VÖV UTP

Verband öffentlicher Verkehr
Union des transports publics
Unione dei trasporti pubblici

Adaptation au changement climatique

Guide relatif à l'adaptation de l'infrastructure ferroviaire au changement climatique




bls
2
bls

Table des matières

1 Synthèse 3

2 Situation initiale 5

3 Objectif et finalité 6

4 Résilience climatique et biens à protéger 7

5 Signaux climatiques 8

5.1 Messages-clés 8

5.2 Impact sur l'infrastructure ferroviaire 11

6 Processus d'adaptation et méthodologie 14

6.1 Analyse de la vulnérabilité 16

6.2 Analyse de l'exposition 21

6.3 Analyse de la criticité 23

6.4 Analyse des risques climatiques 24

7 Stratégie et mesures d'adaptation 26

8 Coûts de l'adaptation 30

9 Exemples de bonne pratique relatifs au processus d'adaptation 32

9.1 Exemple des postes d'enclenchement (SOB) 32

9.2 Exemple des compteurs d'essieux (CFF) 37

10 Annexe 41

10.1 Autres approches pour déterminer les futurs coûts des dommages 41

10.2 Informations sur le document 43

11 Liste des figures 44

12 Liste des tableaux 45

13 Sources 45



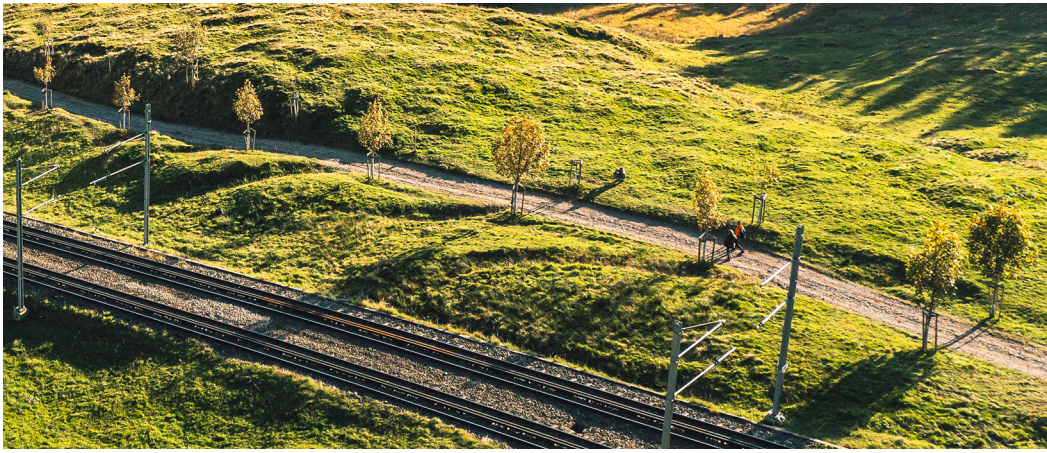
1 Synthèse

Le changement climatique progressif, qui se traduit par des périodes de sécheresse plus fréquentes, une augmentation des journées tropicales, des précipitations torrentielles plus intenses et des hivers moins enneigés, entraîne une usure plus rapide de l'infrastructure, une augmentation des dérangements, des pertes de productivité et des dommages aux installations des gestionnaires d'infrastructure. À terme, la multiplication des accidents, des interruptions, des pannes ou des retards dans l'exploitation ferroviaire risque de compromettre la sécurité, la disponibilité, la ponctualité et la satisfaction de la clientèle. Les installations doivent être remplacées plus tôt que prévu ou réparées plus fréquemment, tandis que les coûts d'entretien et les dépenses liées à la prévention et à la gestion des événements météorologiques extrêmes augmentent. Des chaînes d'actions permettent d'identifier les situations de dangers auxquelles les différentes installations peuvent être exposées. Le présent guide vise à aider la branche ferroviaire à relever les défis liés au changement climatique dans une démarche structurée et à définir des stratégies et des mesures d'adaptation appropriées. Il doit ainsi permettre aux gestionnaires d'infrastructure de s'adapter aux répercussions du changement climatique et de renforcer leur résilience face à l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes. Les mesures d'adaptation doivent contribuer à la défense des biens à protéger que sont la santé, les installations et l'exploitation ferroviaire.

Grâce au processus d'adaptation au changement climatique, les gestionnaires d'infrastructure sont amenés, de manière structurée et systématique, à identifier les risques climatiques qui les concernent. La première étape de l'évaluation des risques climatiques consiste à déterminer quelles installations sont vulnérables face aux évolutions des conditions climatiques. La deuxième étape consiste à analyser l'exposition des différentes installations. Par exemple, une gare située sur le Plateau suisse peut présenter une très forte exposition aux journées tropicales, tandis qu'une gare située à 1500 m d'altitude peut ne présenter aucune exposition à ce même signal climatique. Lors de la troisième étape, la criticité des installations vulnérables et exposées est évaluée. Celle-ci peut notamment être déterminée à partir du nombre de trains de voyageurs ou de marchandises supprimés en raison de dérangements ou de la défaillance d'une installation, du nombre de minutes de retard des voyageurs ou des trains, ou encore du nombre de clientes et clients concernés. Ainsi, un compteur d'essieux sur un tronçon fortement fréquenté peut présenter une criticité très élevée, tandis que le même compteur d'essieux installé sur un tronçon faiblement fréquenté peut ne présenter aucune criticité. Enfin, lors de la quatrième et dernière étape, les installations critiques sont soumises à une analyse des risques climatiques prenant en compte la probabilité d'occurrence et l'ampleur des dommages.

L'analyse des risques constitue une base essentielle pour la gestion de l'adaptation au changement climatique: elle alimente la stratégie d'adaptation. La stratégie d'adaptation fournit un cadre permettant de hiérarchiser les investissements et d'intégrer les mesures d'adaptation dans les processus de renouvellement, de maintenance et d'exploitation existants. L'objectif est d'utiliser aussi efficacement que possible les moyens financiers et les ressources disponibles. À cet effet, il convient de donner la priorité aux installations critiques, de tirer parti des cycles de renouvellement existants et d'envisager un large éventail de mesures. Les risques climatiques et les mesures d'adaptation doivent, dans la mesure du possible, être intégrés aux processus existants. Au lieu de procéder immédiatement à une refonte complète de la planification, une démarche d'adaptation progressive est définie. Cette approche permet d'optimiser le calendrier des investissements et d'éviter les mauvais investissements. Plus la criticité, le risque climatique et la durée d'utilisation restante sont élevés, plus les mesures d'adaptation doivent être complètes. Ces mesures peuvent notamment reposer sur des approches technologiques, fondées sur la nature, comportementales ou économiques.

Dans le présent guide, les coûts d'adaptation sont évalués en comparant les coûts d'une mesure et ses avantages, ceux-ci correspondant aux coûts des dommages évités. Les coûts associés aux dommages peuvent être estimés à partir d'événements concrets, en fonction des installations concernées, selon une approche ascendante (bottom-up) fondée sur des estimations d'experts, ou selon une approche descendante (top-down) reposant sur des études. Le guide est complété par deux exemples de bonne pratique concernant le processus d'adaptation. Celui-ci est présenté à travers l'installation des compteurs d'essieux dans le contexte des journées tropicales et à travers les postes d'enclenchement face à l'augmentation des fortes précipitations.



2 Situation initiale

Les scénarios climatiques du National Centre for Climate Services (NCCS) de la Confédération montrent une augmentation du nombre de journées tropicales, une hausse des températures, des précipitations plus intenses ainsi que des hivers moins enneigés. Les inondations, les glissements de terrain, les coulées de boue et les laves torrentielles ne se produisent pas seulement avec une intensité et une fréquence accrues, mais également dans des lieux jusqu'ici épargnés. En hiver, on observe en outre une augmentation des avalanches de neige mouillée et des avalanches de glissement. En raison de la hausse des températures, le pergélisol fond également, ce qui rend les pentes instables. La hausse des températures et des vagues de chaleur toujours plus fréquentes et plus intenses engendrent d'autres risques, notamment des atteintes à la santé du personnel exposé à la chaleur, des dommages aux installations de voies dus à des déjettements ainsi que des dérangements et des pannes au niveau des composants électroniques.

La probabilité que les gestionnaires d'infrastructure (GI) soient davantage exposés aux dérangements, aux pertes de productivité et aux dommages aux infrastructures, au matériel roulant et aux bâtiments augmente. Le risque d'incendies de forêt et de talus s'accroît également. Ces événements peuvent entraîner des accidents, des interruptions, des pannes ou des retards dans l'exploitation ferroviaire et ainsi compromettre la sécurité, la disponibilité, la ponctualité et la satisfaction de la clientèle. À long terme, cela signifie que les installations doivent être remplacées plus tôt que prévu ou réparées plus fréquemment[1], tandis que les coûts d'entretien et les dépenses liées à la prévention et à la gestion des événements météorologiques extrêmes s'inscrivent en hausse. Avec le changement climatique, les contraintes et les risques pour la santé de la clientèle et du personnel augmentent également. Les trains dépourvus de climatisation ou dont le système de climatisation est défectueux et les gares exposées au soleil représentent un risque croissant pour la santé. Les journées et les nuits tropicales entraînent une baisse de la productivité au travail. Lors des vagues de chaleur extrêmes, le risque d'interruption des travaux, notamment sur les chantiers, et le risque d'accidents dans le cadre professionnel et des activités de loisirs se renforcent également.

L'article 8 de la loi fédérale sur les objectifs en matière de protection du climat, sur l'innovation et sur le renforcement de la sécurité énergétique (LCI) exige de la Confédération qu'elle veille, dans le cadre de ses compétences, à ce que les mesures nécessaires à l'adaptation et à la protection face aux effets des changements climatiques soient prises. Par conséquent, les entreprises de transport sont tenues de mettre en œuvre les mesures d'adaptation nécessaires dans le cadre des prestations commandées par la Confédération. Ce thème intersectoriel a été traité et suivi au sein du groupe de travail KIS «Adaptation au changement climatique», sous la direction de la KIS.[2] Le groupe de travail, codirigé par le BLS et les CFF, réunissait des personnes représentantes du BLS, de Matterhorn Gotthard Infrastruktur, de la Schweizerische Südostbahn, de BERNMOBIL et des CFF.

[1] Les normes de produits existantes ne sont pas conçues pour faire face aux conditions climatiques actuelles et futures, ce qui peut entraîner davantage de dérangements, d'interruptions d'exploitation et des coûts d'entretien plus élevés (p. ex. en raison d'infiltrations d'eaux de surface dans les locaux techniques ou de glissements de talus sur les installations de voies).

[2] Le 23 août 2024, le STASS «Système ferroviaire» a décidé de rattacher le groupe de travail à la KIS. L'accent est ainsi mis sur le domaine de l'infrastructure, à l'exception de la zone de trafic (matériel roulant).

3 Objectif et finalité

Le présent guide s'adresse en premier lieu aux personnes chargées de la gestion des installations et de la technologie, aux responsables de l'entretien ainsi qu'aux concepteurs de projets d'installations d'infrastructure ferroviaire. Il porte sur l'ensemble des installations de l'infrastructure, la zone de trafic – notamment le matériel roulant – étant explicitement exclue. L'objectif de ce rapport est de fournir aux acteurs concernés de la branche un guide pratique servant d'orientation.

Le guide accompagne la branche dans la prise en compte ciblée des défis liés au changement climatique ainsi que dans l'élaboration et la mise en œuvre de mesures d'adaptation appropriées pour l'infrastructure ferroviaire. Il sert de cadre de référence permettant aux exploitants d'infrastructures ferroviaires d'identifier et d'évaluer les risques liés au changement climatique et de prendre des mesures proactives pour y faire face. Le rapport favorise en outre l'échange de connaissances et la collaboration entre les domaines spécialisés et les entreprises concernés en vue de garantir à long terme la résilience et la sécurité d'exploitation de l'infrastructure.

La méthodologie d'adaptation au changement climatique présentée ici doit être comprise comme une approche systématique visant spécifiquement à renforcer la résilience et à préserver le bon fonctionnement de l'infrastructure ferroviaire face aux effets du changement climatique. Le réchauffement climatique a un impact particulièrement important sur les processus liés aux dangers naturels, tant gravitaires (avalanches, laves torrentielles, etc.) que météorologiques (fortes précipitations, tempêtes, etc.). Les effets de ces processus varient fortement en fonction de l'exposition du réseau ferroviaire. Le guide en tient compte dans les différentes étapes de travail, sans toutefois remplacer l'analyse détaillée réalisée dans le cadre de la gestion intégrale des risques (www.planat.ch/fr/strategie/gestion-integree-des-risques).

4 Résilience climatique et biens à protéger

L'objectif des gestionnaires d'infrastructure doit être de renforcer la résilience face au changement climatique, de sorte que les conséquences sur la sécurité, la ponctualité, la disponibilité, la rentabilité, la performance et la santé du personnel et de la clientèle restent maîtrisables et acceptables.

La résilience climatique désigne la capacité à s'adapter aux effets du changement climatique et à résister aux phénomènes météorologiques extrêmes de plus en plus fréquents. Les mesures visant à renforcer la résilience ont pour objectif de prévenir et de gérer les effets de la chaleur, des fortes précipitations et d'autres événements liés au changement climatique. Elles doivent ainsi permettre de réduire au minimum les répercussions négatives des phénomènes météorologiques extrêmes, notamment sur la sécurité, la disponibilité et la ponctualité.

Les mesures se concentrent sur les biens à protéger suivants:

- **Protection de la santé:** mesures visant à protéger la vie et la santé, en particulier contre les dangers liés au travail. L'accent est mis sur le personnel et les utilisateurs du chemin de fer. Le but est d'identifier et d'éliminer les risques sanitaires liés au changement climatique.
- **Protection des installations:** toutes les mesures visant à limiter au maximum les dommages causés aux infrastructures par les futurs changements climatiques à court, moyen ou long terme.
- **Protection de l'exploitation:** toutes les mesures visant à réduire au minimum les restrictions potentielles et les baisses de disponibilité du trafic ferroviaire.

5 Signaux climatiques

L'étape la plus importante du processus d'adaptation au changement climatique consiste à rendre les nouvelles conditions-cadres climatiques compréhensibles. Il existe désormais à ce sujet de nombreux rapports, études de base et données de la Confédération, qui sont par ailleurs mis à disposition par le National Centre for Climate Services (NCCS) (www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home.html).
Les principaux signaux climatiques[3] sont présentés ci-après dans les grandes lignes (voir également les scénarios climatiques «Climat CH2025» de la Confédération)[4]. En 2025, la moyenne climatique en Suisse se situait déjà 2,9 °C au-dessus de la moyenne préindustrielle (1871 à 1900). Sur la base d'estimations antérieures et de l'évolution climatique effectivement observée par la suite, les scénarios climatiques de Climat CH2025 prévoient d'autres changements climatiques significatifs en toutes saisons et dans toutes les régions de Suisse. Depuis l'ère préindustrielle, la Suisse a connu un réchauffement 2 à 2,2 fois supérieur à la moyenne mondiale enregistrée jusqu'à présent.

5.1 Messages-clés



Figure 1: message-clé du NCCS

Source: scénarios climatiques nationaux du NCCS (2025)

Message-clé 1: «La Suisse est fortement touchée»
Avec sa topographie complexe, la Suisse compte parmi les régions particulièrement touchées par le réchauffement climatique. En plus d'une hausse des températures supérieure à la moyenne, les événements extrêmes tels que les fortes précipitations, les vagues de chaleur et les périodes de sécheresse ont également augmenté. La couverture neigeuse et les glaciers ont également diminué de manière significative.

[3] Le signal climatique décrit l'influence déjà existante et les changements climatiques attendus. Dans l'analyse des risques climatiques, on parle de «signal climatique» et non de «danger» afin que la terminologie puisse également s'appliquer aux opportunités induites par le changement climatique. Plus le signal climatique est fort, plus le risque climatique ou l'opportunité liée au changement climatique est élevée. (OFEV, 2025)

[4] www.meteosuisse.admin.ch/climat/changement-climatique/les-scenarios-climatiques-suisses.html

Les scénarios climatiques montrent que les changements observés jusqu'à présent se poursuivront à l'avenir et que la Suisse continuera à se réchauffer plus fortement que la moyenne mondiale. Les scénarios climatiques montrent l'avenir possible du climat suisse pour différents niveaux de réchauffement global. Ils indiquent l'état du climat qui prévaudra en Suisse dès que la température moyenne mondiale aura augmenté de 1,5 °C, 2 °C ou 3 °C par rapport au niveau préindustriel de 1871-1900. Compte tenu des émissions mondiales de gaz à effet de serre enregistrées jusqu'à présent et actuellement, un réchauffement de 1,5 degré est inévitable et devrait être atteint dans les 5 à 15 prochaines années. Un monde à 2 degrés serait atteint en 2050 avec les mesures actuelles et prévues et vers 2040 si l'on continue en suivant la voie fossile sans protection du climat. Un monde à 3 degrés serait atteint vers 2065 avec le scénario fossile sans protection du climat. Avec les mesures actuellement prévues pour réduire les émissions globales, le monde se dirige vers une augmentation d'environ 3 °C d'ici la fin du siècle.

Message-clé 2: «Chaleur plus extrême»
Le réchauffement climatique en Suisse s'accompagne d'une augmentation des épisodes de chaleur extrême et de nouveaux records de chaleur. Des températures autrefois très rares et extrêmes sont aujourd'hui beaucoup plus fréquentes. Les journées tropicales, où la température atteint au moins 30 °C, sont elles aussi nettement plus fréquentes aujourd'hui. Les nuits tropicales, pendant lesquelles la température ne descend pas en dessous de 20 °C, sont également en augmentation. Le stress thermique est particulièrement intense dans les zones urbaines, car l'effet d'îlot de chaleur y réduit encore davantage le refroidissement nocturne. Cet effet joue un rôle central dans l'augmentation du risque de chaleur extrême dans les zones urbaines. À l'avenir, la Suisse devra s'attendre à des épisodes de chaleur nettement plus fréquents et plus intenses. À l'inverse, une forte diminution du nombre de journées de gel/sans dégel est prévue dans toutes les régions.

Message-clé 3: «Étés plus secs»
Des sols plus secs en raison de températures plus élevées, de l'augmentation de l'évaporation et de la diminution des précipitations estivales accentuent le risque d'incendies de forêt. La sécheresse freine le développement des forêts, réduit la disponibilité en eau des lacs et peut limiter l'approvisionnement en eau. Elle peut également renforcer et prolonger les vagues de chaleur. Les variations des précipitations annuelles totales sont faibles. Les variations moyennes des précipitations par rapport à la période de référence sont de -16 % en été et de +14 % en hiver. Des variations particulièrement importantes sont pronostiquées pour le versant sud des Alpes en été et en hiver.

Message-clé 4: «Fortes précipitations plus fréquentes et plus intenses»
L'intensité croissante des fortes précipitations s'explique en grande partie par l'augmentation de la température de l'air (chaque degré de réchauffement permet à l'air d'absorber 6 à 7 % d'eau en plus). Les fortes précipitations peuvent donc être d'autant plus intenses si le réchauffement se poursuit. Avec la poursuite de la hausse des températures, l'intensité et la fréquence des épisodes de fortes précipitations continueront d'augmenter à l'avenir, quelle que soit la saison. Plus la durée des précipitations est courte, plus leur intensité augmente. Pour les précipitations d'une durée d'une heure, on prévoit une augmentation de l'intensité pouvant atteindre 30 %. En été, l'intensité accrue de certains épisodes pluvieux peut entraîner une augmentation des orages accompagnés de grêle. Toutefois, des précipitations plus intenses n'excluent pas une diminution simultanée de la quantité totale de précipitations: il pleut moins souvent mais, lors d'événements isolés, les précipitations sont plus importantes et plus concentrées dans le temps. Les fortes précipitations peuvent causer des dégâts importants, notamment des inondations ou des glissements de terrain. Les crues soudaines et les orages de grêle peuvent également causer des dégâts et perturber les activités quotidiennes. La sécurité des personnes peut aussi être mise en jeu.

Message-clé 5: «Moins de neige»
Le nombre de jours de neige diminue à toutes les altitudes. Les précipitations se produisent davantage sous forme de pluie que de neige, même à relativement haute altitude. En conséquence, la couverture neigeuse diminue globalement et la fonte de la neige et de la glace est favorisée. Cette évolution va encore s'accentuer à l'avenir. Avec la poursuite du réchauffement, l'isotherme du zéro degré en hiver s'élèvera encore de 550 m supplémentaires dans un monde à 3 degrés. En été également, l'isotherme du zéro degré s'élèvera considérablement et favorisera la fonte de la neige et de la glace, même sur les plus hauts sommets alpins. Le dégel du pergélisol et la fonte des glaciers rendent les pentes instables.

Les conclusions concernant les variations possibles de la vitesse du vent et du rayonnement restent encore entachées d'une grande incertitude.

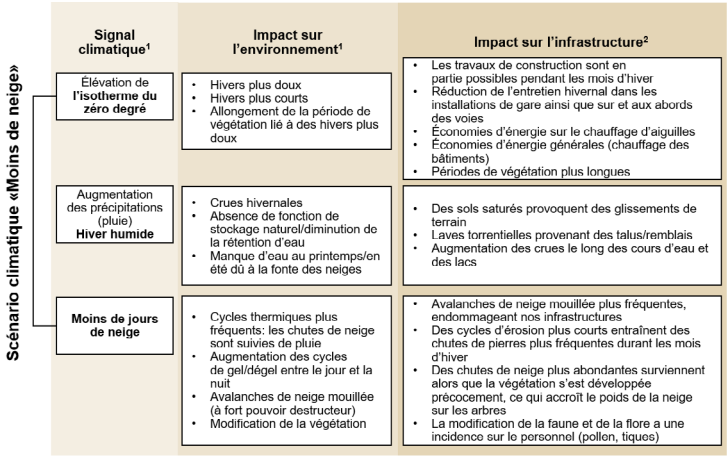
Source des messages-clé: scénarios climatiques nationaux du NCCS (2025)

5.2 Impact sur l'infrastructure ferroviaire

Les signaux climatiques peuvent avoir des effets variés sur l'infrastructure ferroviaire. À l'aide d'une chaîne d'action, il est possible de déterminer de manière systématique quelles sont les installations potentiellement concernées et sous quelle forme des dangers ou des changements peuvent se manifester. Les chaînes d'actions décrivent ainsi les situations de dangers possibles pouvant être déduites des signaux climatiques projetés. Elles permettent de montrer de manière compréhensible comment les changements climatiques influent sur l'infrastructure et quels sont les domaines particulièrement vulnérables face aux évolutions futures.

Outre les risques potentiels, les changements climatiques peuvent également être porteurs d'opportunités. Ainsi, l'évolution des conditions-cadres peut ouvrir de nouvelles possibilités en matière de planification, d'exploitation et de développement de l'infrastructure ferroviaire. L'analyse des chaînes d'actions ne sert donc pas uniquement à identifier les dangers, mais contribue également à détecter suffisamment tôt les futurs potentiels et les possibilités d'adaptation.

Les effets sur l'infrastructure peuvent varier selon le gestionnaire d'infrastructure. Cela dépend notamment des spécificités régionales, de l'exposition climatique ainsi que des normes d'installations et des méthodes de construction utilisées. Par conséquent, des signaux climatiques identiques peuvent entraîner des effets et des situations de dangers différents selon les régions ou les exécutions techniques.



1) Les signaux climatiques et leurs impacts sur l'environnement sont harmonisés avec la branche.
2) Liste non exhaustive des impacts potentiels sur notre infrastructure.

Figure 2: chaîne d'action «Moins de neige»

Source: BLS (2025)

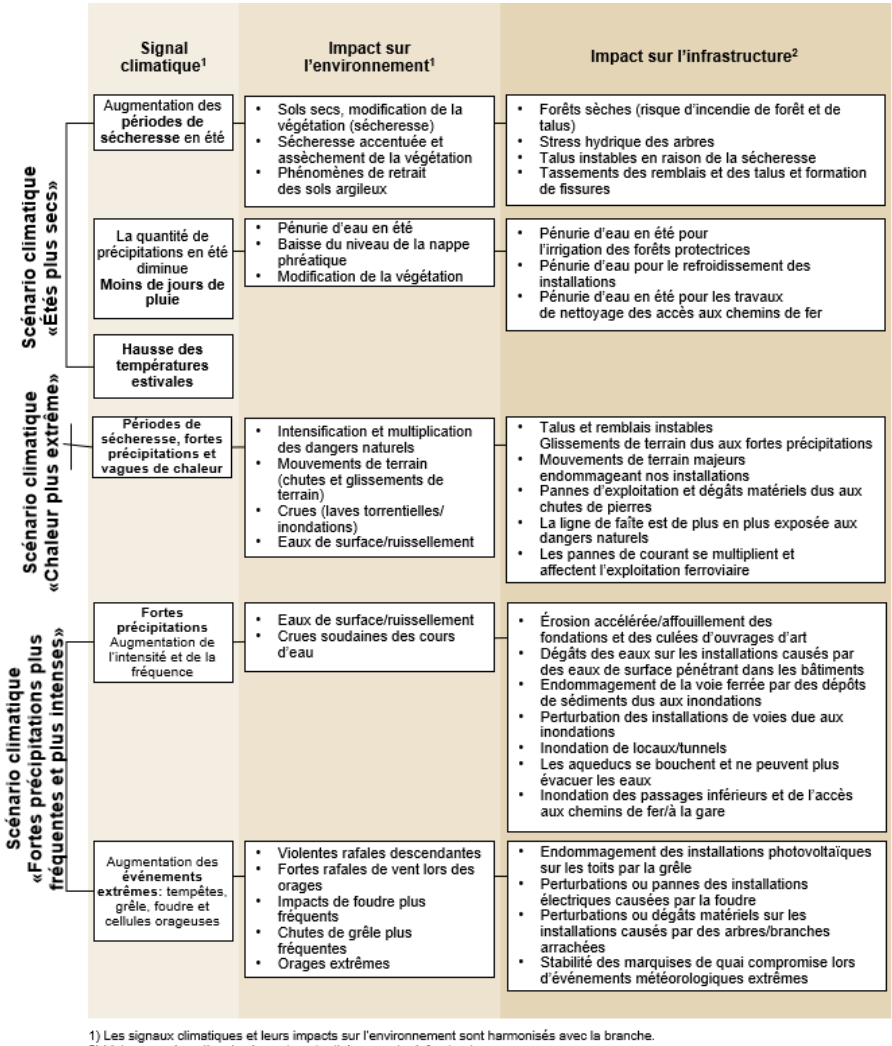


Figure 3: chaînes d'actions «Étés plus secs», «Chaleur plus extrême» et «Fortes précipitations plus fréquentes et plus intenses»

Source: BLS (2025)

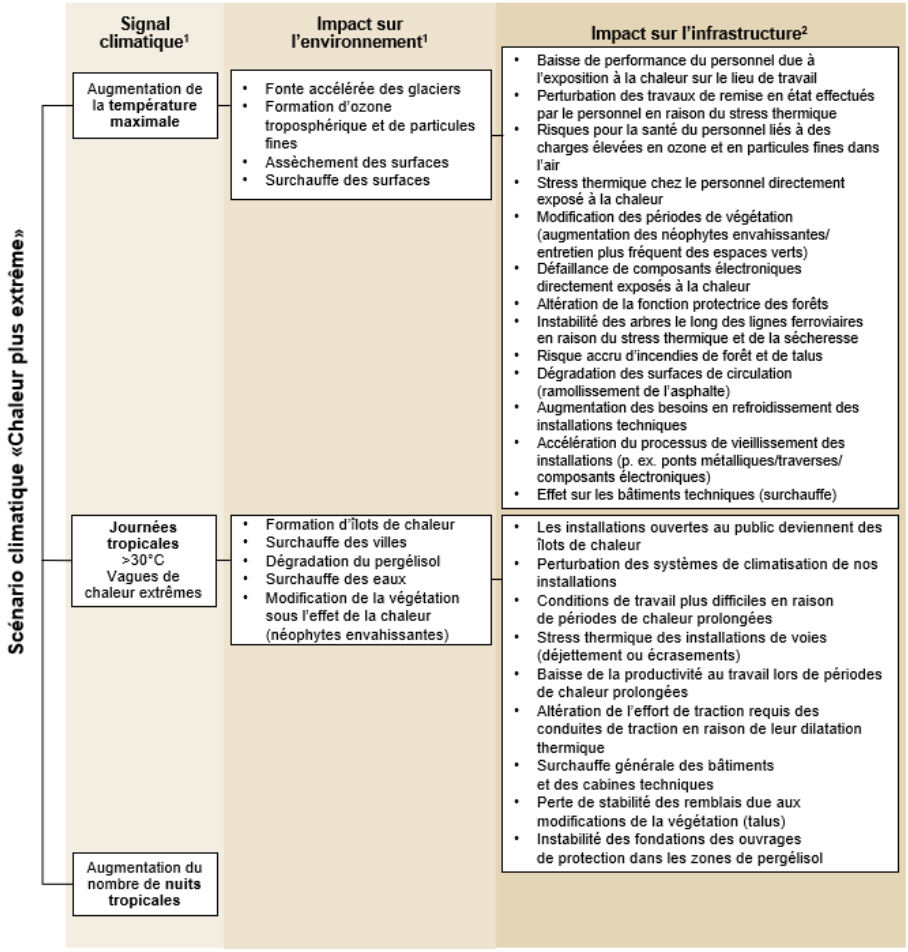


Figure 4: chaîne d'action «Chaleur plus extrême»

Source: BLS (2025)

6 Processus d'adaptation et méthodologie

La méthodologie présentée ici vise à analyser de manière structurée les défis du changement climatique pour l'infrastructure ferroviaire, l'objectif étant d'identifier et d'évaluer les risques pertinents et d'en déduire des mesures d'adaptation ciblées et efficaces.

Le présent guide décrit une démarche systématique garantissant une analyse exhaustive. Il n'est toutefois pas indispensable de suivre à la lettre toutes les étapes de travail décrites. La démarche peut être adaptée et simplifiée en fonction des besoins. Dans la pratique, cela signifie que certaines étapes peuvent être omises ou qu'une analyse plus détaillée peut être réalisée pour les installations critiques et les éléments d'infrastructure particulièrement exposés, tandis qu'une approche simplifiée peut suffire pour les domaines moins exposés. Une approche itérative s'avérera judicieuse, car il n'est pas possible de traiter tous les domaines ou genres d'installations de l'infrastructure de manière suffisamment approfondie.

Le processus prévoit que les résultats soient régulièrement vérifiés, adaptés et complétés, notamment en fonction de l'évolution des connaissances sur les risques climatiques et de l'apparition de nouvelles mesures innovantes.

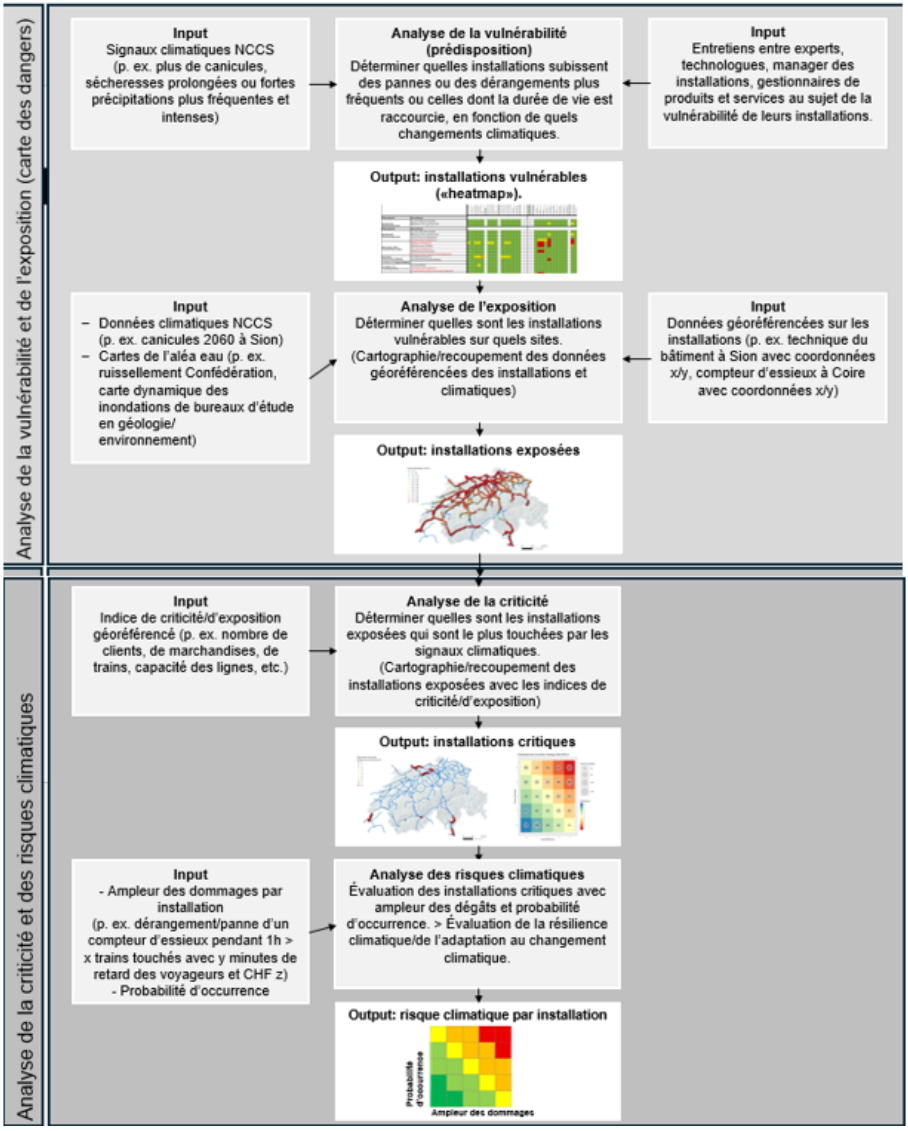


Figure 5: processus d'adaptation

Source: groupe de travail Adaptation au changement climatique (2025)

6.1 Analyse de la vulnérabilité

Afin de déterminer le risque climatique auquel sont exposées les installations, il convient tout d'abord d'examiner quels genres et types d'installations sont particulièrement vulnérables (prédisposition) face aux changements climatiques. Il importe à cet effet de réaliser cette analyse sur la base des signaux climatiques (voir chapitre 5). Ainsi, alors que les composants électroniques des installations de sécurité sont sensibles aux températures élevées, les cabines techniques situées au sous-sol ou au rez-de-chaussée présentent une vulnérabilité aux infiltrations d'eau.

Input: structure des installations et signaux climatiques

Dans un tableau Excel, la structure des installations selon la réglementation R RTE 29900 est saisie horizontalement:
– Bâtiments nécessaires à l'exploitation
– Voies
– Installations d'enclenchement et de contrôle de la marche des trains
– Etc.

Les signaux climatiques sont complétés verticalement:

1. Chaleur plus extrême: hausse des températures maximales journalières et nocturnes, augmentation du nombre de journées et de nuits tropicales, épisodes de chaleur extrême en milieu urbain, augmentation du nombre de journées extrêmement chaudes, température du jour le plus chaud de l'année nettement plus élevée.

2. Étés plus secs: augmentation significative du nombre de jours présentant un risque élevé d'incendies de forêt, assèchement plus rapide des sols, diminution des précipitations estivales, intensification et prolongation des vagues de chaleur, pénuries d'eau, approvisionnement en eau limité.

3. Fortes précipitations plus fréquentes et plus intenses: augmentation de l'intensité et de la fréquence des épisodes de fortes précipitations en toutes saisons, augmentation des précipitations journalières maximales, hausse de l'intensité principalement lors des épisodes de précipitations d'une durée d'une heure, multiplication des orages accompagnés de grêle et dégâts causés par les inondations, les glissements de terrain ou les crues soudaines. L'élévation de la limite des chutes de neige, en particulier en hiver, augmente la part des précipitations sous forme de pluie et accroît en outre le débit des cours d'eau.

4. Moins de neige: moins de jours de neige à toutes les altitudes, davantage de précipitations hivernales sous forme de pluie, diminution de la proportion de neige

dans les précipitations hivernales, hausse de l'isotherme du zéro degré en hiver et en été, fonte des neiges plus précoce, augmentation des eaux de fonte pendant le semestre hivernal et diminution pendant le semestre estival. Le dégel du pergélisol et la fonte des glaciers rendent les pentes instables.

Une évaluation des effets des signaux climatiques sur les différentes installations est ensuite réalisée en collaboration avec des experts en installations (p. ex. technologues, gestionnaires de produits, gestionnaires du cycle de vie et du portefeuille et gestionnaires des dérangements):

Niveaux d'impact possibles:

– «Aucun impact» (vert ou -1 à +1)
– «Faible impact» (jaune ou -2 à +2)
– «Impact moyen» (orange ou -3 à +3)
– «Fort impact» (rouge ou -4 à +4)

Output: installations vulnérables («heatmap»)

Le résultat de cette évaluation est une «heatmap». Celle-ci fournit des premières indications concernant les installations auxquelles il convient de s'intéresser en priorité au regard des risques climatiques.



Figure 6: exemple de heatmap

Source: MGB (2025)

L'évaluation des gestionnaires d'infrastructure tels que **la MGB, la SOB, BERNMOBIL, le BLS et les CFF** met en évidence les **vulnérabilités des installations face aux signaux climatiques ci-après**:

1. Chaleur plus extrême (voir Climat CH2025):

L'augmentation des épisodes de chaleur extrême a des répercussions tangibles sur les composants électroniques directement exposés à des températures élevées. Les accumulations locales de chaleur entraînent la formation d'îlots de chaleur, ce qui peut à la fois nuire au confort de la clientèle dans les gares et compromettre la sécurité de l'infrastructure. Le risque de déjettements de voie augmente sensiblement, notamment pour les installations de voies. La chaleur accélère en outre le dégel du pergélisol, ce qui peut entraîner une instabilité des roches et, par conséquent, compromettre la stabilité des fondations – un risque qui tend à augmenter, notamment dans les régions montagneuses. Les températures élevées ont également un effet négatif sur la productivité du personnel travaillant à l'extérieur ou dans des espaces fortement exposés à la chaleur.

La hausse des températures maximales ainsi que l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de chaleur extrême ont un **impact moyen à très élevé** sur les installations suivantes notamment:

- **Bâtiments et terrains** (en particulier les bâtiments nécessaires et non nécessaires à l'exploitation)
- **Ouvrages d'art** (en particulier les forêts de protection et bandes de sécurité, les systèmes d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux et les ouvrages en terre)
- **Voie ferrée** (en particulier les voies, les aiguilles et les passages à niveau)
- Installations de courant de traction (en particulier les installations de lignes de contact)
- **Installations de sécurité** (en particulier les installations d'enclenchement et de contrôle de la marche des trains, la technique de conduite, les installations de contrôle des trains, les systèmes d'avertissement, les installations autonomes de passage à niveau)
- **Installations à basse tension et de télécommunication** (en particulier les consommateurs à basse tension, les systèmes de données et de communication)
- **Installations ouvertes au public** (quais et accès aux quais, espaces publics)

2. Étés plus secs (voir Climat CH2025):

Les périodes de sécheresse prolongées entraînent une diminution de l'humidité des sols, ce qui peut compromettre la stabilité des talus et de l'infrastructure des voies. La végétation le long des lignes ferroviaires se dessèche, ce qui augmente le risque d'incendies de surface et peut compromettre la sécurité et la disponibilité de l'infrastructure. De plus, la pénurie d'eau et l'assèchement des cours d'eau peuvent avoir des effets négatifs sur le refroidissement des installations techniques et le nettoyage des véhicules.

Les étés plus secs ont un **impact moyen à très élevé** sur les installations suivantes notamment:

– **Ouvrages d'art** (en particulier les systèmes d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux, les forêts de protection et les bandes de sécurité)
– **Bâtiments et terrains**

3. Fortes précipitations plus fréquentes et plus intenses (voir Climat CH2025):

Des précipitations d'une intensité exceptionnelle entraînent une surcharge rapide des systèmes d'évacuation des eaux le long des lignes ferroviaires. Cela accroît le risque d'inondation et d'érosion, ce qui peut compromettre la stabilité des talus et de l'infrastructure des voies. Les fortes précipitations favorisent en outre la formation de laves torrentielles et de glissements de terrain, ce qui peut entraîner des interruptions temporaires de ligne et nécessiter d'importants travaux de réparation. Les fortes précipitations plus fréquentes et plus intenses ont un **impact moyen à très élevé** sur les installations suivantes notamment:

– **Bâtiments et terrains** (bâtiments/terrains nécessaires et non nécessaires à l'exploitation)
– **Ouvrages d'art** (ponts, tunnels, aqueducs, ouvrages de soutènement, galeries, murs de protection, ouvrages de protection, systèmes d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux, ouvrages en terre, forêts de protection et bandes de sécurité)
– **Voie ferrée** (voies, aiguilles, infrastructure et passages à niveau)
– **Installations ouvertes au public** (quais et accès aux quais, espaces publics, accès au trafic marchandises)
– **Installations de sécurité** (notamment les installations d'enclenchement et de contrôle de la marche des trains)
– **Installations à basse tension et de télécommunication** (consommateurs à basse tension, systèmes de données et de communication)

4. Moins de neige (voir Climat CH2025):

La diminution des quantités de neige entraîne des effets variables sur les infrastructures ferroviaires en fonction de l'altitude. À basse altitude, une faible quantité de neige permet en principe une meilleure accessibilité et une plus grande stabilité de l'exploitation en hiver, étant donné que les contraintes liées au déneigement et au risque d'avalanches diminuent. En parallèle, une couverture neigeuse moins importante peut entraîner une moins bonne isolation du sol, ce qui peut accroître le risque de gel profond dans le sous-sol et, par conséquent, des dommages au niveau de l'infrastructure. À plus haute altitude, la disparition de la couverture neigeuse isolante peut accélérer les processus d'érosion et le dégel du pergélisol. En outre, en l'absence de fonte des neiges au printemps, le risque de pénurie d'eau augmente, ce qui peut avoir des effets négatifs sur la végétation et donc sur la stabilisation des talus.

L'élévation de l'isotherme du zéro degré et l'augmentation des précipitations hivernales ont un **impact moyen à très élevé** sur les installations suivantes notamment:

– **Ouvrages d'art** (ponts, ouvrages de soutènement, ouvrages de protection, forêts de protection et bandes de sécurité, systèmes d'approvisionnement en eau et d'évacuation des eaux, galeries, murs de protection, ouvrages en terre).

Enchaînement des signaux climatiques: précipitations/sécheresse/chaleur
En raison de l'enchaînement des signaux climatiques, nos installations seront davantage exposées aux dangers naturels. L'association de fortes chaleurs et de précipitations intenses favorise les laves torrentielles et les mouvements de terrain majeurs dans les régions alpines. La sécheresse combinée à de fortes précipitations libère des eaux de surface susceptibles de surcharger les systèmes d'évacuation existants. Cela peut provoquer l'inondation de bâtiments et de passages inférieurs, mais également entraîner l'écoulement des eaux sur les installations de voies. Sous l'effet des changements climatiques, la roche se fragilise, entraînant une augmentation de la fréquence des chutes de pierres tout au long de l'année. Les talus sont également exposés à ce risque, les fortes précipitations pouvant entraîner leur saturation en eau et, par conséquent, les rendre instables.

6.2 Analyse de l'exposition

L'exposition d'une installation aux effets du changement climatique dépend de sa localisation géographique. Ainsi, un pont situé sur le Plateau suisse peut ne pas être exposé à une augmentation des précipitations intenses, alors qu'un pont situé dans les Alpes peut être fortement, voire très fortement exposé. L'analyse de l'exposition porte donc principalement sur la représentation et la cartographie des installations exposées. Elle consiste à croiser les données climatiques (p. ex. les précipitations annuelles en mm à l'horizon 2060 ou le nombre de journées tropicales en 2085) avec les données relatives aux installations selon la réglementation R RTE 29900 (p. ex. «quais et accès au quais»).

Input: indicateurs climatiques et données relatives aux installations

Indicateurs climatiques:

- Les **scénarios climatiques Climat CH2025 de la Confédération** pour la Suisse servent de base aux données climatiques futures. Ils comprennent des valeurs journalières sur une grille haute résolution de 1 km ainsi que les emplacements des stations météorologiques actuelles du réseau SwissMetNet de MétéoSuisse. Sur la base de ces données, des bureaux spécialisés en sciences de l'environnement et en géosciences (p. ex. geo7 ou Meteotest) calculent, au moyen d'une interpolation géostatistique, un jeu de données sous forme de grille à haute résolution couvrant l'ensemble de la Suisse. Il est ainsi possible de représenter, par exemple, le nombre de journées tropicales ou les précipitations en mm avec une **résolution locale de 250 m**.
- Concernant l'évolution future du climat, il convient de considérer le scénario climatique d'un **monde à 3 degrés**.[5] Pour les trois niveaux de réchauffement global (Global Warming Levels, GWL) de 1,5 °C, 2 °C et 3 °C, il existe pour la Suisse des simulations portant sur une période de 30 ans (2040, 2050, 2060) sur une base journalière, tant pour les températures que pour les précipitations.

Données relatives aux installations:

- L'ensemble des données relatives aux installations peut être utilisé comme donnée d'entrée. Il est important que ces données soient géoréférencées, c'est-à-dire qu'elles soient associées à des coordonnées x/y.

[5] Hausse de la température globale moyenne de 3 °C par rapport à la période préindustrielle. Dans un monde à 3 degrés, le réchauffement moyen en Suisse sera de 4,9 °C par rapport à la période préindustrielle. Avec les mesures actuellement prévues pour réduire les émissions globales, le monde se dirige vers une augmentation d'environ 3 °C d'ici la fin du siècle.

Campus	Gebäude	LV95_E	LV95_N	Etage	Anz. Schränke im Raum
Mühlehorn SBB	MH_TK01, TC-Kabine	2731735.127	1221303.83	EG	5
Lyss	Lyss, BTG	2589899.836	1214539.889	EG	1
Russin	Russin, CE03 Cab.TC	2490277.061	1116112.244	Rez	9
Heerbrugg SBB	Heerbrugg, Aufnahmegebäude	2765302.702	1253507.303	1.UG	5
St. Gallen	St. Gallen, Aufnahmegebäude	2746078.535	1254649.355	1.UG	10
Lungern	Käppeli, DS km37.776	2654919.651	1180620.304	floor	1
Kempten	Kempten, Güterschuppen	2703699.358	1243678.054	floor	6
Moreillon	Moreillon, AV01 Abri	2554309.934	1155207.231	Rez	6
Bellinzona	Bellinzona, Officine IW;WK	2724394.912	1119172.398	floor	1
Rümlang	Rümlang, Aufnahmegebäude	2682913.362	1256889.817	1.UG	25

Figure 7: exemple de données d'installations structurées et géoréférencées

Source: CFF (2024)

Output: installations exposées

– L'analyse de l'exposition met en évidence les installations qui, à des emplacements spécifiques et pour une année donnée, sont exposées à certains indicateurs climatiques (p. ex. journées tropicales ou précipitations).

location	name	x	y	hd_2010	hd_2060	hd_2085
CHI	Chiasso	723771.763	76869.762	17	49	79
STAF	Stabio	716935.273	78685.209	17	50	79
BAL	Balerna	721687.132	78448.626	16	48	78
GDA	Gordola	710197.594	115176.397	16	49	77
MEN	Mendrisio	719585.752	80893.637	15	47	77
ARD	Ardon	587057.242	117474.043	16	50	76
CHF	Châteauneuf-Conthey	589694.744	118304.302	16	50	76
TUI	Les Tuileries	500418.771	122878.284	16	49	75
CHY	Chambésy	500399.7227	121877.809	16	49	74
COI	Vernier	496241.851	119699.001	15	48	74
...	...	...	...	...	...	...
HGV	Les Hauts-Geneveys	557145.39	210837.564	1	9	23
RE	Renan BE	561055.927	219542.875	1	9	22
COL	Le Locle-Col-des-Roches	545856.262	211230.781	0	8	21
LOC	Le Locle	547390.022	212103.713	1	9	21
CFO	La Chaux-de-Fonds Les Forges	552481.5509	215782.4262	0	8	20
CRET	Le Crêt-du-Locle	550327.458	214232.145	0	8	20
CF	La Chaux-de-Fonds	553490.0687	216557.0295	0	7	19
AI	Airolo	689765.163	153582.904	0	6	18
PT	Le Pont	514758.765	169210.9	0	5	16
GOE	Göschenen	688019.933	168931.801	0	4	14

Figure 8: gares exposées (p. ex. Chiasso) et gares peu exposées (Göschenen) face à l'augmentation des journées tropicales (heat days [hd]) pour la période de référence (2010) et pour les années 2060/2085

Source: CFF (2024)

6.3 Analyse de la criticité

Input: criticité (pertinence)

Criticité:

– Différents indicateurs peuvent être utilisés pour évaluer la criticité/pertinence des installations exposées pour le système ferroviaire, par exemple le nombre de trains de voyageurs ou de marchandises supprimés en raison d'un dérangement ou de la défaillance d'une installation, le nombre de minutes de retard des voyageurs ou des trains, ou encore le nombre de clientes et clients concernés.
– La criticité peut être répartie en différentes classes. Ainsi, la classe «ampleur des dommages très élevée» regroupe les installations dont un dérangement ou une défaillance affecterait, par exemple, un très grand nombre de trains ou générerait un nombre élevé de minutes de retard pour les voyageurs. À l'inverse, la classe «ampleur des dommages très faible» regroupe les installations dont le dérangement ou la défaillance n'a pratiquement pas d'impact.
– La combinaison de l'exposition et de la criticité dans une matrice permet d'identifier les installations qui, à l'avenir, seront à la fois les plus exposées à un danger climatique spécifique (exposition) et dont la défaillance aura les conséquences les plus importantes pour le système ferroviaire (criticité).

Output: installations critiques

– L'analyse de la criticité permet d'identifier les installations pour lesquelles une analyse des risques climatiques devrait être réalisée.
– Matrice de criticité présentant l'exposition (p. ex. quantité de précipitations en mm ou nombre de journées tropicales) et la criticité (p. ex. nombre de trains supprimés ou nombre de clientes et clients concernés) sur deux axes.

6.4 Analyse des risques climatiques

Une fois la vulnérabilité (prédisposition), la répartition géographique (exposition) et l'importance des infrastructures pour le système ferroviaire (criticité) déterminées, il convient d'identifier les risques climatiques. L'analyse des risques constitue la base de la gestion de l'adaptation face au changement climatique. Elle contribue à optimiser la prise de décision et permet de générer le meilleur bénéfice possible avec les ressources disponibles. Cela garantit une mise en œuvre crédible de l'obligation de diligence. L'analyse des risques permet de caractériser et de quantifier ces derniers de manière aussi objective que possible.

Input: probabilité d'occurrence et conséquence

Risque = probabilité d'occurrence × conséquence

Probabilité/fréquence d'occurrence: la probabilité peut être estimée selon une approche
- qualitative, p. ex. à l'aide des attributs basse/moyenne/élevée ou rare/occasionnelle/régulière, ou
- quantitative, p. ex. au moyen de probabilités d'occurrence telles que une fois tous les 100 ans, une fois tous les 50 ans, une fois tous les deux ans, chaque année, ou 1 %, 2 %, 10 %, 50 %.

Conséquence (ampleur des dommages): les conséquences peuvent être présentées selon une approche
- qualitative, p. ex. à l'aide des attributs faible/modérée/grave, ou
- quantitative, p. ex. au moyen des coûts annuels attendus des dommages sur la base de l'historique des dommages, des coûts d'immobilisation ou des coûts de réparation.

Évaluations qualitatives pour les gares critiques:
- Fortes précipitations: 2030: probabilité d'occurrence moyenne; 2050: probabilité d'occurrence élevée. Conséquence: modérée (p. ex. présence d'eau dans les passages inférieurs).
- Vagues de chaleur: 2030: probabilité d'occurrence moyenne; 2050: probabilité d'occurrence élevée. Conséquence: grave (stress thermique pour la clientèle, pannes des équipements électroniques tels que les compteurs d'essieux, les commandes d'ascenseurs, les afficheurs, etc.).

Output: risque climatique

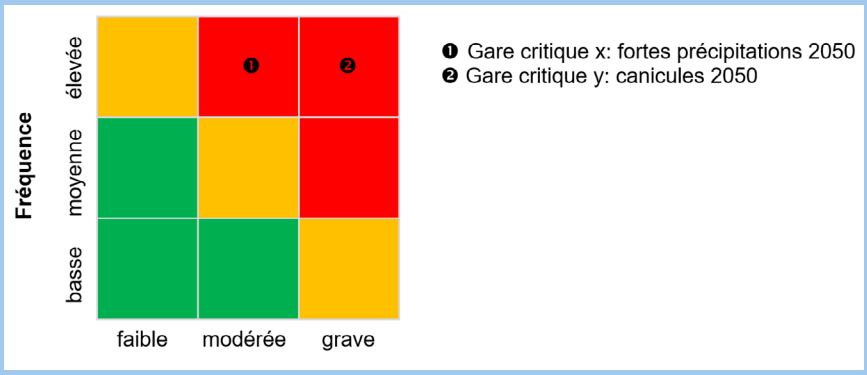


Figure 9: exemple de matrice simple d'évaluation des risques

Source: CFF (2026)

- Fortes précipitations: 2030: probabilité d'occurrence moyenne; 2050: probabilité d'occurrence élevée. Conséquence: modérée (inondation des passages inférieurs et des locaux techniques) → Risque: moyen à élevé.
- Vagues de chaleur: 2030: moyenne; 2050: élevée → Conséquence: grave (stress thermique pour la clientèle, pannes des équipements électroniques) → Risque: élevé.

7 Stratégie et mesures d'adaptation

La stratégie d'adaptation constitue la suite logique des analyses réalisées en matière de vulnérabilité, d'exposition, de criticité et de risque climatique. Elle vise à répondre à la question suivante: «quelles sont les prochaines étapes?»

L'objectif de la stratégie d'adaptation est de renforcer de manière systématique la résilience des infrastructures face aux effets du changement climatique. Elle fournit un cadre permettant de hiérarchiser les investissements et d'intégrer les mesures d'adaptation au changement climatique dans les processus de renouvellement, de maintenance et d'exploitation existants.

Il ne s'agit toutefois pas de sécuriser toutes les installations au maximum, mais plutôt de privilégier une utilisation aussi efficace que possible des moyens et des ressources disponibles. Les principes suivants sont notamment au cœur de cette approche:

- Hiérarchisation des installations critiques
- Utilisation des cycles de renouvellement existants
- Mise en œuvre de mesures «sans regret» («no regret») et «sans grand regret» («low regret»)
- Prise en compte de tous les types de mesures (p. ex. organisationnelles, techniques)

La résilience climatique doit être considérée comme une composante intégrante de l'Asset Management existant et non comme un processus distinct. Les risques climatiques et les mesures d'adaptation doivent être intégrés aux processus existants, par exemple:

- Planification des investissements
- Planification de la maintenance
- Évaluation de l'état
- Gestion des risques et de la sécurité
- Business Continuity Management

Cela permet d'exploiter les synergies et d'harmoniser les processus de décision et de priorisation.

Pour être économiquement viables, les mesures d'adaptation des infrastructures s'appuient sur des approches adaptatives fondées sur les risques et le cycle de vie:

- **Approche fondée sur les risques:** toutes les installations ne nécessitent pas le même degré de protection. Les mesures sont mises en œuvre là où des risques climatiques élevés se conjuguent à une forte criticité. Plus la criticité, le risque climatique et la durée d'utilisation restante sont élevés, plus les mesures d'adaptation doivent être complètes.
- **Approche axée sur le cycle de vie:** les mesures d'adaptation au changement climatique doivent, dans la mesure du possible, être intégrées aux assainissements, investissements de remplacement, modernisations ou extensions déjà planifiés. Cela permet de limiter les coûts supplémentaires et les interruptions d'exploitation. On appliquera une approche axée sur le cycle de vie lorsque la durée d'utilisation technique d'une installation touche à sa fin et que l'adaptation au changement climatique peut être réalisée dans le cadre d'un renouvellement déjà planifié. L'objectif étant d'éviter, à court terme, des coûts d'investissement élevés.
- **Approche adaptative:** compte tenu des incertitudes liées à l'évolution du climat, les mesures doivent être planifiées de manière progressive et flexible, par exemple grâce à une possibilité d'extension modulaire, un suivi fondé sur des valeurs seuils ou la mise en place progressive d'un équipement complémentaire.

Au lieu de procéder immédiatement à une refonte complète de la planification, une démarche d'adaptation progressive est définie. Cette approche permet d'optimiser le calendrier des investissements et d'éviter les mauvais investissements:

- **À court terme:** réaliser des interventions minimales, telles que la surveillance, la mise en place de mesures organisationnelles et des améliorations mineures.
- **À moyen terme:** lorsque les contraintes climatiques deviennent de plus en plus visibles. Vérifier et mettre en œuvre des adaptations des installations au moyen d'extensions ou de renouvellements partiels.
- **À long terme:** si les contraintes continuent de s'intensifier, évaluer et planifier un renouvellement technique complet ou un changement de site.

Différentes approches permettent de définir correctement les priorités dans le cadre de la démarche. En ce qui concerne les installations, il convient de prendre en compte non seulement le risque climatique et la criticité, mais également la durée de vie résiduelle en vue de garantir une adaptation au changement climatique à moindre coût.

Deux approches possibles pour une priorisation stratégique sont présentées ci-après. L'attribution de points et la prise en compte de la durée de vie résiduelle doivent être adaptées en fonction de l'installation concernée. Les modalités permettant d'évaluer la criticité et le risque climatique peuvent également varier. Il est toutefois essentiel que cette évaluation soit réalisée de manière systématique et compréhensible.

Exemples de priorisation stratégique:

1. Exemple:

Priorité = criticité × risque climatique × durée de vie résiduelle (1 à 3 points pour chaque critère)		
Score	**Priorité**	**Marche à suivre**
1 à 6	Faible	Suivi et mesures organisationnelles
7 à 12	Moyenne	Équipement technique complémentaire sélectif
13 à 18	Élevée	Investissements prioritaires en matière de résilience
19 à 27	Très élevée	Adaptation globale axée sur la résilience climatique

2. Exemple:

Criticité + Risque	**Durée de vie résiduelle <10 ans**	**Durée de vie résiduelle 10 à 25 ans**	**Durée de vie résiduelle > 25 ans**
Faible	Observation	Mesures «sans grand regret»	Adaptation standard
Moyen	Équipement complémentaire sélectif	Renforcement ciblé	Équipement complémentaire robuste
Élevé	Protection transitoire	Renforcement prioritaire	Adaptation complète axée sur la résilience climatique

Les mesures d'adaptation doivent être mises en œuvre de manière aussi économique et proportionnée que possible. Différentes approches peuvent être envisagées:

Approche de mise en œuvre	Exemples de mesures
Technologique	• Voie ballastée – tramway et chaleur: augmentation de la rigidité du cadre • Voie sans ballast – tramway et chaleur: Installation de butées de cisaillement pour réduire les mouvements longitudinaux → protéger les joints • Voie ferrée et chaleur: adaptation de la température de neutralisation lors du soudage des rails • Installations de sécurité: se baser sur les nouveaux signaux climatiques dans le cadre de l'appel d'offres pour les installations. • Génie civil et augmentation du ruissellement de surface: dimensionnement adapté des aqueducs • Courant de traction – tramway et chaleur: adaptation de la technologie de la ligne de contact (ligne de contact régularisée, caténaire bas-haut), augmentation de la section des fils de contact • Alimentation en énergie du tramway (p. ex. redresseur): protection de la construction contre les crues grâce à de meilleures analyses basées sur les scénarios climatiques connus • Bâtiments: meilleure isolation
Fondée sur la nature	• Tramway: prévoir de l'ombrage/des arbres le long des voies • Tramway: remplacer la voie ballastée désimperméabilisée par une voie végétalisée • Installations ouvertes au public: mettre en œuvre des mesures s'inscrivant dans le concept de la «ville-éponge»; introduire un nouveau standard de matérialisation privilégiant la «non-imperméabilisation» des sols. • Génie civil/ouvrages d'art: mettre en place une gestion de la végétation adaptée au climat (p. ex. favoriser des essences d'arbres résilientes face au changement climatique)
Comportementale	• Entretien/projets: adapter les fenêtres d'intervention (jour/nuit, saison) • Mettre en place des campagnes d'information sur le réchauffement climatique et la désimperméabilisation afin de favoriser l'acceptation
Gouvernance	• Élaborer/adapter les réglementations, normes, standards, prescriptions d'exécution et de qualité, directives d'étude de projet, prescriptions d'entretien, etc.
Fondée sur les connaissances	• Gestion des installations: évaluation des installations sous l'angle de leur vulnérabilité, de leur exposition et de leur criticité • Modèles climatiques, analyses des risques, élaboration de cartes des dangers • «Repenser»/innovation

Tableau 1: mesures d'adaptation

Source: groupe de travail Adaptation au changement climatique (2025)

8 Coûts de l'adaptation

L'initiative «Climate-ADAPT» de la Commission européenne élabore des outils et fournit des exemples permettant de transformer les mesures d'adaptation en priorités et en plans de mise en œuvre optimaux au moyen d'analyses coûts-avantages.[6]

Les avantages correspondent aux coûts de dommages évités (cf. chapitre 6 Analyse des risques climatiques) ou aux avantages résultant de l'adoption et de la mise en œuvre de mesures d'adaptation. Ainsi, les coûts de l'adaptation résultent de la **comparaison entre les coûts de la mesure et ses avantages**. Dans l'idéal, les coûts de l'adaptation sont négatifs (bénéfice).

La mesure d'adaptation doit tenir compte des répercussions concernant le changement climatique. Si une mesure aggrave les effets du changement climatique ou porte atteinte à l'environnement (p. ex. à la biodiversité), on parle de maladaptation.

Pour calculer les coûts de l'adaptation, la démarche suivante est proposée:

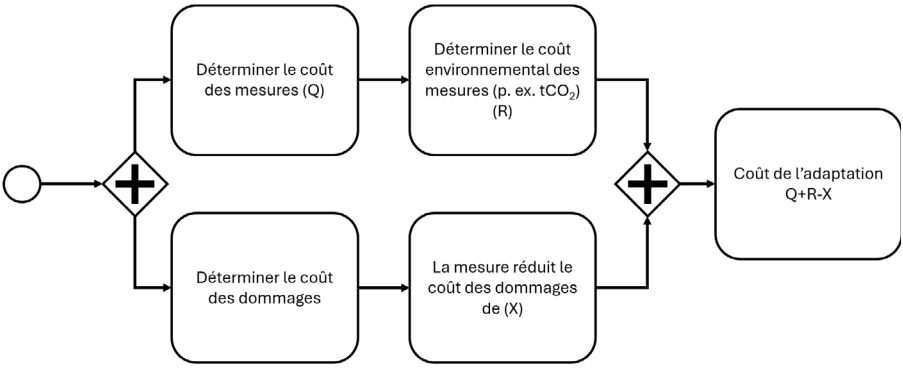


Figure 10: procédure

Source: groupe de travail Adaptation au changement climatique (2025)

Le calcul s'effectue selon deux processus parallèles. Les différentes étapes sont décrites séparément dans les sections suivantes.

[6] Réalisation d'une analyse coûts-avantages des mesures d'adaptation | Outils de Climate-ADAPT

Approches[7] pour le calcul des coûts des dommages
Lorsque les coûts des dommages ne sont pas encore connus, les méthodes suivantes permettent d'effectuer une première estimation:

1. **Méthode basée sur les événements:**
   - Dommage par événement × fréquence d'occurrence attendue
   - Exemple: inondation d'une sous-station (coûts de 1 million de CHF/événement × survenance tous les 10 ans)
2. **Méthode basée sur les installations:**
   - Coût de la réduction attendue du cycle de vie par type d'installation × nombre d'installations concernées
   - Exemple: réduction de la durée de vie moyenne d'une voie de 40 à 30 ans.
3. **Méthode ascendante (bottom-up):** estimations d'experts pour chaque type d'installation
4. **Méthode descendante (top-down):** extrapolation à partir d'études internationales/benchmarks (p. ex. UIC, UE)

Réduction des coûts des dommages (X): la mesure recommandée devrait logiquement permettre de réduire les coûts futurs des dommages. Si la mesure permet d'éliminer entièrement les coûts des dommages et qu'aucun dommage n'est à prévoir, la réduction des coûts des dommages (X) correspond à l'intégralité du montant des coûts des dommages initialement attendus. Dans le cas où un risque résiduel subsiste, la réduction des coûts des dommages doit impérativement être inférieure aux coûts des dommages.
Coûts des mesures (Q): pour déterminer les coûts des mesures d'adaptation, il convient d'appliquer les méthodes proposées au chapitre 7. Une mesure d'adaptation ne doit pas nécessairement impliquer le remplacement d'une installation ou une solution technologique coûteuse. Elle peut également prendre la forme d'une optimisation des processus, par exemple dans le domaine de la gestion des urgences ou du Business Continuity Management (BCM).
Coûts environnementaux des mesures (R): selon les études, les coûts économiques liés à l'émission d'une tonne supplémentaire de CO_2 seraient compris entre 100 et 600 CHF.[8] L'équipe propose de retenir ici une valeur de 200 CHF par tonne de CO_2.
Résultat – Coûts de l'adaptation: les coûts de l'adaptation correspondent aux coûts nets totaux de la mesure proposée (Q+R-X). Si ces coûts sont négatifs, la mesure est considérée comme pertinente. Dans le cas contraire, il convient de la justifier davantage. (Exemple: atteinte à la réputation ou autres avantages non pécuniaires[9])

[7] D'autres approches pour estimer les futurs coûts des dommages figurent en annexe.

[8] Handbuch Umweltkosten (Manuel relatif aux coûts environnementaux) | Umweltbundesamt (Allemagne)

[9] Un avantage non pécuniaire lié à la plantation d'arbres dans le contexte de la «ville-éponge» est qu'ils procurent de l'ombre et contribuent au rafraîchissement de l'espace urbain.

9 Exemples de bonne pratique relatifs au processus d'adaptation

9.1 Exemple des postes d'enclenchement (SOB)

Analyse pratique et mesures possibles concernant les installations importantes pour l'exploitation situées dans des espaces souterrains.

Étape 1: analyse de la vulnérabilité

Selon l'analyse de la vulnérabilité («heatmap»), tous les postes d'enclenchement situés dans des espaces souterrains sont vulnérables face au signal climatique des précipitations intenses. La vulnérabilité évaluée correspond à un impact moyen (**deux** points sur quatre).

Étape 2: analyse de l'exposition

Lors de l'analyse de l'exposition, l'installation spécifique est examinée plus en détail.

La première partie de l'analyse de l'exposition consiste en une évaluation systématique des données d'entretien, y compris la levée des dérangements et les pannes. Cela permet de déterminer si l'installation a été touchée par le signal climatique par le passé, et dans quelle mesure.

Dans la seconde partie, l'installation est comparée aux cartes des dangers actuellement disponibles. L'évaluation peut être effectuée manuellement ou de manière automatisée. En raison du faible nombre d'installations sur le réseau, une évaluation manuelle a été privilégiée.

Analyse qualitative manuelle à l'aide de la carte des dangers relative au ruissellement de surface: la profondeur d'écoulement désigne la hauteur de la couche d'eau qui s'écoule à la surface du terrain. Plus la profondeur d'écoulement est importante, plus les chambres et les espaces souterrains sont exposés au risque d'infiltration en raison de la stagnation et de la pression de l'eau.

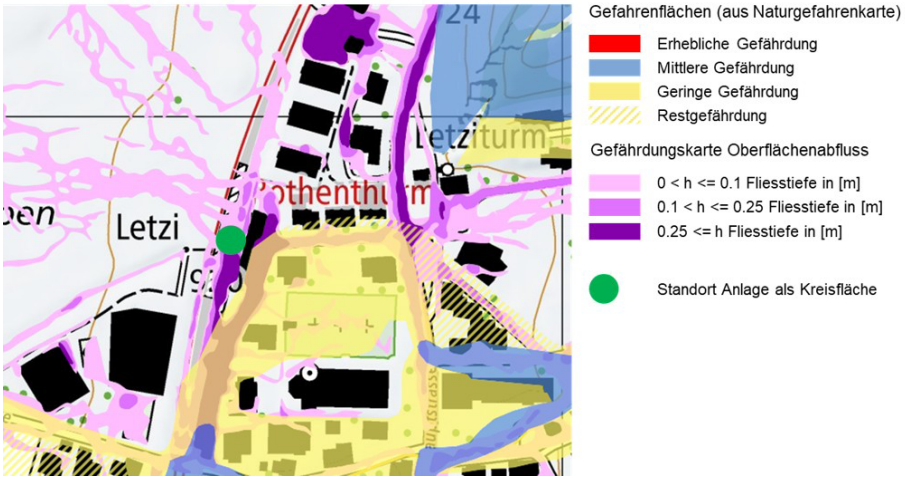


Figure 11: carte des dangers

Source: SOB et SIG cantonal SZ (2025)

L'exposition fait l'objet d'une évaluation qualitative par un expert. Le tableau ci-dessous sert d'aide à l'évaluation.

Points	Désignation	Description
0	Aucune exposition	L'installation se trouve dans une zone totalement exempte de dangers.
1	Faible exposition	L'installation est adjacente à des zones présentant une profondeur d'écoulement moyenne.
2	Exposition moyenne	L'installation est partiellement adjacente à des zones présentant une profondeur d'écoulement élevée et se trouve à proximité de zones présentant une profondeur d'écoulement moyenne.
3	Forte exposition	L'installation se trouve entièrement dans une zone présentant une profondeur d'écoulement élevée.

Tableau 2: exposition

Source: SOB (2025)

Pour l'installation présentée dans la figure ci-dessus, **2 points** ont été attribués pour l'exposition («exposition moyenne»).

Étape 3: analyse des risques

Risque = probabilité d'occurrence × ampleur des dommages

3.1 Probabilité d'occurrence

La classification de la probabilité d'occurrence est déterminée à partir de la vulnérabilité, de l'exposition et des données historiques (étapes 1 et 2). La classification suivante (adaptée des tableaux de Hicks pour une classification simplifiée des risques, Shortreed et al., 2003) est appliquée:[10]

Classe	Désignation	Vulnérabilité × Exposition	Données historiques
5	Fréquent	9 à 12	Un événement ou plus par an
4	Probable	6 à 8	12 événements ou plus en 10 ans
3	Occasionnel	3 à 4	Un événement ou plus tous les 30 ans
2	Rare	2	Un événement ou plus tous les 200 ans
1	Improbable	0 à 1	Moins d'un événement tous les 200 ans

Tableau 3: probabilité d'occurrence

Source: Shortreed et al. (2003)

Les critères du tableau sont à considérer séparément. Par exemple, pour la classe 3 «Occasionnel», il suffit que Vulnérabilité × Exposition = 4 OU que les données historiques indiquent qu'un événement ou plus est attendu tous les 30 ans. En l'absence de données historiques, seule la colonne Vulnérabilité × Exposition doit être considérée.

Dans le présent exemple, la vulnérabilité (**2**) multipliée par l'exposition (**2**) donne **2 × 2 = 4** (voir la deuxième colonne), ce qui correspond à une probabilité d'occurrence de classe **3**. Aucun événement n'est connu sur la base des données historiques. La probabilité d'occurrence reste donc de classe **3**.

[10] De Proske, D. (2022). Catalogue des risques: risques et leur représentation. Springer

3.2 Ampleur des dommages

La classification de l'ampleur des dommages repose sur une version adaptée des méthodes qualitatives développées par Eskensen et al. (2004) et Stille (2017) pour une évaluation rapide des risques.[11]

Classe	Désignation	Description, atteinte à la vie ou à l'intégrité corporelle ou dégâts matériels
100	Catastrophique	Plus de dix blessures graves ou dégâts matériels > 3 millions de francs
60	Grave	Entre une et dix blessures graves ou dégâts matériels entre 300 000 francs et 3 millions de francs
25	Important	Au moins une blessure grave ou dégâts matériels entre 30 000 francs et 300 000 francs
10	Accru	En général, aucune blessure ou dégâts matériels entre 3000 francs et 30 000 francs
2	Insignifiant	Aucune blessure ou dégâts matériels < 3000 francs

Tableau 4: ampleur des dommages

Source: SOB (2025). Remarque: le terme «blessure grave» englobe également les cas de décès.

Pour ce poste d'enclenchement, un dommage, mesures immédiates et panne d'exploitation comprises, est classé comme important par les experts IS (classe **25**).

[11] De Proske, D. (2022). Catalogue des risques: risques et leur représentation. Springer

3.3 Résultat en termes de risque

Comme mentionné au début de ce chapitre, le risque est évalué à l'aide de la formule suivante: probabilité d'occurrence × ampleur des dommages. En s'inspirant des tableaux de Hicks, la classification s'effectue comme suit:

Risque	Niveau	Mesures
> 399	Risque extrême	Situation intolérable – des mesures immédiates sont nécessaires pour réduire le risque
100 à 399	Risque élevé	Situation inacceptable à long terme – des mesures de réduction des risques doivent être mises en œuvre
30 à 99	Risque moyen	Situation indésirable – évaluation et planification de mesures de réduction des risques à long terme
< 30	Risque faible	Aucune mesure requise – contrôle périodique afin de maintenir un faible niveau de risque

Tableau 5: risque

Source: Shortreed et al. (2003)

Dans notre exemple, le risque est donc de **3 × 25 = 75**, ce qui correspond à un risque moyen. Lors d'une prochaine remise en état, le risque sera réduit grâce à une amélioration de l'évacuation des eaux et à d'autres solutions techniques restant à définir.

Remarque: cette analyse qualitative simple doit être menée séparément pour chaque installation. En présence d'un faible nombre d'installations sur le réseau, elle peut constituer une méthode efficace pour effectuer une première classification et, le cas échéant, initier des mesures. Les mesures possibles sont décrites au chapitre 7 «Mesures d'adaptation». Une mesure technologique et anticipative, telle qu'un système d'alerte précoce suivi d'un processus de résolution des problèmes (troubleshooting), est également envisageable.

9.2 Exemple des compteurs d'essieux (CFF)

Étape 1: analyse de la vulnérabilité

Les CFF ont analysé les annonces de dérangements concernant les compteurs d'essieux pour la période allant de 2018 à mi-2023.
À partir de la probabilité de dérangement en fonction de la température, ils ont déterminé la vulnérabilité des différentes installations à la chaleur. Les données montrent que les dérangements sont plus fréquents lorsque les températures sont élevées. De manière générale, on constate que la probabilité de dérangement est environ deux fois plus élevée les jours où la température maximale dépasse 30 °C (journée tropicale) que les jours où ce seuil n'est pas atteint. Cette différence est statistiquement très significative. Certains compteurs d'essieux présentent même une probabilité de dérangement environ quatre fois plus élevée lors des journées tropicales que lors des autres jours. Conclusion: les compteurs d'essieux sont en effet vulnérables à la chaleur. L'évaluation correspond à un «Fort impact» (rouge ou 4).

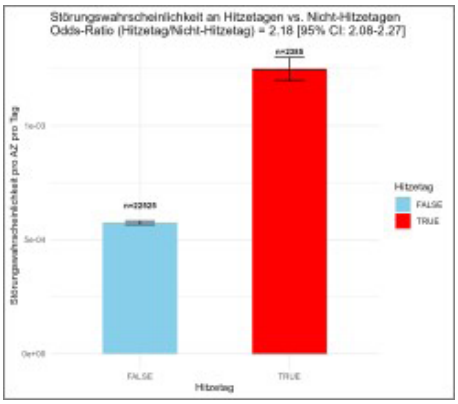


Figure 12: probabilité de dérangement des compteurs d'essieux lors des journées sans forte chaleur et des journées tropicales

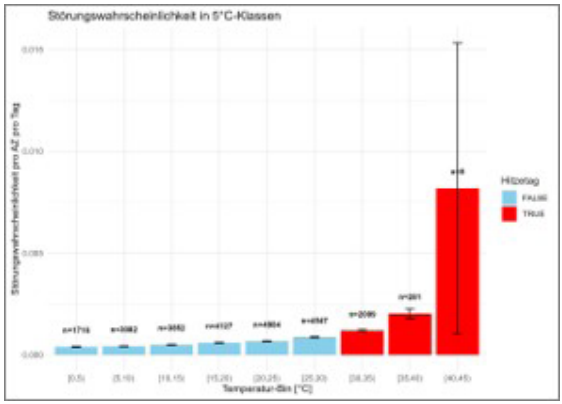


Figure 13: probabilité de dérangement des compteurs d'essieux par classes de température de 5 °C

Source: CFF (2025)

Étape 2: analyse de l’exposition

- Aujourd’hui, les compteurs d’essieux des CFF sont exposés à environ 10 journées tropicales dans toutes les régions de Suisse.
- En 2060, une grande partie des compteurs d’essieux connaîtra déjà plus de 30 journées tropicales, à l’exception du versant nord des Alpes. En 2085, la grande majorité des compteurs d’essieux sera déjà exposée à plus de 50 journées tropicales, à l’exception du versant nord des Alpes.

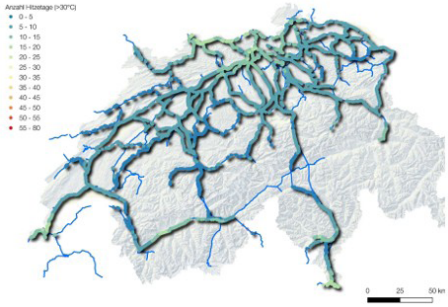


Figure 14: compteurs d’essieux exposés à la chaleur en 2010

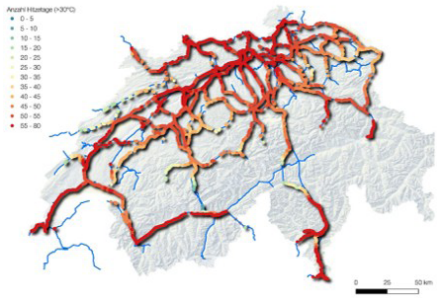


Figure 15: compteurs d’essieux exposés à la chaleur en 2085

RCP8.5							
	Klimakennwert	Jura (3'611)	Innenalpin (1'760)	Mittelland (19'758)	Alpensüdhang (3'356)	Alpennordhang (4'464)
2010	Anzahl Anlagen mit mittlerer Jahrestemperatur > 11°C	673 18.6	0 0.0	968 4.9	2'247 67.0	0 0.0
	Anzahl Anlagen mit > 10 Hitzetage pro Jahr	1'997 55.3	560 31.8	4'589 23.2	1'082 32.2	117 2.6
	Anzahl Anlagen mit > 20 Hitzetage pro Jahr	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0
	Anzahl Anlagen mit > 30 Hitzetage pro Jahr	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0
	Anzahl Anlagen mit > 40 Hitzetage pro Jahr	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0
	Anzahl Anlagen mit > 50 Hitzetage pro Jahr	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0	0 0.0
2060	Anzahl Anlagen mit mittlerer Jahrestemperatur > 11°C	3'313 91.7	1'382 78.5	19'422 98.3	2'770 82.5	3'551 79.5
	Anzahl Anlagen mit > 10 Hitzetage pro Jahr	3'471 96.1	1'398 79.4	19'758 100.0	2'947 87.8	3'833 85.9
	Anzahl Anlagen mit > 20 Hitzetage pro Jahr	3'222 89.2	1'371 77.9	19'053 96.4	2'537 75.6	3'489 78.2
	Anzahl Anlagen mit > 30 Hitzetage pro Jahr	2'339 64.8	1'272 72.3	9'089 46.0	1'767 52.7	300 6.7
	Anzahl Anlagen mit > 40 Hitzetage pro Jahr	984 27.3	399 22.7	1'070 5.4	903 26.9	0 0.0
	Anzahl Anlagen mit > 50 Hitzetage pro Jahr	0 0.0	20 1.1	0 0.0	32 1.0	0 0.0
2085	Anzahl Anlagen mit mittlerer Jahrestemperatur > 11°C	3'587 99.3	1'458 82.8	19'758 100.0	3'072 91.5	4'195 94.0
	Anzahl Anlagen mit > 10 Hitzetage pro Jahr	3'608 99.9	1'466 83.3	19'758 100.0	3'190 95.1	4'248 95.2
	Anzahl Anlagen mit > 20 Hitzetage pro Jahr	3'554 98.4	1'460 83.0	19'758 100.0	3'093 92.2	4'084 91.5
	Anzahl Anlagen mit > 30 Hitzetage pro Jahr	3'394 94.0	1'390 79.0	19'737 99.9	2'932 87.4	3'790 84.9
	Anzahl Anlagen mit > 40 Hitzetage pro Jahr	3'244 89.8	1'386 78.8	19'112 96.7	2'709 80.7	3'504 78.5
	Anzahl Anlagen mit > 50 Hitzetage pro Jahr	2'816 78.0	1'313 74.6	14'916 75.5	2'506 74.7	1'171 26.2

Figure 16: compteurs d’essieux exposés à la chaleur selon l’année et la région

Source: Meteotest (2024)

Étape 3: analyse de la criticité

- Plus le nombre de clients transportés sur un compteur d'essieux est élevé, plus l'impact en cas d'interruption est important.
- La criticité est définie au moyen d'un indice d'exposition, calculé à partir du nombre de trains de voyageurs, de trains de marchandises, de trains de service, de courses de manœuvre et de passagers ainsi que du poids des trains de marchandises.
- Chaque voie, et donc le compteur d'essieux qui y est installé, se voit ainsi attribuer une criticité individuelle.
- L'ensemble des compteurs d'essieux a été réparti en cinq catégories d'exposition. Les interruptions touchant les compteurs d'essieux représentés en rouge ont les conséquences les plus importantes.
- La combinaison de l'exposition et de la criticité permet d'identifier les compteurs d'essieux qui seront les plus exposés à la chaleur et les plus fortement sollicités à l'avenir.
- Sur les quelque 18 500 points de comptage classés, environ 5 % se trouvent dans la classe de criticité la plus élevée (criticité et exposition maximales).

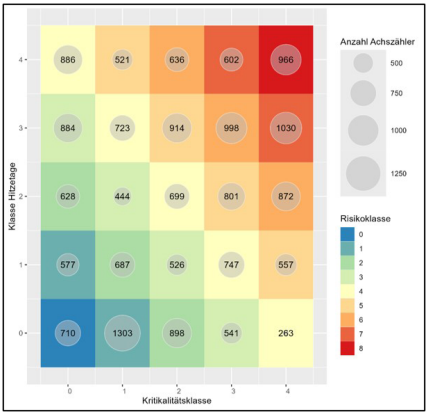


Figure 17: matrice de criticité des compteurs d'essieux (2085, RCP 8,5)

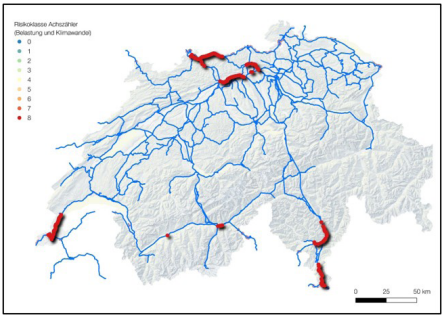


Figure 18: vue d'ensemble des compteurs d'essieux présentant le plus grand nombre de journées tropicales et la classe de criticité la plus élevée

Source: CFF (2024)

Exemple de l'Arc Lémanique: en cas de panne d'une heure, environ neuf trains seraient concernés. Pour un retard de 30 minutes par train et à raison de x CHF par minute de retard des trains, on obtiendrait y minutes de retard, soit z CHF. Si l'on se base sur les voyageurs, avec 1500 voyageurs concernés, on arrive à 45 000 minutes de retard des voyageurs ou z CHF.

Étape 4: analyse des risques climatiques

- Sur la période 2018-2022, 22 525 dérangements, correspondant à un total de 201 500 minutes de retard des trains, ont été recensés lors des journées sans forte chaleur, contre 2385 dérangements et 27 000 minutes de retard des trains lors des journées tropicales. Cela correspond à neuf minutes de retard des trains par dérangement lors des journées sans forte chaleur et à onze minutes de retard des trains par dérangement lors des journées tropicales. Avec un coût de x CHF par minute de retard des trains, cela représente y CHF par dérangement.
- Pour calculer le risque lié à la température, on soustrait le risque de dérangement de base (baseline). La probabilité étant environ deux fois plus élevée lors des journées tropicales, on peut simplement diviser le risque par deux.

Année	Journées tropicales par appareil*	Probabilité de dérangement lors d'une journée tropicale**	Probabilité de dérangement lors d'une journée sans forte chaleur***	Probabilité de dérangement liée à la température****	Nombre de dérangements par an (liés à la température)	Minute de retard des trains par dérangement (moyenne 2018-2022)	Minute de retard des trains par an	Risque monétarisé par an (CHF)
2010	173 012	0,0012	0,00057	0,00067	117	9	1071	A
2022	381 674	0,0012	0,00057	0,00067	258	9	2364	B
2060	629 151	0,0012	0,00057	0,00067	425	9	3896	C
2085	1 121 102	0,0012	0,00057	0,00067	757	9	6943	D

* Somme de toutes les journées tropicales auxquelles l'ensemble des compteurs d'essieux du réseau CFF est exposé au cours d'une année.

** Probabilité d'un dérangement de l'ensemble des compteurs d'essieux à une température supérieure à 30 °C.

*** Probabilité d'un dérangement de l'ensemble des compteurs d'essieux à une température inférieure à 30 °C.

**** Probabilité d'un dérangement de l'ensemble des compteurs d'essieux en raison d'une température supérieure à 30 °C.

Figure 19: analyse des risques climatiques
Source: CFF (2025)

- Par rapport à 2022, et avec l'équipement actuel, trois fois plus de dérangements liés à la température seront enregistrés en 2085. Le risque annuel est ainsi multiplié par trois (en supposant que l'équipement installé en 2085 soit identique à celui d'aujourd'hui).
- Le risque peut être affiné, par exemple au moyen d'indices d'exposition (voir l'analyse de la criticité, qui tient compte des différents types de compteurs d'essieux).

10 Annexe

10.1 Autres approches pour déterminer les futurs coûts des dommages

Approche de SNCF Réseau

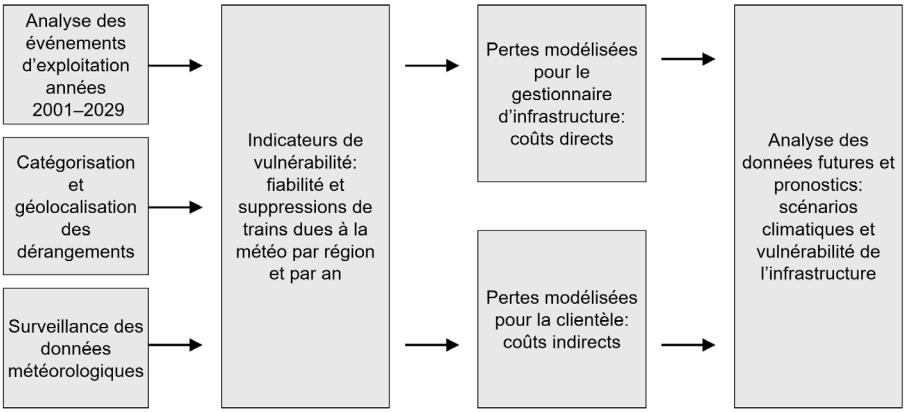


Figure 20: vue d'ensemble des événements, des données météorologiques et des pertes

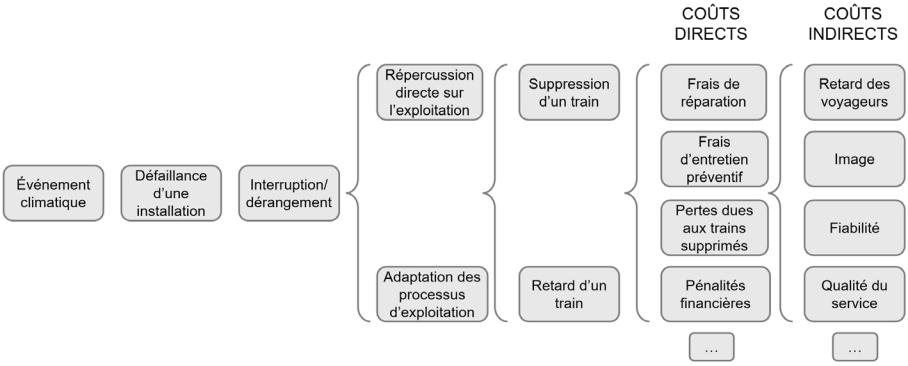


Figure 21: schéma fonctionnel de détermination des coûts directs et indirects

Source: sur la base de SNCF Réseau, Julien Brunel, Marc Georges Develter, Thaynara Silva (2026)

Approche de DB InfraGO

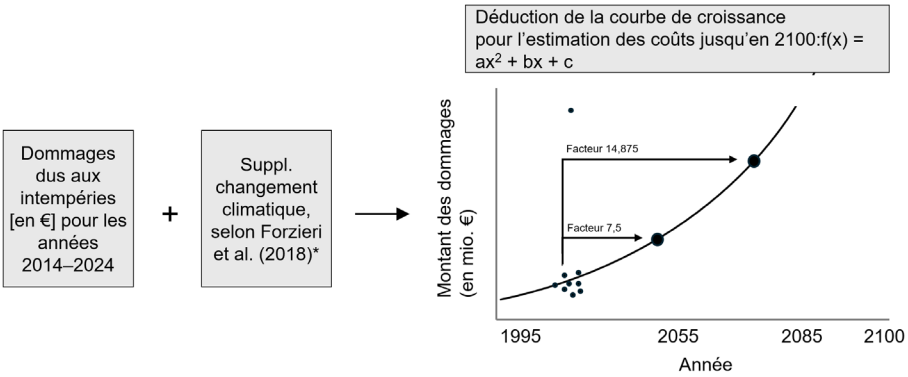
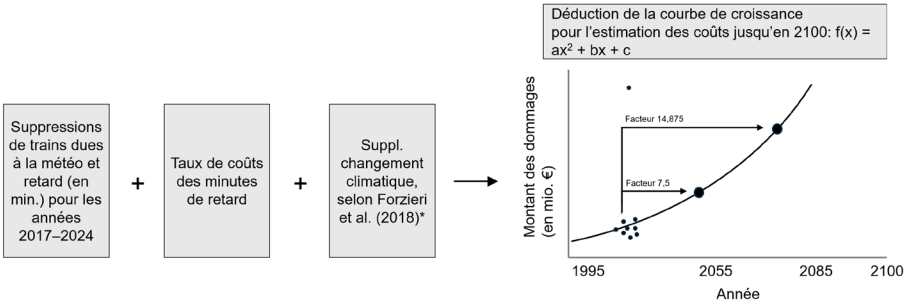


Figure 22: estimation des coûts des dommages dus aux conditions météorologiques



* Augmentation des dommages aux infrastructures de transport dus aux phénomènes climatiques extrêmes en Europe (sans adaptation) de 7,5 fois (pour la période 2041–2070) et de 14,875 fois (pour la période 2071–2100)

Figure 23: estimation des coûts liés aux suppressions de trains et aux minutes de retard dues aux conditions météorologiques

Source: sur la base de DB InfraGO, Frederick Bott, I.IIG 41, 12/2025

10.2 Informations sur le document

Date de publication: 30 septembre 2026

Version: V1; approuvée par la KIS le 25 juin 2026

Membres du groupe de travail «Adaptation au changement climatique»:

SOB:	Gregory Limburg, Philipp Anderegg
MGB:	Fabian Nellen, Christoph Jekelmann
BERNMOBIL:	Tobias Ganz, Gregory Limburg
UTP:	Bettina Meury
CFF:	Andreas Heller (co-responsable du groupe de travail «Adaptation au changement climatique»)
BLS:	Marc Hächler (co-responsable du groupe de travail «Adaptation au changement climatique»)

11 Liste des figures

Figure 1: message-clé du NCCS 8
Figure 2: chaîne d'action «Moins de neige» 11
Figure 3: chaînes d'actions «Étés plus secs», «Chaleur plus extrême» et «Fortes précipitations plus fréquentes et plus intenses» 12
Figure 4: chaîne d'action «Chaleur plus extrême» 13
Figure 5: processus d'adaptation 15
Figure 6: exemple de heatmap 17
Figure 7: exemple de données d'installations structurées et géoréférencées 22
Figure 8: gares exposées (p. ex. Chiasso) et gares peu exposées (Göschenen) face à l'augmentation des journées tropicales (heat days [hd]) pour la période de référence (2010) et pour les années 2060/2085 22
Figure 9: exemple de matrice simple d'évaluation des risques 25
Figure 10: procédure 30
Figure 11: carte des dangers 33
Figure 12: probabilité de dérangement des compteurs d'essieux lors des journées sans forte chaleur et des journées tropicales 37
Figure 13: probabilité de dérangement des compteursd'essieux par classes de température de 5 °C 37
Figure 14: compteurs d'essieux exposés à la chaleur en 2010 38
Figure 15: compteurs d'essieux exposés à la chaleur en 2085 38
Figure 16: compteurs d'essieux exposés à la chaleur selon l'année et la région 38
Figure 17: matrice de criticité des compteurs d'essieux (2085, RCP 8,5) 39
Figure 18: vue d'ensemble des compteurs d'essieux présentant le plus grand nombre de journées tropicales et la classe de criticité la plus élevée 39
Figure 19: analyse des risques climatiques 40
Figure 20: vue d'ensemble des événements, des données météorologiques et des pertes 41
Figure 21: schéma fonctionnel de détermination des coûts directs et indirects 41
Figure 22: estimation des coûts des dommages dus aux conditions météorologiques 42
Figure 23: estimation des coûts liés aux suppressions de trains et aux minutes de retard dues aux conditions météorologiques 42

12 Liste des tableaux

Tableau 1: mesures d'adaptation 29
Tableau 2: exposition 33
Tableau 3: probabilité d'occurrence 34
Tableau 4: ampleur des dommages 35
Tableau 5: risque 36

13 Sources

OFEV (2025). Analyse des risques climatiques en Suisse.
www.bafu.admin.ch/fr/publication?id=74m-J2D7NNzh

NCCS (2025).
www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/changement-climatique-et-impacts/scenarios-climatiques-suisses/atlas-web-ch2018.html

Shortreed J, Hicks J & Craig L (2003). Basic framework for Risk Management – Final report. March 28, 2003, Network for environmental risk assessment and management. Prepared for the Ontario Ministry of the Environment

Eskensen S, Tengborg P, Kampman J, Veicherts T.H. (2004). Guidelines for tunnelling risk management. International Tunnelling Association, Working group No. Tunnelling and Underground Space Technology 19, S 217–237

Stille H (2017). Geological Uncertainties in Tunnelling – Risk Assessment and Quality Assurance, Sir Muir Wood Lecture 2017, April 2017, International Tunnelling and Underground Space Association, Lausanne




106
55
52

VÖV UTP

Verband öffentlicher Verkehr
Union des transports publics
Unione dei trasporti pubblici

Dählhölzliweg 12
3005 Berne

www.utp.ch
info@utp.ch

Septembre 2026