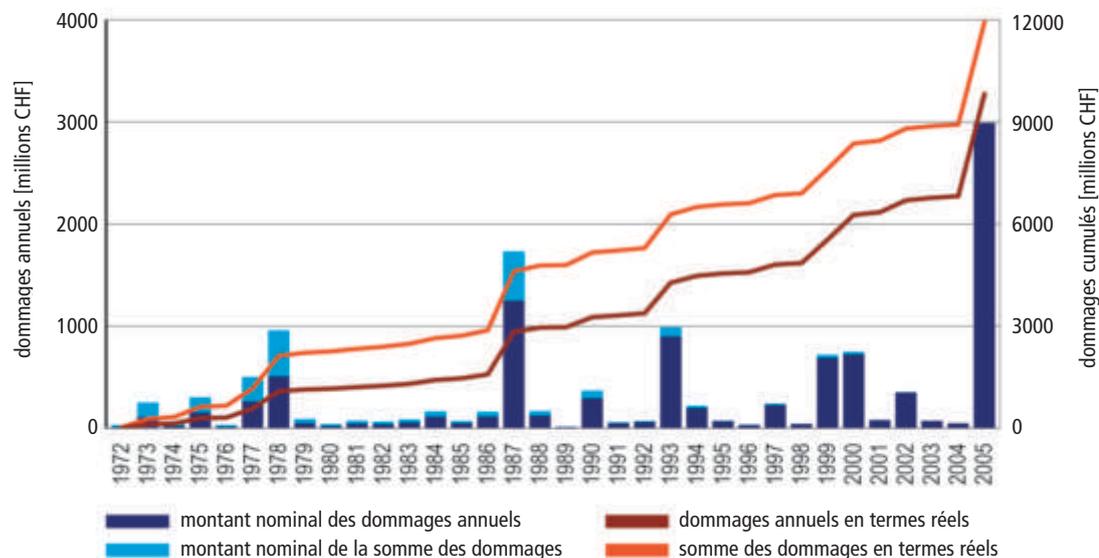


Figure 7: Somme des dommages dus aux crues, glissements de terrain et laves torrentielles de 1972 à 2005. (Source: Inst. Fédéral de recherche WSL, 2007)

## Réseau routier

**Comme le réseau ferroviaire, le réseau routier est aussi sous la menace avant tout des événements extrêmes. Des contre-mesures en réponse aux nouveaux dangers et des adaptations en matière de construction des routes permettront de stabiliser à peu près les atteintes et les risques affectant les transports routiers.**

Les changements climatiques auront sur le réseau routier des impacts similaires à ceux sur le réseau ferré. On peut s'attendre en principe à des conséquences de moindre ampleur pour les routes, car de par sa construction, le réseau routier est généralement moins sensible. D'autres facteurs, par exemple une nouvelle élévation de la limite de poids des camions ou un nombre nettement plus élevé de véhicules lourds, auraient très probablement des conséquences plus marquées que les changements climatiques attendus. Vu sa très forte densité, le réseau routier a en outre un avantage de flexibilité sur le réseau ferré: si un tronçon de route est menacé ou impraticable, il existe souvent des itinéraires de substitution.

Du point de vue des matériaux utilisés et de la construction, le réseau routier s'adaptera là où cela sera nécessaire aux nouvelles conditions, notamment en ce qui concerne la chaussée.

Les facteurs climatiques d'influence les plus importants en ce qui concerne les routes seront les crues et les instabilités de pentes. En outre, des avalanches, tempêtes d'hiver et chute de grêle pourront porter atteinte au trafic routier.

### Fortes précipitations / inondations

Les crues peuvent toucher des tronçons routiers aussi bien que des lignes de chemins de fer. Des masses d'eau exceptionnelles peuvent avoir pour effet de saper le soubassement de routes ou, dans les régions plus plates, des les inonder (cf. fig. 8), si des cours d'eau et des lacs débordent. Dans les régions de montagne, les fortes précipitations provoquent souvent des glissements de terrains et des laves torrentielles. D'autre part, des hivers pauvres en neige peuvent avoir des effets positifs sur le trafic routier: le risque d'accident est alors moins élevé et les routes demandent moins de travaux d'entretien.

### Instabilité des pentes

Le risque de laves torrentielles et d'éboulements existe autant dans les transports routiers que ferroviaires. Il menace avant tout les routes en altitude ou en des endroits exposés. Les éboulements ne tiennent pas forcément aux changements climatiques, mais peuvent avoir différentes causes. Entrent en ligne de compte comme facteurs initiaux: l'altération atmos-

phérique des roches, des quantités d'eau plus importantes jouant le rôle de lubrifiant, des effets de gel et dégel portant atteinte à la cohésion des roches, ou encore le dégel du pergélisol en raison de la hausse des températures (cf. Stabilité et sécurité des sillons ferroviaires). Une combinaison de différents facteurs est aussi possible. La sensibilité du système de transport à l'égard des perturbations est aujourd'hui déjà très grande en raison de l'important volume du trafic et de l'aspiration à une mobilité quasi illimitée.

### Avalanches

Tout comme le réseau ferré, les transports routiers peuvent aussi être perturbés par des avalanches ou le danger d'avalanches. Les changements climatiques feront éventuellement augmenter ce risque à haute altitude, où les quantités de précipitations plus importantes en hiver peuvent tomber sous forme de neige.

### Tempêtes d'hiver

Du fait de l'augmentation prévue des tempêtes d'hiver, il faudra s'attendre à ce que des arbres soient plus souvent déracinés. Si de tels arbres tombent sur la route, il en résulte un danger immédiat pour ses utilisateurs et il peut s'ensuire des interruptions du trafic. Ce risque est néanmoins faible actuellement et ne devrait pas augmenter sensiblement à l'avenir.

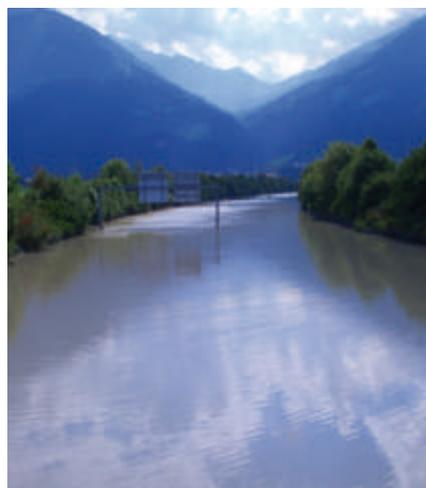


Figure 8: La N8 entre Interlaken Est et Interlaken Ouest en août 2005. (Source: Muriel Kleist)

## 4. Gestion de l'eau urbaine

**Des étés plus chauds et plus secs d'une part, et l'évolution des changements des besoins en eau d'autre part, rendront nécessaires une optimisation de la gestion de ce précieux liquide pour en assurer l'approvisionnement. Le traitement des eaux usées devra être adapté aux nouvelles exigences découlant de températures plus hautes, de périodes sèches plus fréquentes et de précipitations plus intenses.**

### Approvisionnement en eau

Les besoins en eau de haute qualité (eau potable) augmentera avec le réchauffement climatique. Il faudra pour cela améliorer la gestion de l'eau, du fait notamment que pendant les mois d'été, davantage de personnes passeront leurs vacances en Suisse plutôt que dans le Sud où il fera plus chaud à l'avenir.

Les étés secs accroîtront fortement les besoins en eau pour arroser les jardins. De l'eau de moins bonne qualité peut être utilisée à cette fin. Mais les infrastructures nécessaires font défaut aujourd'hui. L'été caniculaire de 2003 donne des points de repère pour estimer l'ampleur des besoins à attendre. Etant donné qu'en Suisse les eaux souterraines sont rarement utilisées jusqu'à la limite de leur capacité et que les grands lacs représentent une réserve d'eau suffisante, il sera possible de couvrir des excédents de demande en interconnectant les infrastructures d'approvisionnement en eau.

Toutefois, il faudra compter avec des baisses locales et temporaires du niveau des eaux souterraines. L'enrichissement de la nappe phréatique par injection d'eau de surface préalablement purifiée deviendra plus fréquent. Il faudra éventuellement agrandir les zones de protection des eaux souterraines, ce qui entraînera des dépenses importantes, vu que ces zones de protection devront faire en partie l'objet d'expropriations.

L'approvisionnement en eau à partir de sources dans des régions karstiques rurales mal interconnectées (Jura, Préalpes) est critique si des sources ne disposant que d'une petite zone d'alimentation en surface tarissent lors de longues périodes sèches. Pour assurer dans ces cas aussi l'approvisionnement en eau, il faudra développer la mise en réseau des infrastructures, ce qui entraînera des dépenses.

Le réchauffement augmentera aussi les températures de l'eau. Ceci pourrait causer éventuellement des désagréments en Suisse, sans conduire pour autant à des situations critiques. La qualité de l'eau non traitée, dont 20% provient des lacs et 80% de nappes souterraines et de sources,

pourrait se détériorer dans certains cas. Des changements dans les populations d'algues et, partant, des teneurs de l'eau en oxygène nécessiteraient de nouveaux procédés de traitement. Le danger que les conduites du réseau de distribution soient contaminées par des germes augmente.

### Traitement des eaux usées Egouts

Une hausse des températures dans les égouts due à des températures extérieures plus élevées intensifie la corrosion du béton et accroît ainsi les besoins d'entretien. Ceci peut être évité par le choix de matériaux appropriés. Des problèmes d'odeurs peuvent être éventuellement plus fréquents.

Si le niveau de la nappe phréatique baisse pendant des périodes de chaleur, l'infiltration d'eau souterraine diminue, de même que l'exfiltration d'eau usée. Il s'ensuit une augmentation de la sédimentation dans les égouts et éventuellement des nuisances pour les eaux souterraines. Les phases sèches ont aussi une influence sur le traitement des eaux mixtes, c'est-à-dire d'eaux usées mélangées à l'eau de pluie, que la station d'épuration ne peut pas absorber parce qu'elle ne dispose pas d'assez de capacité. Si leur dilution dans des petits cours d'eau n'est plus assurée du fait d'un affaiblissement ou tarissement des débits, les exigences en matière de traitement des eaux mixtes pourraient augmenter. En outre, la force d'entraînement dans les égouts diminue si l'apport d'eau diminue, ce qui accroît le risque d'engorgement et nécessite des adaptations de l'exploitation des stations d'épuration.

Les précipitations intenses peuvent d'autre part provoquer des refoulements dans les égouts, et de ce fait des inondations de caves ou même de quartiers entiers. Ce problème pourrait se présenter plus fréquemment avec l'augmentation attendue des fortes précipitations et exige, dans des cas critiques, la pose de canalisations de plus grande taille et l'installation de dispositifs anti-retour.

### Epuration des eaux

Les changements climatiques n'affecteront guère l'exploitation des stations d'épuration. Certaines adaptations seront toutefois requises. La demande en oxygène notamment croît du fait que les processus biologiques s'accroissent quand la température augmente. Mais l'apport d'oxygène étant simultanément rendu plus difficile, il faudra compléter en conséquence l'équipement des installations.

Une élévation des températures des eaux, une baisse du niveau des eaux due à l'accroissement de la sécheresse et des besoins plus importants en eau d'irrigation auront pour conséquence d'accroître les exigences posées à l'épuration des eaux. De tels investissements pourraient être motivés aussi par de plus hautes exigences en matière de qualité d'eau pour les baignades.

### Raccordements aux maisons

Les problèmes en matière d'égouts et de distribution d'eau surviennent avant tout au niveau des raccordements aux maisons. A Zurich, 50% des ruptures de conduites du réseau de distribution d'eau se produisent à ce niveau. Si les eaux souterraines baissent en raison du réchauffement climatique, il s'ensuivra des tassements dont pourront résulter encore davantage de ruptures de conduites.

### Incertitudes / questions ouvertes

Les impacts des changements climatiques sur la gestion de l'eau urbaine ne peuvent être évalués qu'en partie. Pour juger de façon plus précise des points où il faut intervenir, des informations hydrologiques supplémentaires sont nécessaires, notamment sur l'évolution des niveaux des eaux souterraines, la fréquence d'épisodes de pluie courts mais intenses, les débits futurs, la fréquence des extrêmes et les variations annuelles.

## 5. Agglomérations urbaines

**La chaleur se fait sentir davantage dans les villes que dans la campagne environnante, du fait de la proportion élevée de surfaces bétonnées, du faible pourcentage d'espaces verts, des rejets thermiques des bâtiments, de l'industrie et des transports ainsi que de la mauvaise aération. Ce problème des villes comme îlots de chaleur s'accroîtra encore avec les changements climatiques.**

Le jour, la ville est la plupart du temps plus fraîche que la campagne environnante, mais la nuit, elle est nettement plus chaude. Différents facteurs contribuent à ce qu'on appelle l'effet d'îlot de chaleur et au fait que de façon générale, la chaleur se fait sentir davantage dans les villes. Les bâtiments et les surfaces bétonnées ou asphaltées absorbent plus fortement la chaleur qu'un terrain non construit. Rues et bâtiments accumulent l'apport de chaleur diurne, tandis que la rareté des espaces verts et des plantes a pour effet que le refroidissement dû à l'évaporation est faible comparé à ce qu'il est dans les zones rurales aux alentours. A ceci s'ajoute la chaleur rejetée par les bâtiments, l'industrie et les transports. Enfin, l'aération est moins bonne dans les villes que dans la campagne environnante, car les vents qui les traversent y sont ralentis.

L'augmentation des températures et les vagues de chaleur plus fréquentes accentuent le problème des villes comme îlots de chaleur. C'est ainsi que l'été caniculaire de 2003 a eu des impacts nettement plus graves en milieu urbain que dans les régions rurales.<sup>12</sup> Les températures ont atteint des

valeurs particulièrement élevées dans les villes dont la population a eu à déplorer une hausse des décès plus prononcée.<sup>13</sup>

Du point de vue des effets sanitaires, ce ne sont pas les maxima journaliers qui importent le plus, mais les températures nocturnes élevées. Il est d'autant plus essentiel de prendre des contre-mesures que l'on s'attend, du fait des changements climatiques, à une hausse des températures nocturnes plus forte que celle des températures diurnes. Comme les températures nocturnes sont en principe plus hautes déjà aujourd'hui, les impacts sanitaires négatifs des changements climatiques vont encore se renforcer. Le fait que la chaleur se fait sentir davantage dans les villes a été négligé jusqu'ici en Suisse dans les constructions urbaines. Pour que les citoyens n'aient pas à supporter des chaleurs encore plus fortes en conséquence des changements climatiques, cet aspect devra être pris en compte dans l'aménagement du territoire. La création d'espaces verts et d'ombrages le long des trottoirs et des zones piétonnières permet par exemple de réduire la chaleur.

## Bibliographie et notes

- 1 DP. Wyon. Indoor environmental effects on productivity. Indoor Air Quality Conference Baltimore, USA, 1996.
- 2 O. Seppänen, WJ. Fisk. A conceptual model to estimate the cost effectiveness of indoor environment improvements. Healthy Buildings Conference, Singapore, 2003.
- 3 B.W. Olesen. Indoor environment – Health-comfort and productivity. Climate 2005 Conference, Lausanne, Switzerland, 2005.
- 4 Th. Frank. Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland. *Energy and Buildings*, 37, 11, 2005, 1175–1185.
- 5 Th. Frank. (2006). Was wenn es wärmer wird – Die Schweiz im Klimawandel. 28. Wissenschaftsapéro, EMPA Akademie Dübendorf, Schweiz, 2006.
- 6 B. Wellig, B. Kegel B. et al. Verdoppelung der Jahresarbeitszahl von Klimakälteanlagen durch Ausnützung eines kleinen Temperaturhubs. Ernst Basler + Partner, Zürich, i.A. Forschungsprogramm UAW, Bundesamt für Energie, Bern, 2006.
- 7 M. Jakob, E. Jochem E., A. Honegger, A. Baumgartner, U. Menti, I. Plüss. Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienz-Massnahmen und optimierter Gebäudetechnik bei Wirtschaftsbauten. Bundesamt für Energie, Bern, 2006.
- 8 Th. Egli. Wegleitung Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren. Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen, Bern, 115 S, 2006.
- 9 Th. Egli. Wegleitung Objektschutz gegen meteorologische Naturgefahren. Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen, Bern, 110 S., Vernehmlassungsversion ([www.vkf.ch](http://www.vkf.ch)), 2006.
- 10 H.H. Schiesser et al. Klimatologie der Stürme und Sturmsysteme anhand von Radar- und Schadendaten. Projektschlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes „Klimaänderungen und Naturkatastrophen“, NFP 31, vdf Hochschulverlag an der ETH, Zürich, 1997.
- 11 H.H. Schiesser. Hagelstürme in der Schweiz: Wiederkehrperioden von schadenbringenden Hagelkorngrößen – eine Abschätzung. Studie erstellt im Auftrag der Präventionsstiftung der kantonalen Gebäudeversicherungen, Bern, 2006.
- 12 C.U. Brunner, U. Steinmann, M. Jakob. Adaptation of Commercial Buildings to Hotter Summer Climate in Europe. Proceedings of the Conference Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings (IEECB'06), 26 – 27 April 2006, Frankfurt, 2006.
- 13 O. Thommen Dombois & C. Braun-Fahrlander. Gesundheitliche Auswirkungen der Klimaänderung mit Relevanz für die Schweiz. Literaturstudie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und des Bundesamtes für Gesundheit (BAG), 2004.