

Sécurité sismique des infrastructures en Suisse

Procédures, expériences et exemples concrets de la pratique



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

Sécurité sismique des infrastructures en Suisse

Procédures, expériences et exemples concrets de la pratique

Impressum

Éditeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

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

Direction du projet au sein de l'OFEV

Sven Heunert

(centrale de coordination pour la mitigation des séismes)

Conception et rédaction

OECOCOM, Bienne : Beat Jordi, Lucienne Rey (responsables de projet),
Nicolas Gattlen, Gregor Klaus, Kaspar Meuli

Relecture

Friederike Braune (OFEV), Blaise Duvernay (OFEV)

Traduction

Mélanie Maradan

Mise en page

Funke Lettershop AG

Photo de couverture

Exécution par l'Office fédéral des routes (OFROU) d'un nouvel appui de pont dans le cadre de l'assainissement du pont autoroutier sur le Rhin postérieur à Cazis (GR).

© Bänziger Partner, Ingenieure Planer, Chur

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch/uw-2403-f

Il n'est pas possible de commander une version imprimée.

Cette publication est également disponible en allemand.

La langue originale est l'allemand.

© OFEV 2024

Table des matières

Abstracts	5	8	Approvisionnement en gaz naturel	64
Avant-propos	6	8.1	Détecteurs de séisme pour l'approvisionnement en gaz de la région de Bâle (BS)	66
1 Introduction	7	8.2	Modernisation du poste de compression et de comptage douanier de Ruswil (LU)	68
2 Approvisionnement en électricité	16	8.3	Poste de détente et de comptage de La Tène (NE)	70
2.1	Sous-station d'Auwiesen à Zurich (ZH)	9	Approvisionnement et élimination	72
2.2	Sous-station de Wimmis (BE)	9.1	Station d'épuration des eaux usées d'Opfikon (ZH)	74
2.3	Sous-station de Romanel-sur-Lausanne (VD)	9.2	Centre de données de l'EPFL (VD)	76
3 Sécurité publique	24	9.3	Installations de chauffage et de refroidissement des hautes écoles vaudoises (VD)	78
3.1	Centrale d'engagement à Sierre (VS)			
3.2	Nouveau siège administratif de l'ECA à Lausanne (VD)			
3.3	Centre logistique de la GVZ à Bülach (ZH)			
4 Santé	32			
4.1	Nouveau service de secours de l'hôpital d'Uster (ZH)			
4.2	Réfection de la centrale frigorifique du centre pharmaceutique de l'hôpital universitaire de Bâle (BS)			
4.3	Agrandissement et transformation de l'hôpital de Sion (VS)			
5 Transport routier	40			
5.1	Pont de la Sihl sur la route principale H8 à Schindellegi (SZ)			
5.2	Assainissement du Bodenbrücke à Guttannen (BE)			
5.3	Assainissement du pont sur le Rhin postérieur à Cazis (GR)			
6 Transport ferroviaire	48			
6.1	Viaduc de la Sarine vers Gümmenen (BE)			
6.2	Nouvelle cabine technique de la Zentralbahn à la gare de Horw (LU)			
6.3	Nouvelle toiture pour le quai de la gare de Muttenz (BL)			
7 Aviation civile	56			
7.1	Aéroport de Genève (GE)			
7.2	Aérodrome de Gstaad-Saanen (BE)			
7.3	Base de la Rega à Gordola (TI)			

Abstracts

Since the turn of the millennium, the federal government has been introducing measures to reduce the risk of earthquakes to infrastructure. The FOEN encourages the creation of earthquake-proof installations in all relevant areas in its enforcement aids drawn up with the key support of the Coordination Centre for Earthquake Prevention. Exemplary solutions are documented in 24 case studies. In addition to the infrastructure areas under the direct remit of the federal government, the publication also presents successful projects by cantons, communes and private operators.

Depuis le changement de millénaire, la Confédération a engagé des mesures afin de réduire le risque sismique pour les infrastructures. Élaborées sous l'égide de la centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'OFEV, des aides à l'exécution contribuent à des installations parasismiques dans tous les domaines concernés. Le présent document expose 24 exemples concrets de bonnes solutions mises en place. Cette publication s'intéresse aux domaines d'infrastructure relevant directement de la compétence de la Confédération, mais aussi à des projets exemplaires de cantons, de communes et d'exploitants privés.

Seit der Jahrtausendwende hat der Bund Massnahmen in die Wege geleitet, um das Erdbebenrisiko bei Infrastrukturen zu reduzieren. Mit den unter Federführung der Koordinationsstelle für Erdbebenvorsorge erarbeiteten Vollzugshilfen gibt das BAFU für alle relevanten Bereiche Impulse für erdbebensichere Anlagen. Vorbildliche Lösungen werden anhand von 24 Fallbeispielen dokumentiert. Neben den Infrastrukturbereichen im direkten Einflussbereich des Bundes stellt die Publikation auch gelungene Vorhaben von Kantonen, Gemeinden und privaten Betreibern vor.

Dall'inizio del nuovo millennio, la Confederazione ha avviato alcune misure volte a ridurre i rischi sismici nelle infrastrutture. Con gli aiuti all'esecuzione elaborati sotto l'egida della Centrale per la coordinazione della mitigazione dei sismi, l'UFAM promuove impianti antisismici in tutti i settori interessati. Partendo da 24 casi di studio, sono presentate alcune soluzioni esemplari. Oltre ai settori infrastrutturali nella sfera di competenza diretta della Confederazione, la pubblicazione illustra anche progetti di successo di Cantoni, Comuni e operatori privati.

Keywords :

Earthquake safety, infrastructures, construction practice, case studies, enforcement aids

Mots-clés :

Sécurité sismique, infrastructures, exemples concrets de la pratique, aides à l'exécution

Stichwörter :

Erdbebensicherheit, Infrastrukturen, Baupraxis, Fallbeispiele, Vollzugshilfen

Parole chiave :

sicurezza sismica, infrastrutture, pratica costruttiva, casi di studio, aiuti all'esecuzione

Avant-propos

Les infrastructures publiques telles que les réseaux électriques, les conduites de gaz, les routes, les lignes de chemins de fer et les canaux de communication sont les artères vitales de notre société. Elles permettent aux individus, aux marchandises, à l'énergie et aux informations de circuler librement et d'arriver à temps à destination. La fiabilité et la sécurité d'approvisionnement, importants moteurs de l'économie suisse, contribuent au bien-être de la société.

Organisées en vastes réseaux, les infrastructures sont toutefois vulnérables face à des catastrophes de grande ampleur comme les séismes. En cas d'événement, il faut s'attendre à des coupures d'électricité, des interruptions sur les axes de transport ou encore des pannes des réseaux de communication qui peuvent être source de graves complications lors de la maîtrise de l'événement et du rétablissement. En outre, certaines infrastructures anciennes de sécurité publique et de santé (centrales de police, garages de service du feu ou hôpitaux, p. ex.) ne respectent pas toujours les principes de la construction parasismique.

Sachant que les séismes représentent un risque majeur pour la Suisse, notre pays s'y prépare de façon ciblée depuis le changement de millénaire. Grâce à son programme de mesures, le Conseil fédéral entend réduire le risque sismique, notamment pour les infrastructures. Pour ce faire, la centrale de coordination pour la mitigation des séismes de la Confédération a collaboré avec les autorités chargées des autorisations et de la surveillance afin d'élaborer des aides à l'exécution. Ces aides servent à mieux protéger contre les séismes les infrastructures qui entrent dans le domaine de compétence de la Confédération, mais sont utiles également pour les cantons, les communes et les exploitants privés. Il est possible, non seulement dans de nouveaux projets de construction, mais aussi avec les infrastructures existantes (p. ex. dans le cadre de la planification de l'entretien), d'effectuer des améliorations décisives pour des coûts relativement faibles.

Au travers des exemples concrets de la présente publication, nous souhaitons, d'une part, donner un élan de sorte que tous les domaines d'infrastructure essentiels adoptent de bonnes solutions et, d'autre part, documenter les progrès réalisés sur le terrain. Les mesures visant à accroître la sécurité sismique sont aussi dans l'intérêt des propriétaires et des exploitants, car la prévention est moins onéreuse que la maîtrise des dommages aux infrastructures causés par un séisme.

Paul Steffen, directeur suppléant
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Introduction : Risque sismique et mesures de protection des installations

1 De la nécessité d'infrastructures parasismiques

Depuis le changement de millénaire, la Suisse travaille à l'amélioration de la sécurité sismique de ses infrastructures qui, en raison de leur structure en réseau, de leur complexité et de leurs interdépendances, sont sensibles aux fortes secousses sismiques. Moyennant des mesures de prévention souvent simples, il est possible de réduire considérablement la vulnérabilité non seulement des nouvelles constructions, mais aussi des constructions existantes. Par le présent document, la centrale de coordination pour la mitigation des séismes de la Confédération souhaite encourager, en s'appuyant sur des exemples concrets tirés de la pratique, l'adoption de bonnes solutions permettant de réduire davantage les risques.

Chaque année, le Service Sismologique Suisse (SED) enregistre plusieurs centaines de secousses sismiques qui, dans la plupart des cas, ne sont pas perçues par la population. Cette activité sismique est le résultat d'une collision entre les plaques tectoniques africaine et eurasiennne. En comparaison européenne, l'aléa sismique est considéré comme moyen en Suisse. Les régions les plus menacées sont en particulier le Valais, la région de Bâle, la vallée du Rhin saint-galloise, l'Oberland bernois, l'Engadine ainsi que la Suisse centrale. Cependant, les séismes peuvent en principe se produire n'importe où en Suisse.

Les séismes importants, provoquant des dommages aux bâtiments et aux infrastructures (à partir d'une magnitude de 5 sur l'échelle de Richter), sont certes moins susceptibles de survenir en Suisse que dans des régions de haute sismicité comme la Turquie ou l'Italie, mais s'y produisent également. Des rapports historiques documentent l'aléa sismique en Suisse à partir du XIII^e siècle. Depuis cette époque, on a recensé douze séismes ayant causé de graves dégâts dans notre pays. Le plus important est celui qui a secoué la région de Bâle en 1356, et le plus récent, d'une magnitude de 5,8, celui qui a touché un soir de janvier 1946 la ville de Sierre. Des cheminées et des tuiles étaient alors tombées des toits, des routes étaient couvertes de débris, l'approvisionnement en électricité était interrompu et le réseau téléphonique, défaillant. Quelques secondes de secousses sismiques avaient suffi à faire quatre victimes et affecter 3500 bâtiments. Par ailleurs, les différentes

secousses avaient déclenché de nombreuses avalanches et éboulements dans les versants des vallées, au point d'entraver l'accès aux vallées latérales.

Séismes rares au potentiel de dommages élevé

Comme la plaine valaisanne fait aujourd'hui l'objet d'une utilisation bien plus intensive, le SED estime que, si un séisme de même ampleur à l'épicentre devait se reproduire, il serait responsable de quelque 40 morts, 300 blessés, 9000 personnes en quête de protection et 7000 bâtiments présentant des dommages moyens à élevés. À eux seuls, les dommages aux bâtiments sont estimés à 2,5 milliards de francs. À noter que ces chiffres correspondent à un événement potentiel qui pourrait tout aussi bien se produire dans une autre région du pays.

Considérant l'ensemble des dangers qui pourraient menacer le fonctionnement de notre société et la santé de la population, les séismes figurent, avec les pandémies et les pénuries d'électricité, parmi les plus grands risques pour la Suisse. Par comparaison avec d'autres dangers naturels tels que les crues, les laves torrentielles ou les avalanches, leur occurrence est certes plus faible, mais leur potentiel de dommages est très élevé vu qu'ils touchent un large espace géographique.

Le risque sismique en Suisse

Sur la base du *Modèle du risque sismique*¹ national, il est possible de se faire une idée globale des dommages potentiels en termes quantitatifs. Pour un parc immobilier d'une valeur totale de près de 3000 milliards de francs, les secousses sismiques sur une période de 100 ans sont à elles seules susceptibles de causer des dommages aux immeubles et à leurs équipements de l'ordre de 11 à 44 milliards de francs. Ces chiffres ne tiennent pas compte des dégâts aux infrastructures et des pertes financières découlant des interruptions d'exploitation, ni d'autres conséquences que peuvent entraîner les séismes, telles que les glissements de terrain ou les départs d'incendies.

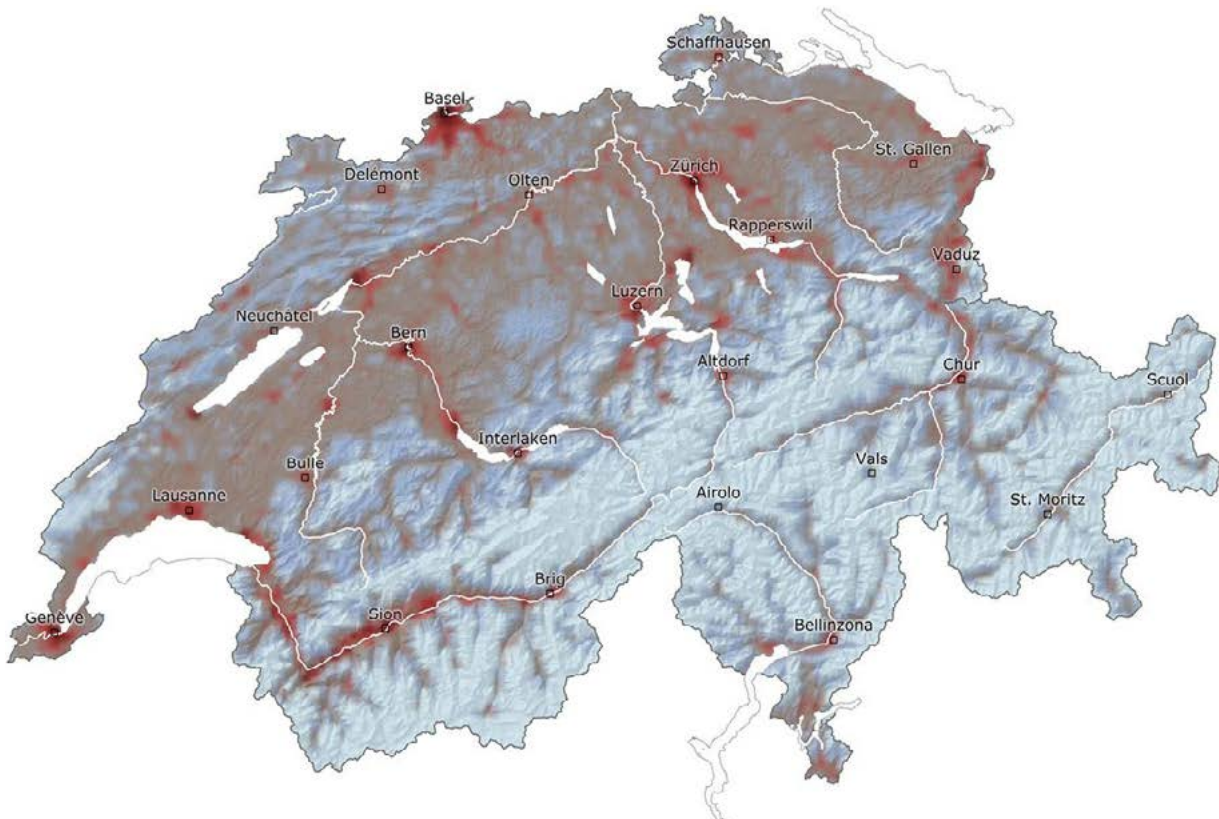
¹ <http://www.seismo.ethz.ch/fr/knowledge/earthquake-hazard-and-risk/earthquake-risk-switzerland/Earthquake-Risk-Model>

Si le séisme qui s'est produit dans la région de Bâle en 1356 (magnitude de 6,6) se répétait aujourd'hui, le montant des dommages aux bâtiments et à leurs équipements s'élèverait selon le SED à quelque 50 milliards de francs. Ce chiffre est bien plus élevé que celui engendré par la crue catastrophique que la Suisse a connue en août 2005. Les dégâts avaient totalisé environ 3 milliards de francs pour les bâtiments et les infrastructures.

Le Modèle du risque sismique national a produit différents résultats, notamment une carte des risques, qui tient compte non seulement de l'aléa sismique au niveau régional en fonction de la fréquence et de la magnitude attendues des secousses, mais aussi de l'influence des classes de terrains de fondation, de la vulnérabilité des bâtiments et de la concentration des personnes et des biens matériels touchés.

Figure 1

La carte du risque sismique de la Suisse élaborée par le SED tient compte de l'aléa régional, des classes de terrains de fondation, de la vulnérabilité des bâtiments ainsi que de la concentration des personnes et des biens matériels dans une zone. Les localités et les régions les plus exposées au risque sismique sont en rouge.



Sur la base des décès et des pertes financières attendues du fait des dommages aux bâtiments, ce sont les zones urbaines qui présentent le risque sismique le plus élevé. Par ordre décroissant, les zones les plus à risque sont les grands centres de Bâle, de Genève, de Zurich, de Lucerne et de Berne. Comme, en principe, les infrastructures importantes (comme les sous-stations électriques, les ponts autoroutiers, les gares, les hôpitaux, les garages du service du feu et les stations d'épuration) sont concentrées dans les agglomérations, c'est dans ces zones que les dégâts sur les installations auraient les plus grandes répercussions sur les individus.

Le risque sismique augmente également du fait que la Suisse compte une population résidente et active de plus en plus nombreuse, ce qui entraîne une hausse des biens matériels importants et des activités économiques essentielles. Cependant, il est possible de réduire considérablement la vulnérabilité de notre société en respectant les principes parasismiques dans les activités de construction.

La vulnérabilité des infrastructures

Du fait de leur structure en réseau caractéristique et de la complexité des systèmes, les infrastructures sont particulièrement vulnérables aux événements à large échelle tels les séismes. Dans le quotidien d'une industrie moderne et d'une société de services, les lignes électriques, les gazoducs, les routes, les lignes ferroviaires et les canaux de communication fonctionnent comme des artères vitales. Ces vaisseaux garantissent que les individus, les marchandises, l'énergie, les informations et certains services circulent librement et arrivent à destination à temps.

En cas de catastrophe, assurer leur bon fonctionnement peut être une question de vie ou de mort. Les organes de crise et les services d'intervention disposent-ils des informations nécessaires pour se faire une idée rapide de la situation en cas de crise et affecter les ressources limitées là où elles sont le plus urgentement nécessaires ? Les véhicules de la police, les ambulances et les camions de pompier peuvent-ils partir en intervention ou sont-ils bloqués par des décombres dans un garage ? Les services d'intervention sont-ils en mesure de rejoindre l'épicentre du séisme et les hôpitaux de la région, ou en sont-ils coupés car certains ponts sur des voies de communication se sont effondrés ?

Que se passe-t-il en cas de séisme ?

Un séisme produit, pendant quelques secondes, des rapides secousses du sol dans toutes les directions. Selon la magnitude du séisme et la proximité par rapport à l'épicentre, le terrain peut se déplacer de quelques centimètres à plusieurs décimètres. Ces mouvements du sol font vibrer les structures porteuses et d'autres éléments de construction. Selon l'intensité des secousses et le type d'ouvrage, il peut en résulter de graves dommages, voire un effondrement du bâtiment. La géologie locale exerce une influence déterminante sur l'intensité des secousses. Les terrains meubles, comme ceux souvent présents dans les plaines du Plateau et dans les vallées fluviales alpines, sont susceptibles de renforcer les ondes sismiques à tel point que les secousses peuvent être jusqu'à dix fois plus puissantes dans les zones concernées que sur un terrain rocheux. Outre les conséquences directes sur les ouvrages fixes et les installations mobiles, on sait que ces événements provoquent également des événements secondaires d'ordre naturel ou technique. On mentionnera notamment les éboulements et les écroulements, les glissements de terrain, les avalanches ainsi que d'importants tassements dus à la liquéfaction du sol ou aux tsunamis déclenchés par les glissements. Il existe par ailleurs des risques de départs d'incendie lorsque des conduites de gaz ou d'électricité sont endommagées. Les séismes se produisent de manière soudaine, sans signes avant-coureurs. Il n'existe à l'heure actuelle aucune méthode qui permettrait de les prédire de manière fiable. Par conséquent, les préalertes en Suisse ne peuvent être émises, dans l'idéal, que quelques secondes avant l'événement. Ce bref laps de temps peut suffire à lancer des processus automatiques critiques, notamment sécuriser des barres de combustible dans les centrales nucléaires ou fermer des vannes de gazoducs. Considérant les limites des systèmes d'alerte, la meilleure protection est celle obtenue par des mesures constructives, techniques et organisationnelles préventives destinées à optimiser la sécurité sismique. Réfléchir à de telles mesures et les mettre en œuvre à une phase précoce n'entraîne presque aucun coût supplémentaire.

De la même manière qu'elles alimentent le moteur de l'économie au quotidien, les infrastructures publiques sont également d'une importance capitale dans les situations de crise. Par exemple, si un séisme vient couper l'électricité ou d'importantes liaisons routières ou endommager des centrales d'engagement, des cliniques d'urgence ou des bâtiments du service du feu, cela entrave les interventions des services de secours, la maîtrise de la catastrophe et ralentit la reconstruction et le rétablissement de la situation. De longues interruptions de service des infrastructures vitales affaiblissent par ailleurs le fondement économique d'une société ainsi que la capacité de celle-ci à se remettre des catastrophes qu'elle traverse.

Pour que la vie normale puisse reprendre son cours, il faut aussi que certaines infrastructures qui ne sont pas directement vitales reprennent leurs activités. L'électricité, par exemple, est indispensable, car les individus ont en besoin pour retirer de l'argent au distributeur, pour acheter du pain à la boulangerie, pour se rendre au travail en train ou encore pour faire du télétravail.

Un niveau de sécurité sismique souvent inconnu

Depuis 2003, la Suisse dispose de prescriptions exhaustives qui permettent de prendre en compte les aspects sismiques dans la construction de nouveaux ouvrages et l'évaluation d'ouvrages existants. La plupart des installations de notre pays ont vu le jour avant les normes SIA correspondantes. À l'époque, les autorités ou les associations spécialisées n'avaient pas encore émis de directives spécifiques pour

les infrastructures. En Suisse, seuls quelques domaines d'infrastructure (en particulier les barrages et les centrales nucléaires) sont soumis depuis plusieurs décennies à des prescriptions strictes en matière sismique.

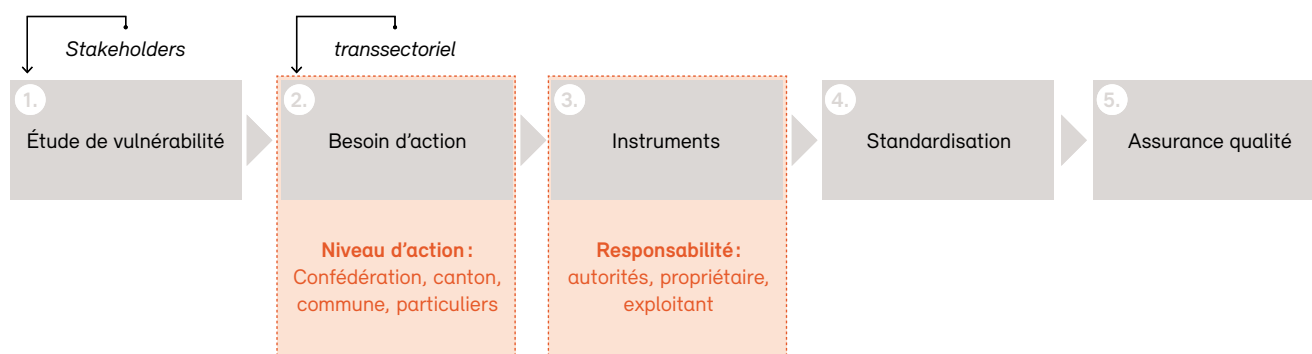
Par conséquent, de nombreux ponts ferroviaires et routiers, aéroports, sous-stations électriques, postes réducteurs de pression pour les gazoducs, stations d'épuration des eaux, hôpitaux, garages à ambulances, centrales de police et bâtiments du service du feu ont été construits à l'origine sans considération des prescriptions aujourd'hui en vigueur pour la construction parasismique. Pour ces ouvrages, il n'est pas rare que l'on ne connaisse pas le degré de conformité aux prescriptions sismiques actuelles. Ces lacunes au moins partielles se traduisent par une sécurité sismique insuffisante et une certaine vulnérabilité face aux secousses. Des investigations d'ingénierie sont indispensables pour identifier les ouvrages qu'il convient d'améliorer. Cette démarche requiert toutefois du temps et n'est pas forcément appropriée dans tous les cas. Comme des infrastructures sont constamment renouvelées, voire remplacées, il peut être judicieux de profiter de telles occasions pour mettre celles-ci en conformité aux normes sismiques actuelles.

Des situations de dommages complexes

Dans le cadre d'études sectorielles de vulnérabilité, la Confédération a analysé les points faibles des domaines d'infrastructure existants et déterminé les actions nécessaires. Les résultats sont présentés par secteur dans les chapitres qui suivent.

Figure 2

Approche systématique des autorités fédérales pour évaluer et optimiser la sécurité sismique des infrastructures. Selon la répartition des responsabilités, il revient parfois également aux cantons, aux communes ou à l'économie privée de déterminer les actions nécessaires et de mettre en œuvre des mesures concrètes.



Comme le montrent les expériences à l'étranger, les décombres et les ouvrages effondrés bloquent les voies de circulation, limitent les accès aux zones touchées, aux hôpitaux et aux installations d'approvisionnement et entravent le transport des forces d'intervention et du matériel de sauvetage. Les dangers qui accompagnent des ruptures de conduites, des dommages à des vannes ou des défaillances de systèmes de refroidissement vont de la perte de contrôle des processus d'exploitation à la libération de substances dangereuses. Des pannes d'électricité à large échelle entraîneraient de vastes interruptions des commandes à distance, des télécommunications et des transports ferroviaires et, partant, une indisponibilité des ressources nécessaires à la bonne maîtrise de la situation. De tels événements mettraient également en péril le bon fonctionnement des services d'urgence et d'intervention chargés des secours. La survenue simultanée de plusieurs dommages s'influençant de manière réciproque pourrait rendre encore plus difficile la mise en œuvre des mesures d'urgence et le fonctionnement de secours et aggraver la pénurie de ressources.

La responsabilité en matière de sécurité sismique

Toute personne qui détient ou exploite des infrastructures est responsable en premier lieu de leur sécurité sismique. En vertu de l'art. 58 du code des obligations, le propriétaire d'ouvrage répond également des dommages causés par des vices de construction dans les cas fortuits et en cas de faute d'un tiers. La responsabilité civile s'applique non seulement aux nouvelles constructions, mais aussi aux infrastructures existantes qui, en vertu de l'obligation d'entretien, doivent également faire l'objet de vérifications de la sécurité sismique et être améliorées au besoin.

Le degré de protection requis pour un ouvrage est défini selon une répartition en trois classes d'ouvrages telles que décrites dans la norme SIA 261 (voir encadré).

Par ailleurs, les objectifs de protection des responsables déterminent quelles mesures ils souhaitent ou doivent prendre pour assurer la sécurité des infrastructures. La continuité de l'approvisionnement joue ici un rôle majeur.

Les gestionnaires des infrastructures publiques, par exemple, sont responsables de gérer la continuité de l'approvisionnement en électricité, gaz, eau potable et des services de communication également dans les situations d'urgence

Les classes d'ouvrages

Selon la norme SIA 261, les ouvrages et les infrastructures doivent respecter les principes de la construction parasismique. Les enjeux de la sécurité sismique sont la protection des personnes, la limitation des dommages et la garantie de l'aptitude au fonctionnement des ouvrages importants en cas de secousses sismiques. Le degré de protection exigé est défini selon une répartition en trois classes d'ouvrages (CO III, II et I). Le but est de prévenir les dommages graves aux structures porteuses, en particulier l'effondrement d'un ouvrage. En fonction de l'importance et du potentiel de dommages d'un ouvrage, il y a lieu de vérifier, outre la sécurité structurale, l'aptitude au service et le bon fonctionnement, et d'en apporter la preuve. Pour ce faire, les responsables doivent choisir systématiquement la classe d'ouvrages la plus élevée qui remplit au moins une des caractéristiques figurant dans la norme SIA. Ils restent toutefois libres d'appliquer des exigences plus strictes aux ouvrages et aux installations, et donc de les placer dans une CO plus élevée.

CO III : cette classe maximale comprend les ouvrages ayant une fonction d'infrastructure vitale, p. ex. des hôpitaux accueillant des urgences, des installations qui servent à la protection de la population et revêtent une importance pour la maîtrise de l'événement (p. ex. casernes de pompiers ou garage d'ambulances), des ponts et d'autres ouvrages de transport d'importance vitale pour l'accessibilité d'une zone habitée et des infrastructures vitales pour l'approvisionnement ou les télécommunications.

CO II : cette classe comprend les ouvrages et les installations à forte occupation par des personnes ou accueillant de grands rassemblements. Il peut s'agir notamment d'écoles et de jardins d'enfants, de centres commerciaux, de stades, de cinémas, de théâtres, d'églises ou de bâtiments de l'administration publique. Elle inclut également les installations situées dans le périmètre d'une voie de communication importante ainsi que les infrastructures dont la défaillance pourrait menacer des ouvrages voisins ayant une fonction d'infrastructure vitale.

CO I : cette classe comprend tous les autres ouvrages, du moment que ceux-ci n'engendrent aucun dommage environnemental en cas de séisme. Cela concerne notamment les bâtiments d'habitation, administratifs, artisanaux et industriels, les entrepôts, les parkings ainsi que les installations des voies de circulation de faible importance.

(séisme notamment) ou de rétablir ces prestations dans les plus brefs délais. Outre les exigences usuelles s'appliquant aux structures porteuses notamment des bâtiments, des ponts et des barrages, ces mesures de sécurité concernent également les installations techniques comme les transformateurs, les groupes électrogènes de secours et les armoires de commande ainsi que les éléments non structuraux telles les conduites. Que ce soit pour les nouvelles constructions ou pour les ouvrages existants, les normes SIA sont des règles de l'art reconnues du secteur de la construction pour la sécurité sismique. Elles doivent être respectées en vertu de la législation. Les objets existants sont soumis notamment à une obligation d'examen visant à garantir la sécurité des infrastructures. Les éventuels déficits doivent être comblés par des mesures proportionnées, qu'il peut être judicieux de mettre en œuvre dans le cadre d'un entretien régulier.

Des mesures adaptées selon les diverses vulnérabilités

Dans le cadre du *programme de mesures de mitigation des séismes de la Confédération*², l'OFEV a réalisé plusieurs études sur la vulnérabilité. Comme le montrent ces investigations, les différents domaines d'infrastructure ne courent pas tous les mêmes risques face aux séismes. Les plus lourdes menaces pèsent sur les ouvrages d'infrastructure et leurs éléments non structuraux. Viennent ensuite les installations et dispositifs techniques comme les transformateurs. La probabilité que surviennent des dommages est plus faible pour, dans l'ordre décroissant : les ponts, les murs de soutènement, les réseaux de conduites souterraines, par exemple pour le pétrole ou le gaz, ainsi que les tubes des tunnels.

Les mesures constructives et techniques visant à sécuriser les domaines d'infrastructure menacés ne constituent pas l'unique possibilité d'assurer, en situation d'urgence également, le bon fonctionnement des infrastructures vitales. En effet, il est possible d'envisager des dispositions organisationnelles. Des systèmes redondants peuvent compenser les défaillances d'installations isolées, un principe qui implique de répartir les infrastructures pertinentes sur différents sites. De plus, des mesures préparatoires idoines contribuent à minimiser les interruptions des prestations.

Les infrastructures en main de la Confédération

Depuis le changement de millénaire, la Confédération a, en plus d'assurer l'exécution des dispositions en matière sismique pour ses bâtiments, déployé des efforts pour améliorer la protection contre les séismes des infrastructures dont elle est propriétaire. Parmi ses efforts se trouvaient les études systématiques de la sécurité sismique des ouvrages d'art des routes achevées en 2020. Ces analyses ont montré que des mesures constructives sont nécessaires pour environ 6 % des 4000 ponts autoroutiers, mesures qui peuvent en règle générale être réalisées à moindre coût. Responsable en la matière, l'Office fédéral des routes (ASTRA) a déjà mis en œuvre les mesures de sécurité à priorité élevée.

L'influence des autorités compétentes

S'agissant de la sécurité sismique, la Confédération exerce une influence non seulement comme propriétaire d'infrastructures, mais aussi en tant qu'autorité chargée des autorisations et de la surveillance pour de nombreux domaines d'infrastructure. Pour les 200 ouvrages d'accumulation placés sous sa surveillance, l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) exige des exploitants des vérifications périodiques de la sécurité sismique. De manière analogue, l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN) contrôle les centrales nucléaires en Suisse.

Dans tous les cas où des services fédéraux sont compétents en matière d'autorisation des plans, ceux-ci peuvent se servir de la procédure d'approbation pour amener les tiers à mettre en œuvre les exigences techniques et de construction destinées à la protection contre les séismes. Ainsi, l'Inspection fédérale des installations à courant fort (ESTI) se charge du contrôle des installations de courant électrique, l'Inspection fédérale des pipelines (IFP), des conduites pour le pétrole et le gaz, l'Office fédéral des transports (OFT), des projets ferroviaires et l'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC), des aéroports.

Afin d'harmoniser les exigences pour l'ensemble des installations, les autorités uniques pour les différents domaines, avant de rendre leurs décisions, demandent une prise de position à la centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'OFEV. En collaboration avec ces autorités, l'OFEV a fait ancrer les prescriptions en matière de sécurité sismique dans des lois et des ordonnances existantes et concrétisé ces dispositions dans des directives, des fiches techniques et des aides à l'exécution. L'office a par ailleurs

² <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dangers-naturels/informations-pour-specialistes-tremblements-de-terre/mesures-de-la-confederation.html>

élaboré des procédures spécifiques selon les domaines. Dans cette démarche, il s'est systématiquement appuyé sur les actions jugées nécessaires en vertu des études de vulnérabilité.

La marge de manœuvre restreinte de la Confédération

Hormis dans les cas où elle a le rôle de propriétaire ou d'autorité de surveillance ou d'autorisation, la Confédération n'a pas la compétence de procéder à une vérification systématique à large échelle de la sécurité sismique des infrastructures. Par conséquent, les autorités cantonales et communales ont pour responsabilité de vérifier la sécurité sismique de leurs propres infrastructures, de procéder à des améliorations si nécessaires et, dans le cadre des procédures d'autorisation de construire, de formuler des conditions spécifiques concernant la sécurité sismique à l'égard des tiers. Car, en fin de compte, la plupart des infrastructures du pays sont la propriété de communes, de cantons, d'associations régionales et d'entreprises privées. Pour gérer les risques liés aux séismes, ces acteurs peuvent se servir des aides à l'exécution spécifiques à leur domaine publiées par la Confédération, dont certaines ont été développées en collaboration avec les associations faïtières des divers domaines d'infrastructure. Certaines bases et supports s'appliquent à tous les domaines d'infrastructure et permettent d'aborder de manière générale la protection contre les séismes des infrastructures.

Plusieurs cantons formulent déjà des exigences spécifiques concernant la sécurité sismique dans le cadre des procédures cantonales d'autorisation de construire, ce que recommande la Confédération. Ces exigences doivent permettre de garantir de façon systématique et avec une qualité suffisante le respect des normes en vigueur pour la construction parasismique. Dans cette perspective, l'OFEV a élaboré des *recommandations*³ qui s'adressent aux cantons, par l'intermédiaire de la Conférence suisse des directeurs cantonaux des travaux publics, de l'aménagement du territoire et de l'environnement (DTAP).

L'infrastructure en Suisse ne sera pas parasismique du jour au lendemain, mais, en améliorant progressivement ses installations existantes et en respectant les normes en matière

de sécurité sismique pour les nouveaux ouvrages, elle est en mesure d'optimiser en continu sa protection contre les séismes.

Structure de la publication

À l'aide de trois exemples concrets par domaine, les huit chapitres qui suivent illustrent la mise en œuvre pratique des mesures de sécurité sismique pour les infrastructures. Outre les domaines qui relèvent directement de la compétence de la Confédération (approvisionnement en électricité, transport routier et ferroviaire, aviation, approvisionnement en gaz), la présente publication aborde des domaines particulièrement pertinents comme la sécurité publique, la santé, l'approvisionnement ou l'élimination. Chaque chapitre s'ouvre sur une partie introductive qui montre la fonction et l'importance du domaine d'infrastructure concerné et met en lumière les points faibles identifiés par les spécialistes dans le cadre des études de vulnérabilité. Chaque introduction s'achève par ailleurs par des renvois vers des aides à l'exécution et des procédures de contrôle établies s'appuyant sur des démarches de collaboration avec les secteurs et les autorités concernés. Cela comprend également des recommandations, des standards et des normes pour la planification et la construction d'infrastructures. Au total, 24 exemples concrets montrent comment les efforts fournis pour améliorer la protection des infrastructures contre les séismes se reflètent aujourd'hui dans les pratiques de la construction en Suisse. Ces exemples sont aussi bien des projets approuvés par la Confédération que des initiatives réussies de cantons, de communes et d'exploitants privés.

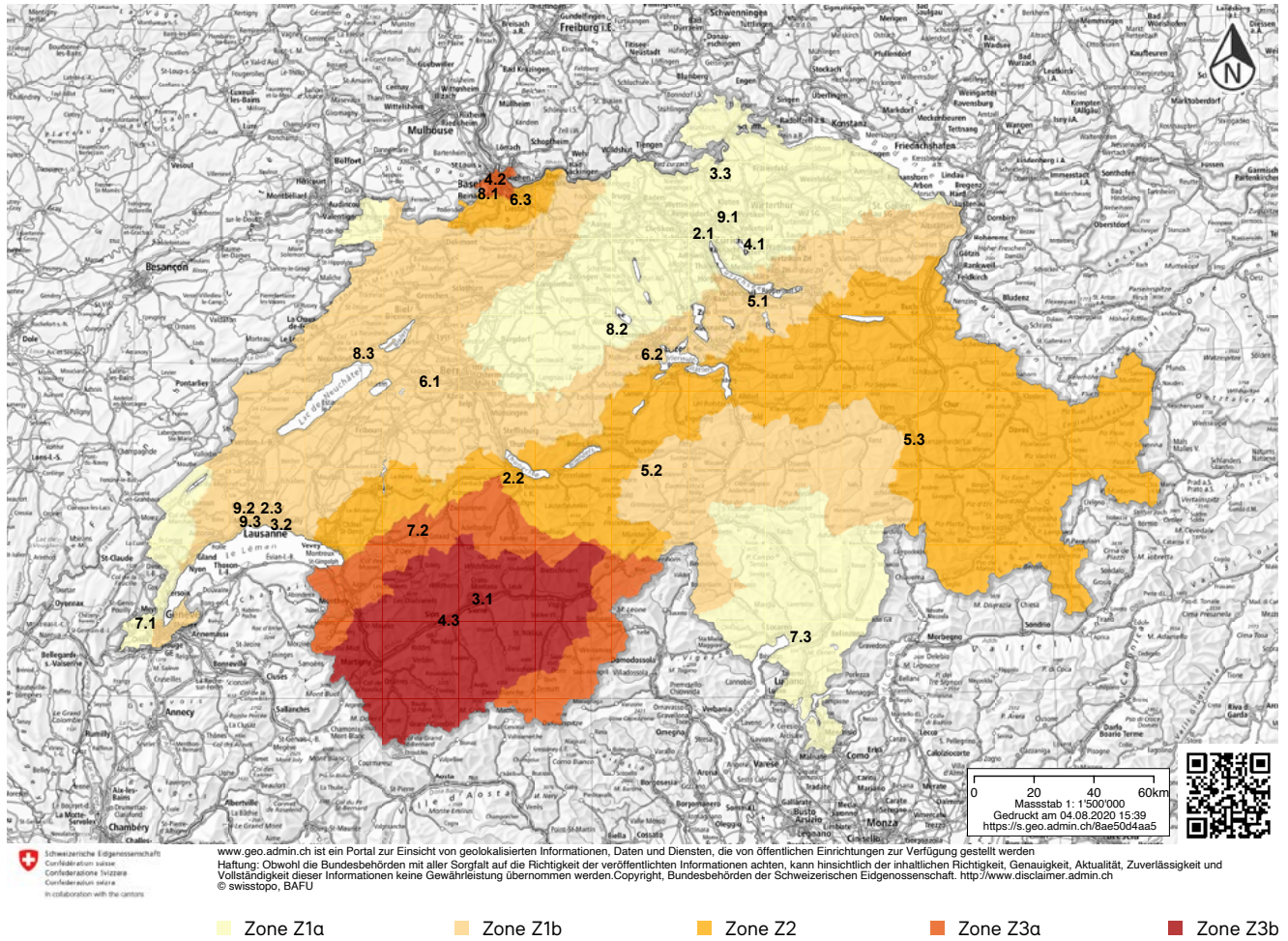
Bases transsectorielles

- *Séisme : gestion de crise et continuité d'activité* ; OFEV UW-1903-F, 2019
- *Sécurité sismique des éléments non structuraux et autres installations et équipements – Recommandations et précisions pour la pratique* ; OFEV, UW-1643-F, 2023

³ https://www.bpuk.ch/fileadmin/Dokumente/bpuk/public/fr/dokumentation/berichte-gutachten-konzepte/bau-und-verkehr/FR_DTAP-Recommandations_en_matiere_de_securite_sismique_2023.pdf

Figure 3

Emplacement des exemples sur la carte des zones sismiques de la norme SIA 261 (2020).



2 Approvisionnement en électricité

- 2.1 Sous-station d'Auwiesen à Zurich (ZH)
- 2.2 Sous-station de Wimmis (BE)
- 2.3 Sous-station de Romanel-sur-Lausanne (VD)

3 Sécurité publique

- 3.1 Centrale d'engagement à Sierre (VS)
- 3.2 Nouveau siège administratif de l'ECA à Lausanne (VD)
- 3.3 Centre logistique de la GVZ à Bülach (ZH)

4 Santé

- 4.1 Nouveau service de secours de l'hôpital d'Uster (ZH)
- 4.2 Réfection de la centrale frigorifique du centre pharmaceutique de l'hôpital universitaire de Bâle (BS)
- 4.3 Agrandissement et transformation de l'hôpital de Sion (VS)

5 Transport routier

- 5.1 Pont de la Sihl sur la route principale H8 à Schindellegi (SZ)
- 5.2 Assainissement du Bodenbrücke à Guttannen (BE)
- 5.3 Assainissement du pont sur le Rhin postérieur à Cazis (GR)

6 Transport ferroviaire

- 6.1 Viaduc de la Sarine vers Gümmenen (BE)
- 6.2 Nouvelle cabine technique de la Zentralbahn à la gare de Horw (LU)
- 6.3 Nouvelle toiture pour le quai de la gare de Muttenz (BL)

7 Aviation civile

- 7.1 Aéroport de Genève (GE)
- 7.2 Aérodrome de Gstaad-Saanen (BE)
- 7.3 Base de la Rega à Gordola (TI)

8 Approvisionnement en gaz naturel

- 8.1 Détecteurs de séisme pour l'approvisionnement en gaz de la région de Bâle (BS)
- 8.2 Modernisation du poste de compression et de comptage douanier de Ruswil (LU)
- 8.3 Poste de détente et de comptage de La Tène (NE)

9 Approvisionnement et élimination

- 9.1 Station d'épuration des eaux usées d'Opfikon (ZH)
- 9.2 Centre de données de l'EPFL (VD)
- 9.3 Installations de chauffage et de refroidissement des hautes écoles vaudoises (VD)

Approvisionnement en électricité

2 Prévenir une panne d'électricité généralisée

L'approvisionnement en électricité est un moteur déterminant de notre économie et de notre société. Des mesures préventives de construction améliorent considérablement la sécurité de l'approvisionnement, même en cas de fort séisme.

Sans électricité, on ne peut rien faire. Cependant, comme le montrent les expériences faites à l'étranger, les grands séismes causent presque systématiquement des coupures de courant au niveau local ou régional. Ces pannes peuvent s'étendre sur plusieurs heures, voire des jours. Les conséquences sont lourdes : des interruptions d'exploitation compliquent les interventions des services de secours, entravent la reconstruction et ralentissent le rétablissement d'une situation normale. Sans compter les dommages économiques lorsqu'un séisme endommage les infrastructures d'approvisionnement en électricité.

Si la distribution d'énergie est interrompue sur une longue période, de nombreuses autres infrastructures dont nous avons besoin au quotidien ne fonctionnent plus. On citera ici notamment les installations nécessaires à la maîtrise du séisme comme les centrales d'alarme, les services d'intervention et les hôpitaux.

La Suisse n'est pas épargnée et doit elle aussi s'attendre à des coupures de courant locales en cas de fort séisme. « Grâce à une mise en œuvre progressive de mesures en la matière, il nous paraît cependant tout à fait possible d'éviter une panne d'électricité généralisée de longue durée », explique Sven Heunert, ingénieur civil à la centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'OFEV. Comme l'ont montré les études de vulnérabilité de 2009 et 2011 portant sur la « sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse » commandées par ce service fédéral spécialisé, les plus grands points faibles se situent dans les sous-stations construites en plein air.

Prévenir les pannes d'électricité étendues

Une aide à l'exécution pratique a vu le jour sur la base des études de l'OFEV, qui se fonde sur l'expertise des autorités uniques, des entreprises électriques et des spécialistes. C'est ainsi que l'Inspection fédérale des installations à courant fort (ESTI), sous la direction de la centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'OFEV, et en étroite collaboration avec les acteurs du secteur de l'électricité, a élaboré la directive Nr. 248, en vigueur depuis 2012. Ce document a été mis à jour en 2015, puis en 2020, notamment pour inclure le trafic ferroviaire. Il a pour objectif de réduire, à des coûts si possible faibles, les risques sismiques en mettant en œuvre des mesures de prévention servant à éviter une panne d'électricité généralisée de longue durée. Ces mesures de sécurité sismique doivent permettre de réduire à un minimum les dommages directs aux infrastructures. Cet objectif nécessite des mesures efficaces qui augmentent considérablement la robustesse du système. Disposer de solutions pratiques est ici bien plus important que d'effectuer des calculs détaillés.

Les différents acteurs concernés ont déjà fait beaucoup de chemin depuis la publication de la directive ESTI. Comme le montrent les exemples concrets, la construction parasismique est aujourd'hui la norme pour les sous-stations importantes en matière de sécurité de l'approvisionnement. Cela vaut non seulement pour les projets de nouvelles constructions, mais aussi pour l'assainissement d'installations existantes qui doivent être sécurisées pour prévenir les dommages sismiques.

Des types de dommages fréquents

Des analyses de séismes à l'étranger ont montré que la vulnérabilité des sous-stations isolées à l'air s'accroît lorsque le niveau de tension augmente. Les sous-stations dotées de systèmes isolés au gaz ne sont généralement pas critiques. Les lignes aériennes également résistent bien aux séismes la plupart du temps. En général, des dégâts ne surviennent que lorsque les mâts des lignes sont touchés par des événements secondaires tels que les glissements de terrain ou les éboulements. Cependant, un problème majeur qui se présente en cas de séisme est celui des connexions qui n'ont pas suffisamment de mou entre deux appareils à haute tension. Si les connexions se tendent subitement, de grandes forces d'interaction peuvent apparaître qui mènent typiquement à des ruptures des isolateurs. Ces isolateurs sont souvent des éléments fragiles en porcelaine. Ils sont parfois en matière synthétique, laquelle peut aussi subir des ruptures.

Comptent également parmi les problèmes fréquents les dommages sur des transformateurs non ancrés qui, à la suite de secousses sismiques, peuvent basculer. Des dommages peuvent aussi se produire si ces éléments retombent brusquement après s'être momentanément soulevés. Pour empêcher ce type de phénomènes, il faut prévoir des ancrages sur les fondations.

Par ailleurs, il arrive souvent, lors d'un séisme, que des problèmes surviennent avec les éléments non structuraux tels que des armoires de commande, des groupes électrogènes de secours, des batteries de secours ou des équipements auxiliaires qui se sont renversés. Ces installations peuvent par exemple être fixées au mur avec des cornières en acier ou sécurisées avec des câbles spéciaux. Les secousses sismiques menacent également des équipements comme les faux-planchers et les cloisons de séparation. La structure porteuse du bâtiment abritant ce type d'installations doit bien entendu être également conçue pour résister aux séismes.

Directive ESTI Nr. 248 pour la distribution d'énergie

La directive ESTI Nr. 248 s'appuie sur les normes de structures porteuses de la société suisse des ingénieurs et architectes (norme SIA 261), qui doivent être respectées comme reflétant l'état de la technique en vertu des législations cantonales sur la construction. Elle apporte des compléments spécifiques par des dispositions concernant la distribution d'énergie électrique. Leur élaboration a tenu compte des normes internationales pertinentes du secteur de l'électricité ainsi que d'une publication spécialisée de la American Society of Civil Engineers (ASCE). Les dispositions figurant dans la directive ESTI doivent être appliquées dans toute la Suisse, toutes zones sismiques confondues. Elles concernent aussi bien les nouvelles installations que celles existantes lors de renouvellements. En vertu de la loi sur les installations électriques, la mise en œuvre de la directive ESTI Nr. 248 (et donc également des normes SIA liées) est contraignante dans les procédures d'approbation des plans. Dans ce cadre, le domaine Séisme de l'OFEV évalue les dossiers remis à l'ESTI comme autorité unique et, au besoin, formule certaines conditions qui doivent figurer dans la décision d'approbation des plans.

Il est dans l'intérêt et de la responsabilité du gestionnaire de réseau de prendre des mesures préventives de protection contre les séismes afin d'augmenter significativement la sécurité de l'approvisionnement en cas d'événement majeur. Si les mesures sont mises en œuvre dans le cadre de renouvellements d'installations, les coûts supplémentaires sont négligeables. Les coûts peuvent être maîtrisés également dans le cas d'une amélioration de la sécurité sismique pour des installations existantes pour autant que la planification soit réfléchie et la mise en œuvre bien coordonnée.

Aide à l'exécution

- *Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse ; ESTI/OFT, Directive Nr. 248, 2012, Révision 2020*

2.1 Approvisionnement en électricité

Sous-station d'Auwiesen à Zurich (ZH)

Une planification prospective et une bonne coordination

Zurich compte parmi les villes helvétiques où les secousses sismiques peuvent causer des dommages majeurs. Bien que l'aléa sismique soit faible dans la région, les ouvrages ont tendance à être bâtis sur des terrains meubles. Combiné à une forte densité de population et une concentration des valeurs, ceci engendre un potentiel de dommages substantiel. Cela vaut également pour l'infrastructure d'approvisionnement en électricité. Par conséquent, ewz, l'entreprise électrique de la ville de Zurich, a adopté le principe de la construction parasismique.

Ce principe trouve son application notamment dans l'assainissement et dans les nouvelles constructions des 18 sous-stations zurichoises. L'entreprise ewz assure une maintenance préventive, par exemple à la sous-station d'Auwiesen au nord de Zurich. Cette dernière, qui relie le réseau très haute tension de Swiss-grid à l'approvisionnement municipal en électricité, revêt une importance particulière pour la sécurité d'approvisionnement de la ville. Elle est l'une des quatre sous-stations de couplage.

En tant que point d'injection d'importance stratégique, elle doit répondre à des exigences très strictes. Elle nécessite donc davantage de redondances techniques que d'autres

Figure 4

La sous-station d'Auwiesen au nord de la ville de Zurich appartient à la CO III, soit les infrastructures ayant une fonction vitale.



© Winzerpartner

sous-stations, comme une installation auxiliaire d'alimentation ou des moteurs diesel pour l'alimentation électrique de secours.

Une variété de niveaux de tension

Pour pouvoir transporter de l'énergie électrique avec peu de pertes sur de longues distances, il faut le faire à une tension très élevée. Le courant est ainsi acheminé sous très haute tension (220 kV, soit 220 000 volts, ou 380 kV, soit 380 000 volts) dans le réseau de transport à partir de centrales électriques en Suisse ou à l'étranger. Pour faire arriver ce courant jusqu'aux prises domestiques, les fournisseurs d'électricité doivent réduire la tension d'un facteur mille, une opération qui nécessite plusieurs niveaux de réseau. En principe, chaque transformateur modifie l'énergie électrique pour le niveau de réseau inférieur suivant. Le niveau haute tension désigne les plages de tension de 36 kV à 150 kV, le niveau moyenne tension, celles de 1 kV à 36 kV et le niveau basse tension, tout ce qui est inférieur à une tension de 1 kV. C'est dans ce dernier niveau de tension que le courant parvient aux prises de courant domestiques.

Essentielle pour la sécurité de l'approvisionnement

Les travaux de construction destinés à l'adaptation de la sous-station d'Auwiesen, approuvés en 2020 par le conseil municipal de la ville de Zurich, comprenaient plusieurs mesures d'amélioration de la sécurité sismique qui s'appuyaient sur une recommandation de la directive ESTI Nr. 248. Cette recommandation est d'améliorer la sécurité sismique

Figure 5

Dans le cadre des travaux d'amélioration de la sécurité sismique, les transformateurs ont été ancrés aux fondations.



© ewz

des sous-stations existantes si celles-ci sont considérées comme « particulièrement importantes » pour la sécurité d’approvisionnement régionale. Du point de vue des risques, la directive se focalise avant tout sur les installations du niveau de tension le plus élevé, ce qui correspond à la situation de la sous-station de couplage d’Auwiesen, sachant qu’elle transforme l’électricité à partir du niveau de réseau 1 (très haute tension) vers le niveau de réseau 3 (haute tension). La sous-station d’Auwiesen appartient à la classe d’ouvrages III (CO III, ouvrages à fonction d’infrastructure vitale) en raison de son importance pour l’approvisionnement en électricité. Cela signifie que l’action sismique prise en compte pour la vérification de la sécurité structurale est augmentée de 50 % par rapport à des constructions normales. En même temps, l’installation doit continuer de fonctionner après un événement.

La sous-station d’Auwiesen a été mise en service en 1979. À l’époque, le thème de la sécurité sismique n’était pas encore abordé explicitement. Au début du projet d’assainissement lancé en 2018, il a donc fallu procéder à un examen minutieux de l’état des constructions. Les investigations ont montré qu’il était impératif de prendre des mesures d’amélioration de la sécurité sismique du bâtiment. Les autres améliorations comprenaient notamment l’ancrage des transformateurs sur les fondations. Cette mesure permet d’éviter, en cas d’accélération horizontale due à un séisme, que ces derniers ne se renversent ou ne se soulèvent et retombent ensuite de manière brutale.

Figure 6

Détail de la fixation d’un transformateur à des fins de stabilisation, avec des supports latéraux en acier et des plaques métalliques ancrées dans le béton.



© ewz

De grands travaux sans interruption d’exploitation

L’assainissement de la sous-station d’Auwiesen a fait d’une pierre deux coups. En effet, les travaux comprenaient non seulement des mesures visant à garantir la sécurité sismique, mais aussi des améliorations énergétiques. Le plus grand défi de cette opération de modernisation a consisté à effectuer les travaux sans interrompre l’exploitation, dans un champ haute tension à 150 kV.

En 2021, dans le cadre d’une première étape, l’intérieur du bâtiment a été pourvu d’une nouvelle structure en acier améliorant la sécurité sismique de l’installation existante. Ensuite, un toit d’urgence a été installé, qui a été ouvert à plusieurs reprises pour fixer avec précision sur la structure en béton du bâtiment de grands panneaux de façade en bois isolant. Comme la sous-station d’Auwiesen abrite également le centre d’urgence d’ewz, il fallait tenir compte des nombreux ordinateurs et serveurs et de leur sensibilité aux hautes températures. C’est pourquoi il a été nécessaire d’installer, outre le toit d’urgence, un système de refroidissement provisoire du bâtiment.

Grâce à la planification prospective et une bonne coordination de l’ensemble des mesures visant à assurer la sécurité sismique, le projet d’assainissement a pu être achevé en 2023. La première étape a coûté quelque 7,8 millions de francs. L’entreprise ewz souhaite poursuivre dans les années à venir avec le renouvellement et l’amélioration parasismique de l’installation de commutation isolée à l’air de 150 kV.

Figure 7

Renforcement de la structure porteuse existante grâce à une construction en acier qui rigidifie le bâtiment.



© ewz

2.2 Approvisionnement en électricité

Sous-station de Wimmis (BE)

Sécurisation de l'infrastructure existante

Situé à l'entrée du Simmental dans l'Oberland bernois, le village de Wimmis joue un rôle important pour l'approvisionnement en électricité à l'échelle suprarégionale, et ce pour trois raisons. Premièrement, s'y trouve une sous-station avec un poste de conversion de fréquence des CFF, qui injecte de l'énergie dans le réseau de courant de traction, notamment pour couvrir les besoins du tunnel de base du Lötschberg. Deuxièmement, cette sous-station est utilisée par Swissgrid pour la ligne à très haute tension entre Bickingen en Emmental et Chippis dans le district de Sierre (VS) qui y passe. Troisièmement, elle est aussi une installation centrale pour l'entreprise d'énergie bernoise BKW qui approvisionne l'Oberland bernois en électricité.

Deux réseaux, deux fréquences

Le réseau électrique suisse est intégré au réseau interconnecté européen. Il s'agit d'un réseau de courant alternatif qui permet de transformer facilement l'énergie. Pour des raisons historiques, le courant alternatif effectue 50 oscillations par seconde, ce qui correspond à une fréquence de 50 Hz, qui doit être la même dans l'ensemble du réseau interconnecté, pour toutes les centrales et les lignes de transport ainsi que toutes les installations et tous les appareils électriques. En Suisse, c'est la société nationale pour l'exploitation du réseau

Swissgrid qui assure la stabilité du réseau électrique en surveillant et en compensant les écarts éventuels.

Avec sa fréquence d'exploitation de 16,7 Hz, le réseau de courant ferroviaire constitue ici une exception. Au début du XX^e siècle, lorsque l'Allemagne, l'Autriche et la Suisse avaient retenu cette fréquence, il n'était pas encore possible de faire fonctionner de grands moteurs électriques de locomotives à de plus hautes fréquences, car il existait un risque de formation excessive d'étincelles. Comme les pas polaires des générateurs équivalaient à un tiers de la fréquence courante du réseau de 50 Hz, nous nous retrouvons aujourd'hui avec un courant de traction de 16,7 Hz.

Au nœud de réseau de Wimmis se trouvent plusieurs transformateurs du niveau de réseau 2, qui convertissent l'électricité de 220 kV à 50 kV. Un de ces transformateurs à 100 mégavoltampères (MVA) a été remplacé en 2020 dans le cadre d'un projet de maintenance qui avait été agendé il y a longtemps déjà. La question s'était posée de savoir si l'emplacement existant du transformateur, composé d'une fondation et d'un bac de récupération d'huile, allait pouvoir être préservé. L'aspect économique plaide pour ce scénario, mais pas forcément la sécurité sismique exigée par l'ESTI. Étant donné que cet emplacement existait depuis les années 1990, celui-ci ne répondait pas à première vue aux exigences de la directive ESTI Nr. 248 entrée en vigueur en 2012.

Figure 8

La sous-station de Wimmis joue un rôle essentiel dans l'approvisionnement en électricité de l'Oberland bernois.



© BKW

Figure 9

Remplacé en 2020, le transformateur pèse 140 t. Il est construit et relié aux fondations de manière à prévenir tout basculement en cas de séisme.



© BKW

Comme l'ont montré des calculs détaillés, les fondations présentaient cependant des réserves suffisantes pour un ancrage sismique du nouveau transformateur, pesant quelque 140 t, et ce sans grandes mesures constructives. Par ailleurs, il était important pour l'entreprise électrique de trouver une solution simple qui puisse être mise en œuvre rapidement. La phase de transformation devait être aussi courte que possible afin de garantir la sécurité de l'approvisionnement en tout temps dans l'Oberland bernois.

Le risque de dommages aux transformateurs

De nombreux exemples à l'étranger montrent que des dommages aux transformateurs sont l'une des conséquences les plus fréquentes des séismes s'agissant de l'infrastructure électrique. Souvent, ces dommages sont dus au manque d'ancrage des transformateurs et donc à la vulnérabilité de ceux-ci face aux forces d'inertie horizontales engendrées par les accélérations sismiques du sol. Pour éviter le balancement ou le basculement des transformateurs, il faut fixer ceux-ci sur des fondations.

La directive ESTI prévoit plusieurs possibilités d'ancrage pour les transformateurs, allant des fixations démontables, placées directement sur les fondations, aux

modèles démontables avec roues ou sabots d'arrêt en passant par un cadre de renforcement soudé sur plaques d'ancrage coulées dans le béton.

Sécurisation de l'approvisionnement

À la sous-station de Wimmis, la meilleure option était de construire une installation spéciale. Afin d'ancrer le nouveau transformateur, les travaux ont consisté à percer dans les fondations existantes, puis à coller de très longues tiges d'ancrage reliées à des pinces à rails conçues spécialement à cet effet. Le transformateur a ainsi été fixé directement sur le rail grâce à des pinces massives. Cette construction, qui n'a exigé que peu de moyens, permet d'éviter des mouvements intempestifs, voire un basculement du transformateur en cas d'actions sismiques.

Cette solution sur mesure a permis d'assurer en tout temps la sécurité d'approvisionnement souhaitée. Seules cinq semaines de travaux se sont écoulées entre la déconnexion de l'ancien transformateur et la mise en service du nouveau. L'opération s'est révélée avantageuse sur le plan financier également : les charges financières liées à l'amélioration de la sécurité sismique de ce poste correspondent à 2 % environ des coûts totaux du projet.

Figure 10

Des pinces métalliques spécialement conçues pour cette application fixent le transformateur, très lourd, directement sur le rail. Le rail est quant à lui fixé par des cales métalliques des deux côtés, qui sont ancrées par de longues tiges métalliques coulées dans le béton des fondations. Ces mesures permettent d'éviter que l'installation ne roule ou ne bascule.



© BKW

Figure 11

Les connexions entre appareils à haute tension voisins doivent présenter suffisamment de mou pour qu'en cas de séisme, elles ne se tendent pas et ne provoquent pas la rupture des isolateurs.



© Swissgrid

2.3 Approvisionnement en électricité

Sous-station de Romanel-sur-Lausanne (VD)

Modernisation intégrale d'une installation essentielle

Bâtie en 1934, la sous-station de Romanel-sur-Lausanne est une des plus anciennes de Suisse romande. Sa construction est étroitement liée à l'histoire de l'électrification de l'arc lémanique. Aujourd'hui, cette installation, qui est utilisée à la fois par Swissgrid, par l'entreprise électrique Services industriels de Lausanne (SiL) et par les CFF, revêt une grande importance au niveau suprarégional.

Pour continuer d'assurer à l'avenir la sécurité de l'approvisionnement en électricité de cette région densément peuplée, les entreprises d'exploitation ont radicalement transformé l'installation en 2011 pour la porter à la pointe de la technique. Swissgrid a remplacé le vieux poste de couplage aérien de 220 kV par deux nouveaux bâtiments. Le premier bâtiment abrite le nouveau transformateur 380/220 kV ainsi qu'un poste de couplage de 380 kV isolé au gaz ; le second, un poste de couplage 220 kV isolé au gaz. Par ailleurs, la ligne de très haute tension située sur l'axe Ouest-Est entre Bois-Tollot (Genève) et Chamoson (Bas-Valais), qui passait auparavant par la sous-station, a

été reliée aux nouvelles installations. Cette modernisation améliore la stabilité du réseau de transport.

Les SiL ont déjà réaffecté une partie des surfaces autrefois occupées par le poste aérien en construisant un nouveau bâtiment protégeant un poste sous enveloppe métallique 125 kV, deux transformateurs 220/125 kV, deux transformateurs 125 kV moyenne tension et un poste de couplage moyenne tension. En tant que troisième exploitant de la sous-station de Romanel, les CFF ont de leur côté mis en service en 2020 leur nouveau poste de couplage 132 kV isolé au gaz.

Bâtiments et transformateurs parasismiques

Tant les structures porteuses que les éléments non structuraux, les installations et les équipements des nouvelles constructions sont conçus conformément à la série de normes 260 de la SIA et à la directive ESTI Nr. 248 pour la sécurité sismique. Pour remplir les exigences relatives aux secousses sismiques et au vent, on a notamment relié la structure porteuse en bois et béton de la nouvelle halle aux parois stabilisatrices en béton armé, et également rigidifié le toit avec des croisillons. Le bâtiment de Swissgrid pour le poste de couplage 380 kV isolé au gaz dispose de quatre niches distinctes en béton armé pour chacun des quatre transformateurs. L'un des défis majeurs de ce projet était de

Figure 12

Vue d'ensemble des nouvelles installations parasismiques à la sous-station de Romanel-sur-Lausanne, qui accueille les exploitants Swissgrid, SiL (entreprise locale d'approvisionnement en énergie) et les CFF.



Figure 13

Dans les nouvelles constructions, les transformateurs sont fixés sur des plaques en acier solidement ancrées dans les fondations fortement armées.



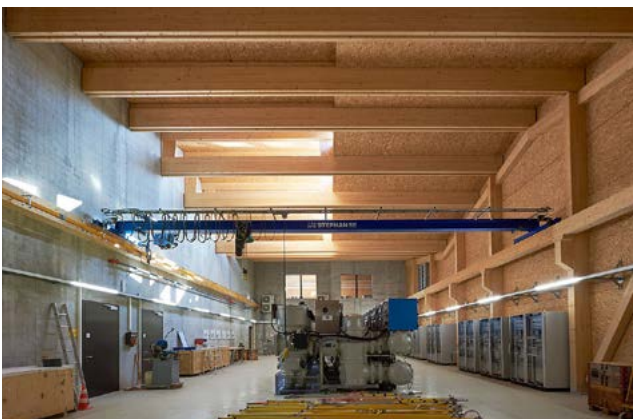
bétonner en une fois les parois de 14 m de haut. Du moment que les parois porteuses soutiennent suffisamment le toit même en cas de séisme et qu'elles ne s'écroulent pas sur les transformateurs, elles ne sont soumises à aucune exigence relative à la déformation.

Une autre mesure d'amélioration de la sécurité sismique a consisté à réaliser un ancrage optimal des transformateurs dans les différentes installations de la sous-station. Contrairement à certaines installations existantes qui doivent revoir leur équipement a posteriori, cet aspect central a pu être pris en compte dès le début dans les installations de Romanel.

Tous les exploitants ont remplacé leurs vieux transformateurs dans le cadre de cette modernisation. Dans le bâtiment des SiL par exemple, les transformateurs ont été vissés à des plaques d'ancrage fixées avec des goujons dans le socle. Dans le bâtiment de Swissgrid, les transformateurs ont été soudés sur des plaques d'acier encastrées dans le béton. Plus un transformateur est élancé, plus il a de chances de se renverser. Lors du remplacement et du renouvellement de telles installations aux puissances élevées, un certificat sismique du fabricant est nécessaire. Cela permet de garantir qu'un transformateur supportera certaines accélérations sans tomber en panne.

Figure 14

Le nouveau bâtiment pour la sous-station de couplage des Services industriels de Lausanne (SiL) est conçu en béton, avec certains éléments en bois qui réduisent les forces d'inertie à l'œuvre en cas de séisme.



© Kurmann Cretton Ingénieurs, Monthey

Des connexions flexibles pour résister aux séismes

Dans une sous-station, la connexion aérienne entre deux appareils doit avoir suffisamment de mou pour que les appareils puissent osciller indépendamment l'un de l'autre en cas de séisme sans que la connexion ne se tende. Sinon, de grandes forces d'interaction peuvent apparaître et entraîner des ruptures des isolateurs. Étant donné qu'à Romanel, les connexions entre les postes de couplage isolés au gaz et les transformateurs sont principalement souterraines, il n'a dans de nombreux cas pas été nécessaire de calculer le besoin de mou. Le site de Romanel comporte des lignes aériennes notamment entre le poste GIS de 380 kV et les transformateurs dans la zone des portiques des lignes à haute tension. Les ingénieurs ont calculé qu'il fallait un mou de 75 mm à cet endroit. Il est essentiel de déterminer correctement cette valeur, car une valeur trop faible ne permet pas d'assurer une sécurité sismique suffisante. À l'inverse, si la valeur est trop élevée, il existe un risque en matière de résistance face aux courts-circuits.

À Romanel, les coûts des mesures de sécurité sismique dans le bâtiment des SiL se sont élevés à quelque 20 000 francs et chez Swissgrid à environ 30 000 francs. Par comparaison avec le montant total des travaux de modernisation de la sous-station, qui dépassait la dizaine de millions, les charges liées aux mesures parasismiques représentaient uniquement quelques pour mille.

Figure 15

À Romanel, les connexions entre les postes de couplage isolés au gaz et les transformateurs sont avant tout souterraines. S'il est en général important de garantir assez de mou, cet aspect ne joue pas un rôle essentiel ici.



© Kurmann Cretton Ingénieurs, Monthey

Sécurité publique

3 Chaque minute compte en cas de séisme

Lorsque la terre tremble, les services d'urgence doivent impérativement rester opérationnels. Si la prévention face aux séismes est prise en compte suffisamment tôt dans la planification de nouvelles constructions, les frais supplémentaires sont presque négligeables. Même les bâtiments existants peuvent être mis aux normes de sécurité pour un coût raisonnable.

Après un séisme, chaque heure, voire chaque minute compte. Durant les premières heures qui suivent un séisme, les services d'urgence ont des chances relativement élevées de retrouver des survivants dans les décombres. Cependant, la probabilité qu'une victime reste en vie dans les gravats décroît rapidement après 24 à 36 heures. C'est pourquoi le sauvetage rapide des personnes sous les décombres est une priorité absolue. Or les interventions ne sont possibles que si les services d'urgence restent complètement opérationnels, et ce sans délai. Leurs centrales, leurs dépôts et leurs garages doivent donc respecter des exigences élevées en matière de sécurité sismique.

La norme SIA 261 place ce type d'ouvrage dans la classe d'ouvrages (CO) III, soit les ouvrages qui sont considérés comme des infrastructures vitales. Cela implique d'apporter la preuve de leur sécurité structurale, mais pas seulement. Il faut également garantir l'aptitude au service de la structure porteuse ainsi que des éléments non structuraux et autres installations et équipements (ENIE). Comme le montrent certains événements survenus à l'étranger, le bon fonctionnement d'un ouvrage vital ne dépend pas que de la robustesse de la structure porteuse, mais aussi, et dans une large mesure, de la sécurité sismique des ENIE. Le fonctionnement peut être considérablement entravé, voir connaître un arrêt complet, s'il y a blocage des portes de garage, chute des revêtements de plafond, renversement d'étagères, endommagement des conduites d'eau, panne des générateurs de secours ou dysfonctionnement des systèmes électriques ou de communication.

Une planification exigeante

La mise en œuvre des exigences techniques relatives aux ouvrages de CO III est relativement pointue, ce qui s'est régulièrement traduit dans la pratique par une certaine confusion, par exemple en ce qui concerne les responsabilités en matière de sécurité des ENIE. Afin de clarifier certains points, l'OFEV a publié le document « Sécurité sismique en cas de fonction vitale ». Cette publication montre comment aborder les aspects de sécurité sismique des ouvrages de CO III, en expliquant également les différentes responsabilités lors des processus de planification et de construction.

Plus les personnes concernées posent tôt les jalons pour la construction parasismique et plus la collaboration entre les divers partenaires de projet est étroite, plus la mise en œuvre sera réussie. Le maître d'ouvrage doit, dès la phase de définition des objectifs, où il s'agit de cerner les besoins spatiaux et les solutions possibles, fixer les objectifs et les exigences pour la sécurité sismique. Elle doit ensuite, à la phase des études préliminaires, définir un projet et élaborer de premiers cahiers des charges, en tenant compte de la protection contre les séismes ; cet aspect doit impérativement figurer dans les appels d'offres. Planifier de manière précoce permet de maintenir les charges financières liées à la prévention face aux séismes à un faible niveau. À défaut, si les adaptations sont réalisées à une étape tardive du processus de planification, voire seulement durant les travaux de construction, les coûts sont nettement plus élevés.

Assurer les fonctions vitales

Lors de l'amélioration de la sécurité sismique d'ouvrages vitaux existants, il est également possible de maîtriser les coûts pour autant que la planification soit bien réfléchie. Cela commence par un examen professionnel des différents points figurant dans la norme SIA 269/8 « Maintenance des structures porteuses – Séismes ». On recherche en particulier les défauts de conception et de construction exerçant une influence sur la sécurité sismique. Un facteur de conformité calculé par des spécialistes du génie civil indique dans quelle mesure les exigences relatives à la sécurité sismique sont respectées du point de vue des normes actuelles pour les structures porteuses. Un facteur de conformité minimal de 0,4 est exigé pour les ouvrages de CO III. Il faut cependant viser un facteur de 1,0, qui signifie que les exigences sont entièrement satisfaites. Il est tout à fait compréhensible que les ouvrages vitaux doivent répondre pleinement aux exigences actuelles, car ceux-ci doivent continuer de fonctionner en cas de séisme important. Il y a lieu de commencer par définir toutes les fonctions qui doivent impérativement être maintenues en cas d'événement. Cette liste doit permettre de déterminer quelles sont les composantes du bâtiment nécessaires pour garantir la fonction vitale. Il est possible de sécuriser de nombreux éléments à moindre coût. La publication de l'OFEV « Sécurité sismique des éléments non-structuraux et autres installations et équipements » fournit de multiples recommandations et conseils pratiques en la matière (cf. chap. 1).

Gestion de crise en cas de séisme

Malgré toutes les mesures de prévention, le risque résiduel de dommages n'est jamais nul. Par conséquent, la gestion de crise et de la continuité d'activité revêt un rôle de premier plan. Les services d'urgence disposent de plans d'urgence et ont établi des processus destinés à réduire à un minimum, si possible à empêcher les interruptions d'exploitation, par exemple en cas de pannes d'électricité. Les plans d'urgence doivent traiter spécifiquement les particularités des séismes telles que des dommages complexes, le dysfonctionnement éventuel de l'alimentation en courant de secours, les difficultés de communication ou encore le manque de personnel. Comme il est en partie nécessaire d'agir dans ce domaine, l'OFEV a préparé une publication pour aider les exploitants d'infrastructures à vérifier leurs plans (cf. chap. 1).

Aide à l'exécution

- *Sécurité sismique en cas de fonction vitale – Ouvrages de la classe d'ouvrages (CO) III selon la norme SIA 261 ; OFEV, UW-2310-F, 2023*

3.1 Sécurité publique

Centrale d'engagement à Sierre (VS)

De l'élastomère pour absorber les secousses sismiques

Les dangers naturels sont particulièrement importants en Valais. Au cours des dernières décennies, le canton a dû faire face à plusieurs crues, éboulements et incendies. Ces événements ont montré que le succès des interventions dépend fortement de la bonne coordination des services de secours. C'est ainsi que le canton a décidé de regrouper sur un seul site à Sierre les centrales d'alarme de la Police cantonale 112, 117, du feu 118 et de l'Organe cantonal valaisan des secours (OCVS) 144, de même que de l'Organe cantonal de conduite (OCC). Ce nouveau site devrait également abriter un centre de calculs destiné à assurer la continuité opérationnelle du centre de calculs principal du canton situé en ville de Sion. La distance entre les deux villes garantit que les deux centres ne sont pas touchés simultanément en cas d'événement (redondance géographique).

La nouvelle centrale d'engagement est composée d'un socle massif sur lequel prend place un volume vitré de deux niveaux. Les véhicules d'intervention sont stationnés

au rez tandis que des espaces de travail sont aménagés aux étages. Accessible, la toiture est dévolue à des installations techniques.

Désolidarisé des accélérations du sol

L'exploitation de la centrale doit continuer même en cas de fort séisme. En Valais, il faut s'attendre à des séismes pouvant atteindre une magnitude de 6,5 sur l'échelle de Richter. Le dernier séisme important (magnitude de 5,8) s'est produit en 1946 à Sierre. Le maître d'ouvrage a fait analyser sur place les caractéristiques du sol de fondation dans les détails et a modélisé le comportement des ondes sismiques pour une période de retour de près d'un millénaire. Sur la base de ces informations, les spécialistes calculent les actions sismiques sur le site concerné et déterminent les mesures nécessaires pour un bâtiment de la CO III.

Le maître d'ouvrage a opté pour une isolation sismique en raison des importants mouvements du sol attendus. Grâce à des appuis spéciaux, le corps du bâtiment est ainsi désolidarisé du sol de fondation et donc des sollicitations du sol. Ce procédé est déjà utilisé depuis des décennies par des pays menacés par un aléa sismique élevé tels le Japon, les États-Unis ou la Nouvelle-Zélande. En Suisse, cette méthode efficace mais exigeante du point de vue de

Figure 16

Le nouveau site de Sierre en Valais regroupe les centrales d'alarme de la Police cantonale et du feu, l'Organe cantonal valaisan des secours et l'Organe cantonal de conduite. Cette nouvelle construction continue à assurer son rôle même après un séisme.



© urbistondo + martinez architectes

Figure 17

Une trame constituée d'éléments en béton posée sur des pieux flottants constitue la fondation pour l'isolation sismique de cette nouvelle construction.



© structurame

la construction n'est que rarement employée, par exemple pour améliorer la sécurité sismique des bâtiments existants, comme pour la centrale des sapeurs-pompiers de la ville de Bâle.

Isolation sismique

La nouvelle construction à Sierre utilise 74 appuis en élastomère et 14 appuis glissants. Ces composants sont reliés par une trame constituée d'éléments en béton posée sur des piliers flottants. Si le sol de fondation bouge, les isolateurs absorbent les secousses et réduisent les forces d'accélération qui agissent sur l'ouvrage. Les coûts de cette solution ne sont pas plus élevés que ceux d'une construction traditionnelle, car l'isolation sismique réduit les actions sismiques sur la structure porteuse (murs, dalles, système de fondations). Cela permet notamment d'utiliser des pieux moins larges et en quantité moindre. Les coûts supplémentaires engendrés par l'isolation se voient ainsi compensés.

Grâce à l'isolation sismique, les éléments non structuraux et autres installations (techniques) et équipements (ENIE) sont globalement mieux protégés. Il reste cependant certains risques résiduels qu'il convient de réduire autant que possible. Bien que la formule figurant dans la norme SIA 261 pour estimer la force horizontale sur les éléments non structuraux ne s'applique pas aux ouvrages dotés

d'une isolation sismique, l'ingénieur civil mandaté a émis des recommandations de fixation des ENIE sur la base de cette formule conservatrice. Ces recommandations ont été reprises dans les appels d'offres. Pour chaque élément de l'ouvrage (de la porte de garage aux cloisons de séparation en passant par les câbles électriques), les responsables de la planification ont élaboré des solutions spécifiques en collaboration avec les artisans.

Figure 18

Vue du ciel, la trame de la structure porteuse en béton pour la centrale d'engagement de Sierre est particulièrement bien visible.



© freyssinet

Figure 19

Si le sol de fondation bouge du fait d'un séisme, les appuis en élastomère jouent le rôle d'isolateurs. Ils absorbent les secousses et réduisent l'accélération qui agit sur l'ouvrage.



© structurame

3.2 Sécurité publique

Nouveau siège administratif de l'ECA à Lausanne (VD)

Des dalles à corps creux pour soulager la structure porteuse

Au cours des deux dernières décennies, la population du canton de Vaud a fortement augmenté. Corollaire de cette évolution, le volume de travail de l'entreprise chargée d'assurer les biens immobiliers du canton ECA n'a fait qu'augmenter. En 2014, l'ECA a donc décidé, en collaboration avec des organisations partenaires du nord de Lausanne, de bâtir un nouveau siège administratif pour ses quelques 300 collaborateurs. L'objectif était d'abriter dans ce nouveau bâtiment les bureaux et les locaux de formation de l'ECA, mais pas seulement. Le site s'est également donné pour but d'accueillir les centrales d'urgence des sapeurs-pompiers, de la police et des services de secours, la centrale téléphonique des médecins de garde et celle de la gestion coordonnée du trafic de l'agglomération Lausanne-Morges CGTA ainsi que le poste de commandement des opérations de l'État-major cantonal de conduite (PCO-EMCC) et de la protection civile. Ce regroupement de centrales d'urgence et téléphoniques

ainsi que de commandement comporte de nombreux avantages en cas d'événement, mais cette concentration constitue également un risque. C'est pourquoi le maître d'ouvrage (aussi en raison des risques sismiques) a formulé des exigences très élevées pour la sécurité de la nouvelle construction.

La légèreté des dalles pour diminuer les forces d'inertie

Le bâtiment de sept étages comprend deux étages de stationnement en sous-sol, les centrales et les postes de commandement au rez-de-chaussée et à l'entresol ainsi que des bureaux et des locaux de formation dans les étages supérieurs. Il dispose d'une cour intérieure à ciel ouvert et de parois en verre spectaculaires de tous les côtés, en l'absence totale de murs d'enceinte. La construction est stabilisée par les parois massives des sept cages d'escalier et d'ascenseur disposées de manière symétrique sur les quatre côtés du bâtiment. Pour limiter autant que possible les actions horizontales en cas de séisme, tous les étages sont dotés de dalles à corps creux selon le système Cobiax. Dans ces dalles en béton armé sont logées des centaines de milliers de corps creux sphériques en plastique recyclé. Ces corps creux diminuent le poids des dalles et donc la

Figure 20

Le nouveau siège administratif de l'assurance vaudoise des bâtiments à Lausanne accueille notamment les centrales d'urgence des sapeurs-pompiers, de la police et des services de secours.



© ECA, Lausanne

Figure 21

La cour intérieure, entourée de baies vitrées, apporte beaucoup de lumière au nouveau bâtiment de l'ECA, tandis que la construction relativement légère limite les forces d'inertie horizontales dues aux séismes.



© ECA Lausanne, Architram

charge sur les fondations et sur le squelette de l'ouvrage sans toutefois réduire la fonction statique. En cas de séisme, la masse mise en oscillation est moindre que dans le cas d'une construction conventionnelle massive. Cela réduit d'autant plus les forces d'inertie que le système de stabilisation doit reprendre.

La redondance pour garantir l'exploitation

Bien que les plans de cette construction à 130 millions de francs remontent à 2018, l'ouvrage répond aux exigences de la CO III de la norme SIA 261 dans sa version actualisée de 2020. La planification avait en effet déjà tablé sur les valeurs de référence en vigueur aujourd'hui pour calculer les accélérations du sol sur le rocher de la zone sismique Z1b. Cette nouvelle zone sismique comprend de vastes régions de Suisse occidentale, et notamment la ville de Lausanne.

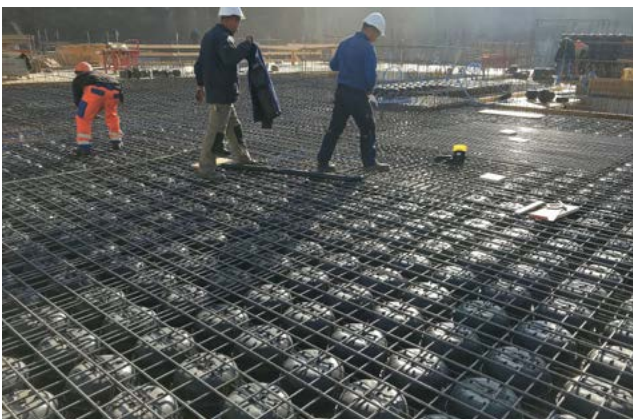
Les spécialistes ont tenu compte de deux aspects pour sécuriser les éléments non structuraux et les équipements fixes. D'une part, il s'agissait de protéger la vie des personnes dans l'ensemble du bâtiment. Pour ce faire, on a fixé toutes les parois de mur non porteuses aux dalles à l'aide d'équerres en acier, parfois avec un renforcement en

fibres de verre. D'autre part, il fallait aussi garantir le bon fonctionnement des centrales d'alarme et de commandement même après un séisme majeur, ce qui a nécessité des mesures constructives et d'organisation particulières. À ce titre, le maître d'ouvrage a respecté scrupuleusement les exigences de la norme européenne EN 50 518 pour les centrales d'alarme. C'est ainsi, par exemple, que les câbles électriques et de fibre optique, les installations de ventilation et les tableaux de distribution sont installés avec des lignes en double pour des raisons de sécurité. Les supports de données sont également redondants. En effet, le centre de données interne est complété par un second centre de calculs situé à Échallens, à 15 km de distance.

Pour la planification des mesures, l'ECA s'est fait accompagner très tôt par un bureau d'ingénieurs spécialisé, auquel il a demandé de réaliser une analyse des risques. Lorsque les mesures nécessaires à garantir les fonctions vitales sont définies avant le début des travaux de construction, les coûts sont bien plus bas.

Figure 22

Des corps creux sphériques en plastique recyclé réduisent le poids des dalles en béton armé. La masse mise en oscillation en cas de séisme est ainsi moins importante.



© ECA, Lausanne

Figure 23

Des câbles en acier ancrés au sol et des connexions flexibles garantissent le fonctionnement de l'alimentation électrique de secours après un séisme.



© ECA, Lausanne

3.3 Sécurité publique

Centre logistique de la GVZ à Bülach (ZH)

L'assainissement comme opportunité d'améliorer la sécurité sismique

La GVZ est chargée dans le canton de Zurich non seulement de l'assurance immobilière et de la prévention, mais aussi, selon son mandat légal, de la direction stratégique et de la surveillance, de l'alarme, de la formation et de l'équipement des services du feu. À Bachenbülach, la GVZ exploite un centre logistique avec un stock de produits neufs, qui contient tout le matériel obligatoire pour les services du feu. Les centres d'incendie et leurs organisations partenaires du domaine de la protection de la population (p. ex. police, services de secours et protection civile) peuvent ainsi aller y chercher les produits qu'ils ont commandés, notamment les tuyaux, les outils, les vêtements et d'autres produits de travail. Une équipe de soutien matériel assure l'accès 24 heures sur 24 en cas d'urgence grâce à un service de piquet. Dans les cas les plus urgents, l'équipe peut livrer elle-même le matériel manquant avec son propre véhicule. Par ailleurs, ce centre logistique assaini dispose au 2^e étage d'espaces de bureaux pouvant accueillir une centrale d'engagement supplémentaire en cas d'événement (à côté du site principal de l'aéroport de Kloten).

Figure 24

Le centre logistique de l'assurance zurichoise des bâtiments à Bachenbülach sert d'entrepôt pour le matériel de sauvetage des services du feu et de secours, de la police et de la protection civile.



© GVZ, Zürich

Un examen qui révèle certaines faiblesses

Comme ce bâtiment, qui a pris la fonction de centre logistique en 2010, joue un rôle important dans la maîtrise des événements, il appartient aujourd'hui à la CO III. Auparavant, il servait d'entrepôt à hauts rayonnages pour une entreprise privée. La GVZ a fait intégralement assainir ce bien acquis en 2008. La réaffectation du bâtiment à la CO III a impliqué de mettre en œuvre des mesures parasismiques. L'idée était de garantir que le matériel nécessaire en urgence après un événement sismique puisse être livré sans délai aux services du feu et de secours et qu'aucun membre du personnel ne soit exposé à des dangers.

Un examen de l'ouvrage commandé par la GVZ, qui visait à évaluer l'état de ce bâtiment de 1997 s'agissant des actions du vent, de la neige et des séismes, a révélé des faiblesses manifestes. Avec un facteur de conformité de 0,3 seulement, la structure en acier existante, son aile attenante en construction massive en béton armé et le sous-sol également bétonné étaient loin de remplir les exigences sismiques de la norme SIA 261 (état de 2003 à l'époque). Comme la structure en acier est relativement flexible et que celle en béton armé couplée est plutôt rigide, des secousses sismiques induiraient des oscillations différentes dans ces parties du bâtiment. S'ensuivraient des sollicitations mutuelles supplémentaires dans l'aile en

Figure 25

Pour reprendre les forces sismiques des étages supérieurs dans le bâtiment existant, la GVZ a fait bâtir de nouvelles parois et renforcer les piliers existants.



© GVZ, Zürich

béton et la structure en acier. L'aménagement intérieur n'était pas conforme aux normes non plus. L'ancrage des hauts rayonnages et la robustesse de la cage d'ascenseur dans le tract en béton étaient insuffisants.

Un facteur de conformité de 100 %

Pour désolidariser de façon constructive la structure en acier flexible de l'aile en béton rigide, des travaux ont remplacé les connexions rigides (appuis fixes) sur le côté de la construction massive par des appuis mobiles sur le plan horizontal (appuis libres). Ainsi, la structure en acier de la halle n'était plus rigidifiée que dans le sens transversal. Afin de rétablir une stabilité suffisante, la GVZ a fait construire dans l'entrepôt un étage intermédiaire en béton, qui a été relié à la structure porteuse principale. Les hauts rayonnages en tant que tels ont été mieux ancrés dans les dalles en béton avec des profilés en acier supplémentaires.

Des mesures constructives ont également été prises pour l'aile en béton, car une des parois extérieures est fortement sollicitée en raison de l'emplacement décentré du noyau de la cage d'escalier et de la torsion ainsi générée. Dans le but de mieux transmettre les forces horizontales agissant ici, les ouvertures de fenêtre de ce côté ont été bétonnées. Par ailleurs, la cage d'ascenseur a été renforcée sur l'extérieur à l'aide d'armatures collées composées

de fibres de carbone (lamelles PRFC). Pour rigidifier le sous-sol et transmettre les forces sismiques à partir des étages supérieurs, de nouvelles parois ont été montées au sous-sol et les colonnes existantes ont été renforcées.

Par tous ces travaux, la GVZ a réussi à améliorer le bâtiment au point qu'il obtient un facteur de conformité de 1,0, en d'autres termes de 100 %. Les coûts d'amélioration de la sécurité sismique se montent à quelque 250 000 francs, soit environ 7 % de l'ensemble des coûts totaux d'assainissement. Le bénéfice s'étend toutefois au-delà de la sécurisation de cet entrepôt et de ses fonctions. En menant à bien ces travaux d'assainissement, la GVZ, en tant que prestataire d'assurances contre les séismes et actrice majeure de prévention, augmente sa crédibilité et son rayonnement.

Figure 26

Les hauts rayonnages, qui n'offraient pas une sécurité sismique suffisante, ont été dotés de profilés en acier supplémentaires pour assurer un meilleur ancrage dans les dalles en béton.



© GVZ, Zürich

Figure 27

Derrière les structures métalliques vissées dans le sol, on aperçoit à intervalles réguliers les piliers en béton de l'entrepôt, peints en blanc.



© GVZ, Zürich

Santé

4 Protection des établissements de santé vitaux

En cas de séisme majeur, il faut s'attendre à de nombreux blessés dans les zones concernées et, en principe, à un dépassement des capacités des établissements de santé régionaux. C'est pourquoi les infrastructures vitales doivent conserver leur pleine capacité d'intervention, dans l'attente de renforts extérieurs. La sécurité sismique des hôpitaux de soins aigus, des urgences, des salles d'opération, des pharmacies des hôpitaux et des centres de renfort des services de secours est donc de toute première importance.

De manière générale, les soins de santé en Suisse sont l'affaire des cantons, bien que certains aspects soient réglementés dans la législation fédérale. En 2021, sur les 276 hôpitaux du pays, 47 étaient des entreprises publiques et ont traité environ 40 % (plus de 1,4 million) des cas nécessitant des soins stationnaires. La majorité des hôpitaux en Suisse (près de 38 000 lits au total) sont exploités par des sociétés anonymes, des entreprises individuelles, des coopératives, des associations et des fondations. Si ces hôpitaux s'engagent auprès de leur canton d'implantation, dans le cadre d'une convention de prestations, à assurer les soins médicaux de la population, alors ils sont habilités à facturer leurs prestations aux caisses-maladie dans le cadre de l'assurance de base. Pour les exploitants d'hôpitaux, être admis dans la liste des hôpitaux d'un canton est également un point essentiel, dans la mesure où les cantons supportent 55 % des frais des hospitalisations stationnaires dans ce cas. Afin d'éviter que toutes les cliniques offrent chacune l'ensemble de la palette de prestations médicales, les cantons prescrivent également des domaines de spécialité.

En employant plus de 230 000 personnes pour un chiffre d'affaires de près de 31 milliards de francs, les hôpitaux font partie des principaux employeurs et secteurs du pays. Déjà vitale en temps normal, leur fonction serait d'autant plus importante dans le cas d'un séisme de forte magnitude tel celui qui s'est produit en région bâloise en 1356.

Des hôpitaux surchargés

Des expériences faites par des pays étrangers renseignent sur les éléments auxquels les établissements de santé

seraient confrontés si un tel événement se produisait aujourd'hui. Le nombre de personnes blessées par les décombres dépasserait rapidement les capacités de soins des hôpitaux des régions concernées, sur le plan des ressources en personnel comme des ressources matérielles. Selon l'événement et le flux de patients, le fonctionnement des hôpitaux serait largement entravé. D'autres facteurs qui pourraient limiter les capacités de soins des blessés sont des dysfonctionnements techniques et relevant de la construction, des problèmes d'approvisionnement pour les biens d'infrastructure essentiels (eau potable et électricité notamment) et un manque de personnel. De fait, seule une partie du personnel des hôpitaux serait opérationnelle, car certaines de ces personnes seraient également blessées ou occupées à prendre soin de personnes de leur entourage ayant été touchées par l'événement.

Dans la plupart des cas, les grandes crises dépassent les capacités de rétablissement d'une région, également dans le domaine de la santé. C'est pourquoi il est nécessaire d'aller chercher des ressources en externe pour les établissements de soin encore fonctionnels, par exemple sous la forme de personnel médical, de matériel sanitaire et de moyens techniques. Un autre aspect essentiel est la nécessité de décharger les hôpitaux situés près de l'épicentre en transportant les blessés graves dans d'autres hôpitaux hors de la zone touchée.

La fonction vitale des bâtiments hospitaliers

Afin d'éviter que les ouvrages vitaux comme les hôpitaux cessent de fonctionner exactement au moment où nous en avons le plus besoin, la norme SIA 261 définit des exigences

concrètes pour garantir le fonctionnement de certains bâtiments après un séisme important. Ainsi, les hôpitaux sont catégorisés par cette norme dans la classe d'ouvrages (CO) III, soit celle soumise aux plus hautes exigences de sécurité. Les ouvrages appartenant à la CO III doivent disposer d'une structure robuste capable de supporter des secousses sismiques majeures sans subir de dégâts. Pour ces ouvrages, il est en outre indispensable de garantir l'aptitude au service des ENIE nécessaires pour que l'ouvrage puisse remplir sa fonction vitale.

Ce type d'ouvrages est requis pour maîtriser les événements sismiques et en particulier pour sauver des vies humaines. Dans le secteur de la santé, cela concerne avant tout des bâtiments hospitaliers abritant des services liés aux soins aigus. On citera notamment les garages d'ambulances, les services d'urgence, les salles d'opération, les unités de soins intensifs ainsi que les départements s'occupant des prématurés et des nouveau-nés atteints de maladies. Appartiennent en outre à la CO III les ouvrages servant au stockage de matériel de secours et de sauvetage ainsi que les centrales d'engagement des services de secours et leur infrastructure de communication. Afin que ces services d'urgence puissent accomplir leurs tâches, il faut par ailleurs que l'approvisionnement en biens essentiels comme l'eau et l'électricité soit garanti.

L'importance du comportement des structures porteuses

Dans son document « Sécurité sismique en cas de fonction vitale » de 2023, l'OFEV a montré que les infrastructures concernées peuvent être protégées de manière efficace. Plus le comportement d'une structure porteuse est favorable eu égard à l'action sismique, moins grande est la probabilité de dommages à l'ouvrage et à ses dispositifs techniques et donc de dysfonctionnement qui pourrait menacer, voire entraver complètement l'aptitude au service. Pour les nouvelles constructions ou les assainissements majeurs, la centrale de coordination pour la mitigation des séismes de l'OFEV recommande par conséquent d'éviter les variations et les asymétries des systèmes de contreventement en plan et en élévation. Si les fondations reposent sur un terrain régulier et rigide, la structure porteuse conçue de la sorte présentera un comportement favorable eu égard à l'action sismique. Cela vaut autant pour la structure porteuse elle-même que pour les ENIE reliés à elle. Des

modes d'oscillation défavorables de la structure porteuse (en particulier les modes torsionnels autour de l'axe vertical de la structure) peuvent entraîner des accélérations non souhaitées et par là même des déformations des ENIE.

La conception d'une structure porteuse parasismique répondant aux exigences de la CO III implique, dès une phase précoce de planification, une collaboration étroite entre les différents spécialistes des domaines de l'architecture et du génie civil. Le comportement de la structure porteuse en cas de séisme est déterminé non seulement par le concept structurel général, mais aussi par le choix des matériaux de construction et par les dispositions constructives de l'ouvrage.

Aide à l'application

- *Sécurité sismique en cas de fonction vitale – Ouvrages de la classe d'ouvrages (CO) III selon la norme SIA 261 ; OFEV, UW-2310-F, 2023*

4.1 Santé

Nouveau service de secours de l'hôpital d'Uster (ZH)

Les secours doivent pouvoir intervenir en tout temps

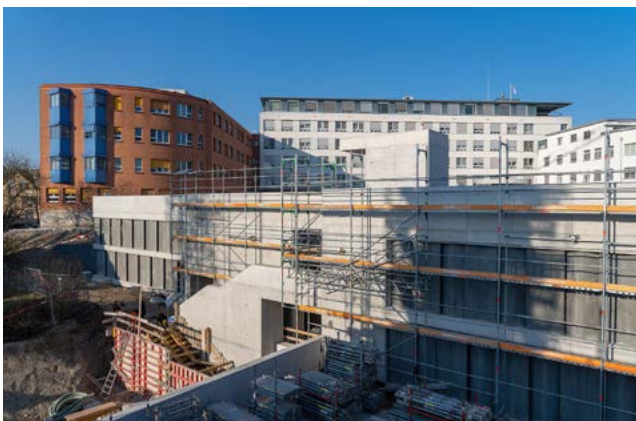
L'hôpital d'Uster assure les soins médicaux de plus de 170 000 personnes dans l'Oberland zurichois ainsi que dans le Glatttal. L'établissement est soutenu par plusieurs communes de la région, qui ont fondé pour ce faire une société anonyme. La zone de desserte de l'hôpital comprend, notamment en raison de la taille des populations respectives, les zones urbaines d'Uster, de Dübendorf, de Volketswil, de Pfäffikon et de Maur. Chaque année, l'hôpital d'Uster soigne jusqu'à 80 000 personnes, que ce soit en mode ambulatoire ou stationnaire. Cet établissement du canton de Zurich figure ainsi parmi les plus importants fournisseurs de soins de la région. Avec les quelque 1300 personnes qu'il emploie, il est par ailleurs le plus grand employeur d'Uster.

De nouveaux espaces pour le service de secours

L'hôpital est rattaché à un service de secours qui dispose d'un poste principal sur place et d'un centre d'appui à Dübendorf, avec une flotte qui totalise sept véhicules de secours. Une quarantaine de collaborateurs assurent un service à toute heure du jour et de la nuit et réalisent près de 7500 interventions par an. Dans 500 cas environ par an, les blessés et les malades sont des personnes dont le pronostic vital est engagé.

Figure 28

En raison de la fonction vitale d'infrastructure, la structure porteuse de la nouvelle construction en béton de l'hôpital d'Uster est conçue pour résister à un séisme majeur d'une période de retour d'environ 1000 ans.



© Metron, Roger Trottmann

Le service de secours devait composer depuis plusieurs années avec des locaux dans lesquels il se trouvait à l'étroit, ce qui posait certaines difficultés au quotidien. Une solution a vu le jour mi-août 2022, après deux ans de travaux de construction de nouveaux bâtiments de service. Le service de secours dispose désormais de 60 % de place supplémentaire. Le sous-sol du nouveau bâtiment du poste de secours abrite une centrale énergétique qui valorise des copeaux de bois de la région et approvisionne la région d'Uster Nord en chaleur climatiquement neutre. Une impressionnante cheminée fait la transition entre la construction et le nouveau parc public de l'hôpital situé derrière le bâtiment du service de secours. Un parking couvert sur trois étages, qui sert pour ainsi dire de socle à ce bâtiment, accueille jusqu'à près de 360 véhicules. L'ouvrage comprend, outre le rez-de-chaussée et son garage pour les véhicules de secours et des zones de travail pour les tâches nécessaires avant et après les interventions, un étage supérieur où sont aménagés des salles de séjour, des vestiaires, des locaux de piquet pour les équipes d'intervention ainsi que des bureaux et une salle de formation et de rapport.

Bien équipé en cas d'urgence

Du point de vue géologique, la zone où se situe l'hôpital est caractérisée par d'épais dépôts morainiques issus de l'ère glaciaire avec des couches de graviers de plusieurs mètres d'épaisseur. Uster est situé dans la zone sismique Z1a, une zone exposée à un aléa relativement faible. La classe de terrain de fondation (CTF) s'appliquant à cette zone est la CTF B. Cependant, en raison de la fonction

Figure 29

Le nouveau bâtiment robuste avec parking et centrale d'énergie et de secours constitue la bordure latérale du parc de l'hôpital.



© Spital Uster

vitale de l'ouvrage, la planification et l'exécution se font selon les exigences de la CO III. La structure porteuse est donc conçue pour un aléa ayant une période de retour de 1000 ans environ. La probabilité d'un dépassement des valeurs correspondant au séisme de dimensionnement considéré ne s'élève ainsi qu'à 5 % pour les 50 prochaines années. Pour les ouvrages conventionnels appartenant à la CO I, cette valeur est de 10 %.

Pour le garage à véhicules, la classification en CO III implique que l'aptitude au service doit être garantie en tout temps. Ainsi, en cas d'événement, les véhicules de secours doivent pouvoir quitter le bâtiment. Partant, la porte du garage ne doit en aucun cas rester bloquée. À Uster, le rail de guidage de la porte de garage est donc ancré dans le béton armé par des vis sur des pattes de fixation en acier à trous oblongs. Il est également essentiel de prévoir une fixation parasismique pour les portes menant de l'étage supérieur au garage. Le personnel de secours doit pouvoir rejoindre le garage aussi bien depuis l'extérieur que par la porte latérale à l'intérieur du bâtiment. Pour les premières interventions en cas d'événement, il faut aussi garantir l'accès aux locaux stockant les vêtements de travail. Étant donné que les plans d'urgence prévoient que les véhicules de secours soient relocalisés à un centre d'appui non endommagé en cas de séisme majeur, n'est pas nécessaire d'être préparé à des interventions ultérieures à Uster.

Figure 30

Les véhicules de secours de l'hôpital d'Uster doivent pouvoir quitter le garage même après un séisme majeur.



© Spital Uster

Sécurisation des éléments non structuraux également

Sont considérés comme des ENIE les éléments de construction ne faisant pas partie de la structure porteuse et ne servant ni à reprendre les charges verticales, ni à stabiliser horizontalement la structure porteuse. Il peut s'agir de façades, de plafonds suspendus, de parois non porteuses, de chemins de câbles et de conduites. À Uster, la porte de garage, les portes essentielles et l'alimentation en courant de secours ont été considérés comme des éléments pertinents et conçus selon la CO III. D'autres éléments de construction aux fonctions non vitales répondent également au critère de la sécurité structurale. Ces éléments ont par exemple été fixés par des vis sur des pattes de fixation en acier à trous oblongs ou, dans le cas des plafonds suspendus, sécurisés par des chaînes, afin de prévenir les chutes, les arrachages, les basculements et les glissements en cas de secousses sismiques. Ils sont ainsi conformes aux exigences de la norme SIA concernant la protection des personnes et la limitation des dommages.

D'autres éléments ont été exécutés selon la CO II uniquement, qui n'impose pas une garantie de l'aptitude au service. Cependant, les spécialistes estiment que nombre de ces ENIE dans le nouveau bâtiment du service de secours de l'hôpital d'Uster resteraient fonctionnels même en cas de séisme important. Et ce car le comportement robuste de la structure porteuse aurait une influence positive sur les mouvements des éléments non structuraux en cas de secousses sismiques.

Figure 31

Pour que la porte du garage ne reste pas bloquée en cas de secousses sismiques, son rail de guidage est solidement ancré dans le béton armé par des vis sur des pattes de fixation en acier à trous oblongs.



© Metron, Roger Trottmann

4.2 Santé

Réfection de la centrale frigorifique du centre pharmaceutique de l'hôpital universitaire de Bâle (BS)

Sécurité structurale et fonctionnement garantis même en cas de séisme

Le centre pharmaceutique de l'hôpital universitaire de Bâle est situé dans un bâtiment de quatre étages considéré comme un précurseur de l'architecture suisse moderne. Avec ses façades en verre couleur vert bouteille, ce complexe architectural implanté sur l'aire Rossetti à la Spitalstrasse 26 donne une touche colorée remarquable à ce quartier urbain proche du Rhin. Avec cet ouvrage construit entre 1995 et 1998, le célèbre bureau d'architecture Herzog & de Meuron a créé une zone d'entrée marquante en direction de l'hôpital et de la vieille ville de Bâle. Le plan complexe comprenant un corps de bâtiment s'étendant dans plusieurs directions, implanté en face de l'hôpital à la Spitalstrasse, a été contraint par les sous-sols existants datant des années 1960.

Une modernisation indispensable

Délocalisé en 1999 pour des raisons d'espace, ce centre pharmaceutique de l'hôpital comprend des laboratoires, des locaux de production de médicaments, des bureaux et des stocks. Il assure l'approvisionnement en produits pharmaceutiques des cliniques universitaires ainsi que d'autres hôpitaux dans le canton de Bâle-Ville et traite toutes les demandes

relatives à des médicaments. Environ 20 ans après la mise en service du bâtiment, il était nécessaire de moderniser la centrale frigorifique, en remplaçant plusieurs machines réfrigérantes, conduites et réservoirs. Il fallait par ailleurs installer de nouvelles cloisons de séparation respectant de hautes exigences d'étanchéité pour prévenir toute diffusion de fluides frigorigènes susceptible de nuire à la santé.

Du point de vue de la sécurité sismique, la centrale frigorifique devait remplir, une fois l'assainissement achevé, les exigences propres aux ouvrages ayant une fonction vitale. Un examen approfondi commandé par le laboratoire cantonal avait montré que plusieurs ENIE du centre pharmaceutique ne respectaient pas les normes actuelles en matière de sécurité structurale et d'aptitude au service. Ces aspects sont critiques en l'occurrence, car la région bâloise, avec la plaine valaisanne, fait partie des régions de Suisse où l'aléa sismique est le plus élevé.

Une étroite collaboration

Les travaux de rénovation ont notamment servi à remplacer des cloisons de séparation, des machines frigorifiques, des armoires de distribution et de commande ainsi que des systèmes de conduites. Certains ENIE ont pu être conservés, notamment deux réservoirs de stockage. La planification et la réalisation des mesures de sécurité sismique a nécessité une étroite collaboration et des accords entre toutes les parties prenantes. Ainsi, des échanges réguliers ont eu lieu

Figure 32

Dans le centre pharmaceutique de l'hôpital, les pompes sont solidement vissées aux socles en béton, ce qui assure leur sécurité sismique.

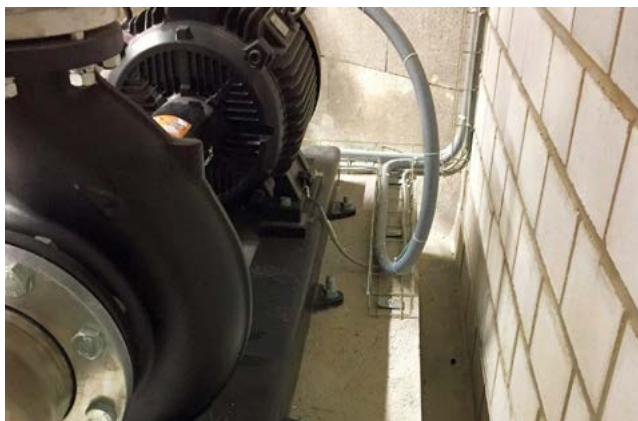
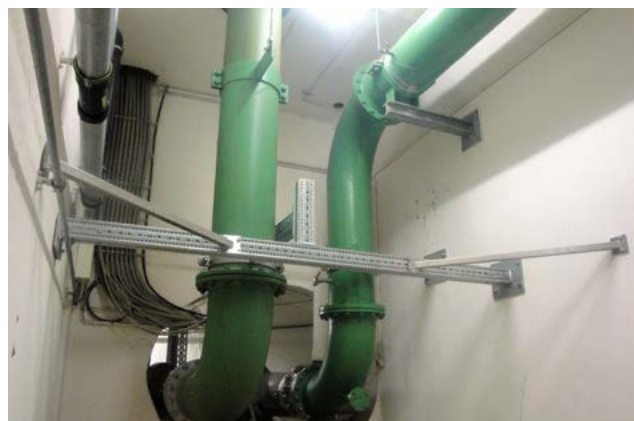


Figure 33

Profilés en acier fixés aux parois pour rigidifier les imposantes conduites, également dotées, dans les zones de passage, de compensateurs.



entre le bureau de conseil chargée de l'analyse des risques, l'hôpital universitaire de Bâle, le planificateur général ainsi que les ingénieurs d'étude pour les domaines de la technique des bâtiments, de la construction de machines et de l'électrotechnique.

Les documents déterminants pour la planification et le dimensionnement des nouveaux ENIE étaient la norme SIA 261 « Actions sur les structures porteuses » (2014) et la première version (état 2016) d'une publication de l'OFEV qui a été mise à jour depuis, à savoir les recommandations « Sécurité sismique des éléments non-structuraux et autres installations et équipements ». L'examen des ENIE existants s'est par ailleurs appuyé sur la norme SIA 269/8 de 2017.

Des ancrages très divers

Dans le centre pharmaceutique de cet hôpital bâlois, les ENIE examinés en détail et sécurisés contre les séismes étaient notamment des machines frigorifiques, des adsorbants, des pompes, des armoires de commande, des panneaux de contrôle, des échangeurs de chaleur, des réservoirs de stockage, des cloisons de séparation, des passe-câbles, des conduites électriques sur rail, des canaux d'aération et des suspensions pour des conduites d'eau. C'est ainsi que les pompes ont été vissées sur des socles en béton et donc sécurisées contre les basculements et les glissements, avec d'épais matelas isolants entre les appareils et les socles qui assurent une meilleure

stabilité en cas de séisme. Les armoires électriques, dotées principalement de commutateurs et de rails électriques, sont reliées non seulement avec le socle, mais aussi les unes avec les autres, afin de garantir une bonne stabilité. De plus, ces composants internes sont reliés au caisson d'armoire par des rails. Chaque échangeur de chaleur a été vissé à la dalle en béton avec trois profilés en U, ce qui prévient les risques de basculement et de glissement. Les appuis des réservoirs sont tous pourvus de quatre vis ancrées dans la dalle de béton, ce qui prévient le soulèvement et le glissement. Des rails en acier fixés à la fois en haut, en bas et sur les deux côtés empêchent que les cloisons de séparation ne se renversent. Les passe-câbles peu chargés sont fixés à la dalle à l'aide de goujons d'ancrage. La même approche a été adoptée pour les canaux d'aération légers et flexibles, de sorte qu'il n'a pas été nécessaire de les rigidifier, ni dans le sens longitudinal ni transversal. Selon la taille des conduites d'eau, leurs suspensions sont fixées au mur par des vis ou sur le sol par des tiges d'ancrage, ou rigidifiées dans les sens longitudinal et transversal par des appuis en acier en porte-à-faux. Dans les zones de passage au troisième sous-sol entre l'installation de traitement des eaux du Rhin, la galerie et le bâtiment Rossetti, des compensateurs sont installés qui améliorent la mobilité des conduites en compensant les variations de longueur et les vibrations. La centrale frigorifique répond désormais à toutes les exigences de sécurité sismique s'appliquant aux ouvrages ayant une fonction vitale.

Figure 34

Au sous-sol de la pharmacie, les échangeurs de chaleur sont ancrés dans le plafond à l'aide d'entretoises métalliques fixées latéralement.



Figure 35

Des cadres métalliques ancrés dans le sol garantissent le bon fonctionnement des installations – comme ces conduites d'eau – après un fort séisme.



4.3 Santé

Agrandissement et transformation de l'hôpital de Sion (VS)

Augmentation massive des capacités

Il y a quelques années, le Conseil d'État valaisan a décidé que les opérations dans les hôpitaux publics de la partie francophone du canton seraient toutes réalisées à l'avenir sur le site de Sion. L'objectif était, tout en conservant les deux cliniques de Sion et de Martigny, de répartir les différentes tâches relevant des soins de santé. C'est pourquoi le site de Champsec de l'hôpital cantonal existant de Sion est en travaux jusqu'en 2026, le projet comprenant à la fois un agrandissement et une transformation. Le nouvel ouvrage devrait accueillir un total de 14 salles d'opération, soit un doublement, l'offre de lits stationnaires devrait passer de 260 à 400 et celle de lits ambulatoires de 11 à 50.

Le site verra son hôpital s'agrandir, mais pas uniquement. Sont également prévus une clinique de réadaptation de l'assurance-accident de la Suva ainsi qu'un centre de formation pour la physiothérapie et les soins de la Haute école spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO). Le nouveau campus « CampuSanté » s'apprête ainsi à accueillir pas moins de 4500 personnes par jour.

Figure 36

À l'hôpital de Sion, à partir de 2026, toutes les infrastructures vitales seront regroupées dans le nouveau bâtiment en forme de L qui vient s'insérer contre les deux tours existantes.



© Hôpital de Sion

De l'espace pour de nouvelles activités

Pour créer l'espace nécessaire aux nouvelles activités, on a commencé dans le cadre d'une première étape à supprimer les places de stationnement en plein air pour construire un parking de plusieurs étages pouvant accueillir plus de 1100 véhicules.

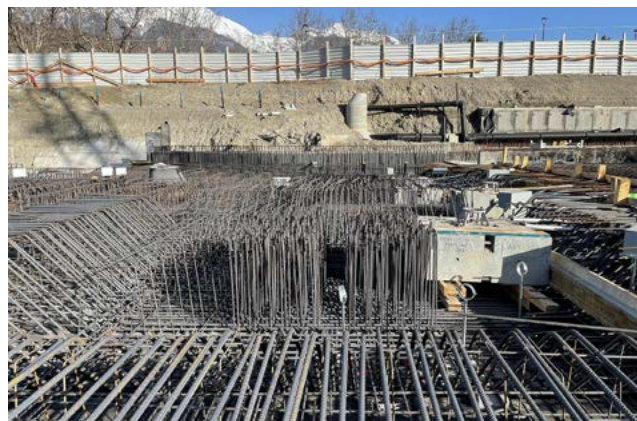
Sachant que le Valais est le canton suisse le plus menacé par des séismes de forte magnitude, la sécurité sismique était au centre des réflexions lors de la construction de ce parking multineaux. Achievé en 2019, le bâtiment est implanté à côté de l'hôpital sur un radier fortement renforcé en son milieu, sous les colonnes porteuses. De cette manière, les charges concentrées sont réparties par la mobilisation du poids propre de l'ouvrage sur le sol porteur et, dans le sens transversal, sur les parois intermédiaires parasismiques. Cette redondance de fonction s'applique également aux semelles filantes sous les piliers d'appui, dans la zone des murs extérieur.

Une forte exposition pour la plaine du Rhône

Le concept cantonal de préparation et d'intervention en cas de tremblement de terre (COCPITT) du Valais se construit autour de l'hypothèse qu'une bonne partie des bâtiments du canton subiront des dommages en cas de séisme. Les autorités s'attendent à des conséquences destructrices dans la plaine du Rhône, où les alluvions créent un effet de site renforçant les mouvements du sol. Cette zone comprend les agglomérations les plus denses en population du canton,

Figure 37

Le nouveau bâtiment de l'hôpital de Sion repose sur une dalle en béton de 180 cm d'épaisseur fortement armée.



© Hôpital de Sion

mais représente aussi son poumon économique. En cas de séisme majeur dans la plaine, sur une zone comprenant à la fois les villes de Sierre et Sion, le COCPITT estime le nombre de victimes à plus de 800 morts et plus de 2600 blessés graves.

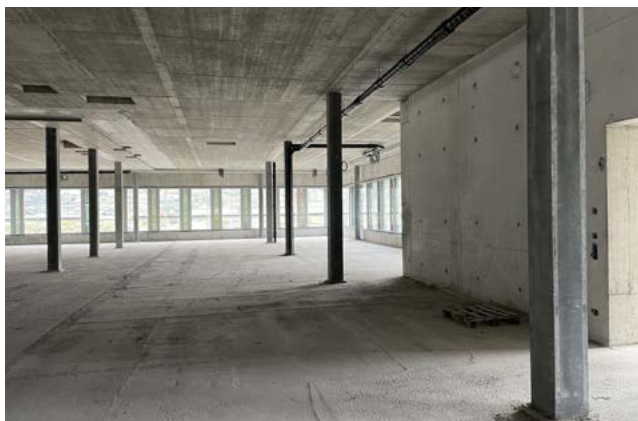
Pour porter secours et soigner les survivants rapidement, il est nécessaire de disposer de services de secours efficaces et d'hôpitaux fonctionnels. Comme le site de Champsec est situé dans la zone sismique Z3b et doit répondre aux exigences de la CO III, il a fallu mener des réflexions approfondies pour ces travaux à Sion.

Un nouveau bâtiment pour les équipements vitaux

Le projet « CampuSanté », qui a débuté en 2020, est une construction en forme de L qui vient, telle une pièce de puzzle, s'insérer au sud et à l'ouest au bâtiment existant, vieux de 50 ans. Ce nouveau bâtiment de quatre étages repose sur de solides et massives fondations en béton armé de 180 cm d'épaisseur. Les refends et les cages d'escalier continus aux murs épais confèrent à cet ouvrage une grande stabilité même en cas de séisme. Les conduites pour l'eau, l'électricité, le chauffage, l'oxygène et d'autres gaz sont intégrées à des cadres en acier qui longent les dalles et les parois. Elles seraient en mesure, en cas de séisme, d'absorber les mouvements, de suivre les oscillations tout en restant fonctionnelles.

Figure 38

Des murs massivement armés, des cages d'escalier et des cages d'ascenseur en béton coulé sur place constituent l'ossature parasismique du nouveau bâtiment de l'hôpital de Sion.



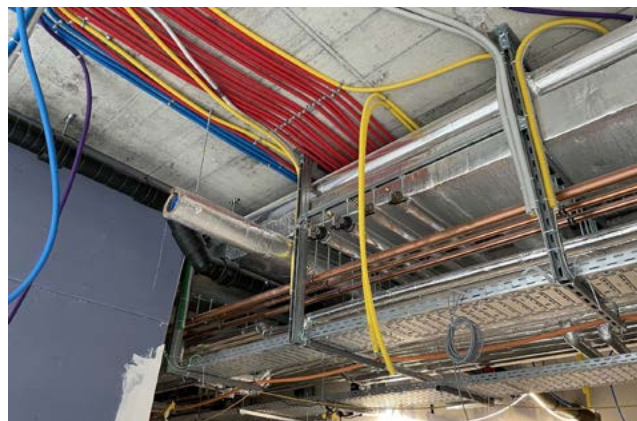
© OECOCOM, Beat Jordi

C'est pourquoi les secteurs hospitaliers aux fonctions vitales comme les urgences et les salles d'opération seront regroupés à l'avenir dans le nouveau bâtiment. Il est prévu que ce dernier accueille un jour tous les départements de soins aigus et d'opération, donc également les centres de soins permanents ou intensifs, les dialyses, l'endoscopie, la radiologie et le centre pharmacologique central. Terminé en été 2022, le gros œuvre comprend également un nouveau garage à ambulances et des docks de livraison destinés à la logistique hospitalière. Au cours des travaux de construction et de transformation, durant lesquels les activités régulières de l'hôpital sont toujours assurées, les locaux libérés dans le bâtiment existant aux deux tours sont petit à petit réaffectés. La sécurité sismique sera améliorée de sorte qu'il sera possible d'héberger les salles de lits sans mettre en danger les patients blessés ou malades en cas de séisme majeur.

Déjà réalisée, la construction d'une salle d'opération supplémentaire avec des locaux d'intubation, techniques et matériels donne une idée de ce que réserve l'avenir. La structure porteuse de cette salle est composée de profilés métalliques soutenus par des pieux et fondations en béton ancrés en profondeur. Même en cas de fort séisme, ces derniers seraient en mesure d'absorber les forces de la structure porteuse et de prévenir tout dégât aux équipements.

Figure 39

Des paniers métalliques fixés aux dalles en béton sécurisent les systèmes complexes de canalisations qui alimentent les salles d'opération et les services des urgences.



© OECOCOM, Beat Jordi

Transport routier

5 Des mesures pour remédier aux faiblesses des ponts

En Suisse, le réseau routier représente le système de transport principal pour assurer l'accès aux infrastructures vitales (p. ex. hôpitaux) après un séisme et approvisionner les régions touchées en biens d'assistance. Les éléments qui présentent des faiblesses de construction sont en particulier les ponts. Mais les normes actuelles garantissent que ces ouvrages ainsi que d'autres ne perdent pas leur aptitude au service en cas de secousses sismiques.

Associé à la faible tolérance pour des interruptions de réseaux d'infrastructures, le fort besoin de sécurité de notre société a conduit à une situation dans laquelle nous avons un grand retard à rattraper en matière de sécurité sismique des ouvrages, selon un rapport publié en 2005 par l'Office fédéral des routes (OFROU). Il s'agissait alors d'évaluer la sécurité sismique des ponts routiers existants. L'OFROU s'était alors focalisé dans ses analyses sur les routes nationales dont la Confédération est propriétaire.

L'apparition de normes sismiques pour les ponts

La Suisse dispose de normes sismiques pour les ponts depuis 1970. À l'époque, la norme SIA 160 avait prescrit pour la première fois, pour tous les ouvrages, une accélération horizontale maximale de 2 % de la gravité. Une nouvelle version de la norme en 1989 avait ensuite exigé pour les nouveaux ponts des preuves par calculs et des mesures constructives qui dépendaient de la classe d'ouvrages (CO) et de la zone sismique. De nouvelles dispositions avaient été introduites notamment sur les dimensions minimales dans les zones d'appui pour éviter la chute des éléments porteurs des ponts en cas de séisme, en particulier au niveau des culées. Un autre durcissement majeur des règles en vigueur était l'introduction d'une preuve de l'aptitude au service pour les ponts de la CO III. Celle-ci prévoit que les appuis des ponts et les joints de chaussée doivent pouvoir supporter sans dégât les déplacements auxquels sont soumises les poutres du pont du fait des forces sismiques.

Un examen systématique des faiblesses

Dans son rapport de 2005, l'OFROU mentionnait qu'il faut s'attendre, en particulier dans les régions où l'aléa sismique est élevé, à ce que les ponts construits avant 1989 ne répondent

pas aux exigences relatives à la sécurisation contre les chutes ni à celles relatives à l'aptitude au service. S'agissant des forces horizontales, les spécialistes craignaient avant tout un sous-dimensionnement dans les sens longitudinal et transversal des piles et des appuis pour les ponts relativement rigides.

Il faut savoir que seulement 10 % environ des quelque 4000 ponts du réseau routier national ont été construits après l'entrée en vigueur des normes sismiques modernes. Le reste, soit 90 % de ces ouvrages, n'a pas ou pas assez été dimensionné pour les actions sismiques. Par conséquent, la Confédération, dans le cadre d'une démarche en deux étapes, a procédé dans l'intervalle à un examen des ponts autoroutiers dont elle est propriétaire afin d'identifier d'éventuelles faiblesses.

Le rapport sur la gestion des risques sismiques au niveau national publié en 2020 à l'attention du Conseil fédéral déclarait que les analyses de la sécurité sismique des ponts des routes nationales étaient terminées. À l'époque, l'OFROU avait déjà achevé ses travaux pour 96 des 242 ouvrages pour lesquels des mesures de sécurité devaient être mises en place. Les 146 ponts autoroutiers restants devront être renforcés du point de vue sismique d'ici à 2035 au plus tard dans le cadre de la planification générale de l'entretien.

Défaillance potentielle à la suite d'un séisme

Durant un séisme, les mouvements rapides du sol peuvent faire osciller les ponts aussi bien dans le plan horizontal que dans le plan vertical. Comme ces ouvrages sont conçus pour supporter des charges verticales, ils absorbent la plupart du temps sans aucun problème les oscillations verticales. Les oscillations horizontales dues aux séismes entraînent quant à elles souvent des sollicitations bien plus importantes. C'est

surtout dans le cas des ponts à poutres, les plus répandus en Suisse, que la vulnérabilité est en principe plus élevée dans le sens longitudinal que dans le sens transversal. Comme les séismes se propagent sous la forme d'ondes, les différentes fondations des appuis et des culées n'oscillent pas simultanément, ce qui peut faire varier les espaces entre les divers points d'appui d'un pont et provoquer sa destruction. Un autre problème est celui des tassements, des glissements et de la liquéfaction du sol de fondation. Ces conséquences des séismes constituent une menace pour les fondations des piliers et des culées.

Pour les ponts à poutres, les types de dommages caractéristiques sont une chute des poutres du pont lorsque les zones d'appui sont trop courtes. Ils s'ensuivent le plus souvent des dommages aux personnes et un dommage total de l'ouvrage. Cependant, si une poutre du pont tombe seulement depuis un appui de pont sur le banc d'appui, on parvient souvent à relever le pont moyennant un effort restreint et à le remettre en service provisoirement relativement rapidement, du moins pour offrir un accès immédiat aux secours durant la phase de maîtrise de l'événement.

L'optimisation de la sécurité sismique

Pour éviter une chute des poutres du pont, il faut concevoir les zones d'appui dans le sens longitudinal en tenant compte des mouvements possibles des poutres entre les culées en cas de séisme. Dans le sens transversal, une solution éprouvée consiste à utiliser des comes, donc des arrêts en béton pour prévenir les chutes.

Selon les analyses de l'OFROU, il faut concevoir l'ouvrage de sorte que les poutres aient un comportement élastique sous l'action sismique. Toujours selon l'OFROU, sont généralement favorables de longues poutres continues sans joints, car un joint intermédiaire est un point faible qui peut mener à la chute d'une poutre de pont. Les spécialistes estiment que les poutres continues d'une portée approximativement égale sont plus favorables, car des portées variables peuvent causer de plus fortes oscillations dans le sens transversal.

Dans le sens longitudinal, on préfère des appuis flottants aux connexions rigides, car les appuis fixes pour les efforts horizontaux n'ont pas convaincu dans la pratique. L'autorité fédérale recommande par ailleurs de relier le plus grand nombre d'appuis possible comme unité de construction ou

de créer une connexion avec les poutres du pont par des appuis longitudinaux fixes. Dans le sens transversal, il faut prévoir des appuis fixes au niveau des culées et des piliers sans connexion uniforme.

La catégorisation des ponts routiers

Les exigences les plus élevées s'appliquent aux ouvrages de la CO III. Cette classe comprend les ponts autoroutiers sans itinéraire d'évitement, les ponts situés sur des voies d'accès à des bâtiments vitaux de la même classe d'ouvrages (p. ex. hôpitaux, garages à ambulances et centrales de police) ainsi que des ponts de grande importance pour l'accès à une région ne disposant pas d'itinéraire d'évitement après un séisme. Cependant, l'OFROU considère qu'il n'est justifié de placer les ponts existants dans la CO III que s'il existe un objectif de garantir la fonction de l'ouvrage pour sauver des vies humaines après un séisme. Un exemple serait un pont situé sur la seule route d'accès à un hôpital de soins aigus classé CO III.

Les secousses sismiques constituent un danger également pour les ouvrages en terre et les ouvrages de soutènement situés le long des routes, mais dans une moindre mesure par rapport aux ponts. Comme l'ont montré des expériences faites à l'étranger, les dommages se produisent plutôt dans des zones en pente, lorsque les actions sismiques sont relativement élevées. Il faut toutefois tenir compte de l'impact des secousses sismiques sur de tels ouvrages en Suisse, car un événement peut entraîner des déplacements résiduels qui entravent le trafic. C'est pourquoi il existe depuis 2019 une documentation spécifique de l'OFROU concernant le dimensionnement et la vérification des ouvrages en terre et de soutènement.

Aides à l'exécution

- *Abklärungen zur Erdbebensicherheit der Brückenbauwerke der Nationalstrassen* ; ASTRA, Bericht, 2020 (uniquement en allemand, résumé disponible en français)
- *Évaluation de la sécurité sismique des ponts routiers existants* – Documentation 82003, 2020
- *Sécurité sismique d'ouvrages en terre et de soutènement* – Dimensionnement et vérification, OFROU, Documentation 82017, 2019 (uniquement en allemand)

5.1 Transport routier

Pont de la Sihl sur la route principale H8 à Schindellegi (SZ)

Une sécurisation contre la chute

La route principale H8 est une route de grand transit d'importance nationale qui relie l'est du pays à la Suisse centrale. Elle commence près de la ville de Saint-Gall, poursuit en direction d'Herisau (AR) et Wattwil dans le Toggenburg via le Rickenpass direction Eschenbach, traverse vers Rapperswil-Jona le barrage sur le lac de Zurich direction Pfäffikon (SZ), franchit vers Schindellegi la Sihl et vise par Schwytz la localité d'Ingenbohl, où elle se fond dans la route principale H2b. En tant que connexion efficace entre les deux routes nationales A3 et A4, cette route principale H8 de 92 km de long représente pour de nombreuses localités de Suisse orientale la voie la plus courte en direction de Lucerne ou du Gothard. Par ailleurs, elle joue pour le canton de Schwytz le rôle d'axe de liaison principal entre l'Innerschwyz et l'Ausserschwyz et dessert en plus le centre du canton.

Une analyse des dangers exhaustive

Sur la base d'une analyse des dangers globale pour l'ensemble du canton, l'exécutif schwytois a décidé en 2016 de procéder à un examen sismique de tous les ouvrages

d'infrastructure pertinents en matière d'approvisionnement et de prendre des mesures d'amélioration si nécessaire. Le service cantonal des ponts et chaussées s'est chargé des ouvrages d'art des routes cantonales.

Les analyses ont notamment montré que le pont à quatre voies de la route principale H8 bâti au début des années 1970 pour traverser la Sihl vers Schindellegi présente (selon les charges sismiques prescrites à l'heure actuelle) des déficits et ne répond plus aux exigences modernes de sécurité. Ainsi, avant les mesures de sécurisation sismique réalisées en 2022, il existait un risque que les appuis de pont lâchent en cas de secousses sismiques importantes et que le tablier tombe de ses appuis. Ayant une fonction d'infrastructure importante, ce pont sur la Sihl appartient à la CO II-i. Partant, le canton de Schwytz, en tant que propriétaire de la route, a décidé de mettre en œuvre une mesure d'amélioration.

Transformation du système d'appuis

Principalement en béton, le pont existant de 120 m de long entre Biberbrugg au sud et Schindellegi au nord présente des poutres continues sur six travées avec des appuis obliques pour les piles et les culées. Les quatre travées internes ont une portée constante de 22,5 m, tandis que la travée de rive sud, dont l'angle est particulièrement oblique par

Figure 40

Le pont à quatre voies de la Sihl sur la route principale H8 à Schindellegi présentait une sécurité sismique insuffisante et nécessitait donc un assainissement.



Figure 41

Les appuis installés a posteriori reposent sur des consoles de béton apposées et bien ancrées aux parois existantes des culées, ce qui sécurise le tablier contre les chutes.



rapport à l'axe du pont, présente une portée environ deux fois moins grande. La travée de rive nord de 19,4 m de long repose sur une culée qui constitue également l'entrée dans un court tunnel passant sous plusieurs routes communales et bâtiments de Schindellegi. Le pont comporte un tablier de type pont-dalle de 70 cm d'épaisseur pour une largeur totale de 15,5 m pour les quatre voies. Pour la culée sud, le tablier du pont est doté d'un appui fixe. Pour les piles P2 et P4 et pour la culée nord, il dispose également d'un appui guidé supplémentaire dans le sens transversal. Les piles sont conçues comme des cadres fermés reposant sur des semelles filantes.

Les travaux d'amélioration de la sécurité sismique ont commencé en avril 2022 sans interruption de service du pont. Neuf semaines ont été nécessaires pour transformer le système d'appuis sans procéder à d'autres interventions sur la structure porteuse du pont. En renonçant aux appuis horizontaux dans le sens transversal pour les piles P2 et P4, il a été possible d'obtenir un comportement dynamique plus flexible. Une structure porteuse ne doit en effet pas forcément être rigide pour supporter les actions dynamiques d'un séisme. Plutôt que de faire supporter d'importantes forces aux éléments porteurs de contreventement horizontal, on peut concevoir une structure porteuse flexible. Cette dernière peut alors elle aussi osciller lors des séismes, de

la même manière qu'un roseau se plie sous l'effet du vent sans se briser.

Pour améliorer les culées de Schindellegi, il a été décidé d'aménager des appuis de pont supplémentaires sur des consoles de béton apposées aux parois des culées et solidarisées avec celles-ci. L'armature des consoles a été ancrée dans des niches des culées dont le béton avait été traité en amont par jet d'eau à ultra-haute pression. Ce procédé permet de dégager l'acier d'armature pour les travaux de réfection subséquents sans l'endommager et optimise la liaison du béton entre les éléments anciens et nouveaux. Dans la perspective d'une réalisation ductile, les parois des culées ont finalement encore été renforcées avec des goujons de cisaillement. Grâce à la transformation du système d'appuis, qui prévient un effondrement du pont à Schindellegi, l'ouvrage répond aujourd'hui aux exigences de sécurité sismique de la dernière génération de normes. Les coûts liés aux prestations d'ingénierie et aux mesures d'amélioration de la construction se sont élevés à quelque 400 000 francs. Ce montant correspond à environ 4 % de ce qu'aurait coûté la construction d'un nouveau pont similaire.

Figure 42

Afin de bien relier les nouvelles consoles en béton aux culées, la première couche d'armature a été mise à nu et les nouveaux éléments de construction ont été ancrés dans les niches.



Figure 43

En renonçant à un appui horizontal dans le sens transversal pour deux piliers-cadre, il a été possible d'obtenir un comportement dynamique plus souple du pont en cas de séisme



5.2 Transport routier

Assainissement du Bodenbrücke à Guttannen (BE)

Une artère principale rendue parasismique

Construit en 1972, le Bodenbrücke qui mène de Innertkirchen à Guttannen fait partie de la route du col du Grimsel, qui relie la Haslital dans l'Oberland bernois à Goms dans le Haut-Valais. Pendant des siècles, ce passage à travers les Alpes a joué un rôle de premier plan comme itinéraire de commerce en direction du nord de l'Italie. La Suisse achetait notamment du vin, du riz et du verre de Murano, et vendait en retour des fromages à pâte dure, du cuir, des produits de quincaillerie, de jeunes chevaux et des races Brune. Ce commerce de proximité a cependant perdu sa base économique dans la seconde partie du XIX^e siècle du fait de l'inauguration du tunnel ferroviaire du Gothard.

Il a fallu attendre la liaison avec le réseau routier alpin à Gletsch (VS) et la construction de plusieurs barrages et centrales dans la région pour que la route du Grimsel retrouve un rôle de premier plan. Cette route menant au col, accessible uniquement pendant la période estivale, sert aujourd'hui avant tout d'attraction touristique. Cependant, le tronçon qui mène au village habité de Guttannen dans l'Oberhasli, également ouvert en hiver, constitue une artère principale.

Une sécurité insuffisante contre le basculement

Ce caractère principal vaut donc également pour le pont appartenant à la CO III traversant l'Aar en aval à la hauteur du hameau de Boden. Alors que la route cantonale bernoise Nr. 6 suit la rive droite de la Hasliaare à partir d'Innertkirchen, elle traverse ici la rivière et continue le long de la rive gauche en direction de Guttannen.

S'agissant du sol de fondation, les culées massives reposent sur plusieurs mètres de terrain meuble issu d'alluvions ou de moraines. Partant, pour l'analyse de la structure porteuse, les spécialistes ont défini la classe de terrain de fondation E et la zone sismique Z1b.

Un contrôle réalisé en 2020 sur mandat de l'office cantonal des ponts et chaussées ainsi qu'un examen détaillé subséquent ont révélé différents dégâts, notamment des éclatements et des traces de corrosion. Les spécialistes ont par ailleurs découvert que la sécurité sismique des culées était insuffisante. Avant la réfection, étaient problématiques tant la résistance ultime horizontale des appuis en élastomère simples que la sécurité contre le basculement des culées en murs poids. En cas de séisme majeur, ce pont d'un seul tenant aurait pu, dans le pire des cas, s'effondrer dans l'Aar, en emportant la route avec lui.

Figure 44

Travaux d'excavation et de préparation pour relier le tablier du Bodenbrücke à Guttannen avec la culée.



Figure 45

Des fers d'armature ont été utilisés pour l'armature du bloc de béton qui relie désormais solidement le tablier du pont et la culée.



Une transformation relativement simple

L'exigence courante d'aptitude au service pour un pont de la CO III postule que les joints de chaussée et les appuis de pont doivent, en cas de séisme, pouvoir absorber les déformations sans causer d'interruption de l'infrastructure. Pour atteindre cet objectif, ce pont fait de béton coulé sur place a été transformé. Il a en effet été doté de quatre poutres longitudinales et entretoises, pour devenir un pont intégral sans joints de chaussée. Il a par ailleurs été renoncé aux appuis en élastomère existants.

Lors des travaux réalisés en 2022, le tablier du pont de 10 m de large et de 18 m de long a été relié solidairement aux culées. Les joints entre ces éléments de construction ont été bétonnés. Il a ainsi été possible de renoncer à l'assainissement des joints de chaussées et des appuis, une opération qui aurait été nécessaire sinon. Dans la zone des culées, l'armature du revêtement a été reportée au niveau de la couche porteuse et le revêtement de surface en enrobé bitumineux a été étendu au-delà du pont.

Sur des coûts totaux de réfection de quelque 600 000 francs, les dépenses liées aux mesures de sécurité sismique se sont montées à 20 000 francs seulement, soit 3,5 % environ. Comme les travaux de réfection n'ont été effectués que sur une seule voie à la fois, la circulation

par le pont de Innertkirchen vers Guttannen a pu être maintenue en tout temps. Les véhicules circulant dans l'autre sens ont été déviés vers une route communale à proximité directe du pont.

Grâce à cette stratégie d'amélioration aussi simple qu'efficace, la population de la vallée n'a plus à craindre une interruption de la plus importante voie de circulation de l'Oberhasli en cas de séisme. Elle doit cependant toujours se préoccuper des laves torrentielles récurrentes dans la zone appelée Spreitgraben. En raison de l'accumulation de matériaux charriés par l'Aar, ces coulées menacent à Guttannen non seulement la route cantonale, mais aussi différentes maisons.

Figure 46

Vue du pont depuis dessous une fois achevée la liaison en béton entre la culée et le tablier.



Figure 47

Grâce à l'assainissement effectué, le Bodenbrücke sera en mesure à l'avenir de résister à un séisme majeur.



5.3 Transport routier

Assainissement du pont sur le Rhin postérieur à Cazis (GR)

Un passage sur le Rhin résistant aux séismes

L'autoroute A13 est, après l'autoroute du Gothard (A2), la plus importante liaison Nord-Sud du pays. Elle relie la rive sud du lac de Constance à Sankt Margrethen (SG) à la rive nord du lac Majeur à Locarno en passant par Sargans, Coire, Thusis et Bellinzone. Cette voie de franchissement des Alpes est empruntée depuis des siècles, mais il a fallu attendre 1967 avec l'ouverture du tunnel du San Bernardino pour disposer d'une liaison routière ouverte à l'année, qui offre une meilleure desserte notamment des vaux du sud des Grisons Mesolcina et Calanca et fait le lien avec Coire, le chef-lieu du canton.

Cette voie de circulation routière nationale à quatre voies sur certaines parties de son tracé a vu le jour principalement dans les années 1960 et 1970. Le pont en béton sur le Rhin postérieur à Cazis (Hinterrheinbrücke Reichenau) sur le tronçon Thusis Sud-Isla Bella a également été bâti à cette époque (1976-1978).

Une augmentation des charges due à l'élargissement

Dans le cadre d'une réfection totale de ce tronçon, l'OFROU a fait, entre avril 2014 et décembre 2015, élargir cet ouvrage

Figure 48

Le pont autoroutier sur le Rhin postérieur à Cazis élargi sur mandat de l'OFROU a été amélioré du point de vue de la sécurité sismique grâce à des renforcements du caisson creux et des piles ancrées dans le fleuve ainsi que du remplacement de tous les appuis de pont.



de 170 m de long traversant le Rhin. La largeur de la voie de circulation utile est ainsi passée de 13,3 m à 15 m. Comme ces travaux ont fait augmenter de manière considérable le poids propre des poutres du pont, les culées et les piles d'appui de l'ouvrage original n'étaient plus adaptées pour répondre à de potentielles actions sismiques. Il était nécessaire de mettre en œuvre des mesures constructives pour améliorer la sécurité sismique.

Le sol de fondation est constitué d'alluvions du Rhin. On sait d'expérience qu'il s'agit de graviers compacts avec des pierres et des blocs. Du point de vue sismique, les paramètres déterminants pour cet ouvrage sont la zone sismique Z2, la classe de terrain de fondation C et l'appartenance à la CO II.

La sous-structure de ce pont sur le Rhin comprend un caisson creux de 7,6 m de large qui s'étend sur trois travées de portées variables de 52 à 66 m de long. Elle repose sur les culées ainsi que sur deux piles en béton qui ont été ancrées dans le lit du fleuve grâce à des caissons. Dans le sens longitudinal, le caisson creux est fixé uniquement sur la pile côté Thusis, tous les autres appuis du pont reposant sur la pile côté Rothenbrunnen et sur les culées étant conçus pour être mobiles. Dans le sens transversal du pont, la superstructure repose sur des appuis guidés aussi bien sur les culées que sur les deux piles.

Figure 49

Pour améliorer la sécurité sismique, les travaux ont ancré les piles en béton plus profondément dans le lit de la rivière et ont renforcé ces piles par des mesures constructives. Les piles auxiliaires carrées ont été retirées après les travaux.



Un remplacement de tous les appuis du pont

Lors des travaux de transformation, l'OFROU a conservé le concept d'appui existant, qui comprend une superstructure avec appuis flottants et deux joints de chaussée. Désormais cependant, la poutre du pont est maintenue sur les deux piles ancrées dans le fleuve, que ce soit dans le sens longitudinal ou transversal. L'élargissement de l'ouvrage a été réalisé sous la forme d'une construction en béton en porte-à-faux. Pour ce faire, on a adapté les murs de soutènement apposés aux culées dans les zones d'avant-pont en fonction de la chaussée élargie.

Pour garantir une sécurité structurale suffisante, il était nécessaire de prendre des mesures de renforcement de la construction pour les caissons creux et les piles ancrées dans le fleuve et aussi de remplacer tous les appuis existants du pont. Par ailleurs, le seul moyen d'assurer la portance des deux piles d'appui était de renforcer l'ancrage des caissons dans le lit du Rhin.

En raison de la faible armature transversale et des fortes sollicitations survenant dans le cadre de l'usage courant, les piles présentaient, avant la transformation, un comportement fragile à la rupture par effort tranchant avec une capacité de déformation limitée. Pour prendre en compte d'éventuelles actions sismiques, on recherche cependant plutôt un comportement ductile à la rupture. Afin d'obtenir

une amélioration notable de la capacité de déformation des piles ancrées dans le fleuve, ces dernières ont été enrobées avec du béton et la disposition constructive de l'armature optimisée.

Les anciens appuis du pont ont dû être remplacés, aussi bien pour les piles que pour les culées. Pour pouvoir garantir l'introduction des efforts des forces d'appui horizontales dans la superstructure, de nouveaux renforts en béton armé ont été réalisés sur la face inférieure de la poutre du pont, c'est-à-dire au sommet des têtes d'appui.

La section du caisson creux a été sécurisée avec des plaques transversales de 30 cm d'épaisseur installées à intervalles réguliers sur toute la longueur du pont. Par ailleurs, pour les deux travées d'extrémité, une couche de béton supplémentaire était nécessaire pour renforcer la dalle inférieure du caisson creux. Les travaux ont permis d'obtenir un comportement ductile de la structure qui permet un écoulement de l'armature ainsi que des contraintes dans le béton inférieures à la résistance effective en compression.

Les coûts totaux de cette extension et de cette réfection sans interruption du trafic se sont élevés à un peu moins de 8 millions de francs (quelque 2500 francs par m²), ce qui est bien inférieur aux coûts de construction d'un pont de remplacement.

Figure 50

L'amélioration de la sécurité sismique comprenait notamment la construction d'un bloc d'ancrage fortement armé pour la précontrainte du pont.



Figure 51

Dans les deux travées de bord du caisson creux sous le tablier du pont, la dalle de béton inférieure a été renforcée avec des armatures supplémentaires et une surcouche de béton.



Transport ferroviaire

6 Protection de la population dans les trains et les gares

Depuis 2020, une directive concrétise les normes SIA pour la sécurité sismique des installations ferroviaires. Cette aide à l'exécution fournit une base d'évaluation uniforme pour les exploitants d'installations, les responsables de projets et les autorités chargées des autorisations et de la surveillance. Elle améliore la protection des personnes dans les trains et les gares, mais aussi celle de l'infrastructure ferroviaire.

Le réseau ferré helvétique est long de 5100 km, ce qui en fait l'un des plus denses au monde. Rien que sur les tronçons des CFF, 10 000 trains circulent chaque jour, transportant plus d'un million de personnes. Plus de 2000 stations et gares sont desservies. S'agissant du nombre de passagers, de la ponctualité et de la sécurité, le réseau ferré suisse est considéré comme le plus efficace d'Europe. Il transporte également 37 % des marchandises.

Cette qualité du réseau doit être maintenue même en cas de séisme. Afin de protéger la vie des voyageurs dans les trains et dans les lieux très fréquentés comme les gares et pour garantir l'exploitation du réseau ferré, il est nécessaire de respecter des dispositions spécifiques. Les détails sont examinés par l'Office fédéral des transports (OFT) dans le cadre d'une procédure d'approbation des plans.

Des dispositions spécifiques pour assurer la sécurité

Pour ce qui est des séismes, les nouvelles constructions sont soumises aux dispositions de la norme SIA 261 et les constructions existantes depuis 2017, à la norme SIA 269/8. Les premières dispositions prenant en compte les actions sismiques sont apparues en 1970 seulement. La majeure partie du réseau ferré helvétique a toutefois vu le jour avant cette date, notamment environ 60 % des 6500 ponts ferroviaires des CFF. Sur ces 6500 ponts, 20 % ont été conçus d'après les premières dispositions en matière de sécurité sismique, mais les normes ont été mises à jour depuis et prévoient des actions sismiques bien plus élevées. Pour les 20 % restants, leur conception peut être considérée comme répondant aux normes actuelles. Pour la plupart des ouvrages existants, le niveau de sécurité sismique est inconnu ou insuffisant. En cas de séisme,

les défauts peuvent engendrer des interruptions d'exploitation sur l'ensemble du réseau, voire faire des victimes humaines. En se fondant sur une étude préliminaire de 2010 sur la sécurité sismique de l'infrastructure ferroviaire mandatée par l'OFEV, les CFF ont élaboré entre autres, en 2015, une procédure d'inventaire à plusieurs niveaux pour les ponts ferroviaires.

Depuis 2013, la sécurité sismique des projets de nouvelles constructions et d'assainissement nécessitant une autorisation de l'OFT est vérifiée par le domaine compétent de l'OFEV. Cependant, les normes ont laissé certaines questions ouvertes, notamment quant à la nécessité et la proportionnalité des mesures. Pour mettre en œuvre correctement, systématiquement et de manière uniforme les dispositions, il était nécessaire de disposer d'une directive traitant spécifiquement le domaine des chemins de fer. Une telle directive sert à réduire le risque sismique pour le transport par rail, mais offre aussi davantage de sécurité de planification aux requérants.

Une directive qui précise la marche à suivre

Intitulée « Sécurité sismique des installations ferroviaires », une directive publiée en 2020, issue d'une collaboration entre l'OFT, l'OFEV et des spécialistes d'entreprises ferroviaires, standardise et simplifie l'interprétation et l'application des prescriptions de sécurité sismique tout en servant de base à l'exécution des dispositions légales. Les prescriptions relatives à la documentation du projet, les objectifs de protection et le degré de protection ainsi que l'évaluation de la proportionnalité des mesures de sécurité sismique y sont précisés et expliqués spécifiquement pour le domaine ferroviaire. Cette marche à suivre permet un

contrôle uniforme et efficace au cours de la procédure d'approbation des plans.

La directive précise en outre quels sont les éléments de l'infrastructure ferroviaire pertinents en matière de sécurité sismique. En font partie notamment les ponts, les gares, les marquises et les halles de quai ainsi que les postes d'enclenchement. De manière générale, le chemin de fer n'assume aucune fonction d'infrastructure vitale. Pour une entreprise ferroviaire, il peut toutefois être judicieux, sur la base d'intérêts spécifiques propres, d'attribuer la classe d'ouvrage (CO) III à un élément d'une très grande importance pour l'exploitation ou pour la maîtrise des événements.

Des échanges d'expériences entre les spécialistes

Sur la base des expériences passées, l'OFEV et l'OFT ont précisé les critères appliqués lors de la répartition des dossiers de demande d'approbation des plans. Ainsi, les autorités fédérales souhaitent si possible investir les ressources limitées en personnel pour les projets les plus pertinents en matière de risques.

Les évaluations des projets réalisées dans le cadre de la procédure d'évaluation des plans sont inventoriées par le domaine Séisme de l'OFEV. Sur la base de l'évaluation de la qualité des dossiers d'approbation des plans, des échanges réguliers ont lieu entre les différents spécialistes pour déterminer s'il y existe des besoins d'intervention.

Aides à l'exécution

- *Sécurité sismique des installations ferroviaires, OFT – Directive, 2020*
- *Sécurité sismique de la distribution d'énergie électrique en Suisse ; ESTI/OFT, Directive Nr. 248, 2012, Révision 2020*

6.1 Transport ferroviaire

Viaduc de la Sarine vers Gümmenen (BE)

La sécurité sismique pour un ouvrage emblématique

Lorsqu'on prend le train de Neuchâtel à Berne, on traverse près de Gümmenen (BE) la Sarine et sa vallée de 800 m de large. Quand on arrive par l'ouest, ce passage classé monument historique comprend, dans l'ordre, une digue en terre de 400 m, le fameux viaduc en pierre naturelle et ses 22 arcs en pierre, un treillis métallique de 65 m en filigrane enjambant directement la rivière, puis un autre viaduc en pierre doté de cinq voûtes. Dès son achèvement en 1901, cet ouvrage emblématique a été considéré comme un chef-d'œuvre de l'ingénierie.

Mais le temps n'a pas épargné les pierres ni le fer, et les exigences de la population en matière de mobilité et de sécurité n'ont fait qu'augmenter depuis lors. Les trains, toujours plus lourds, doivent rouler toujours plus vite et toujours plus souvent. Il était donc nécessaire de remplacer ou d'assainir les éléments de cet ouvrage usés par le temps. Il a fallu tenir compte à la fois des aspects parasismiques et du fait que l'ouvrage est un monument classé.

Figure 52

La société ferroviaire BLS a procédé à un doublement des voies du viaduc de la Sarine, classé monument historique, sur le tronçon entre Berne et Neuchâtel. Depuis 2020, cette traversée caractéristique du paysage respecte les exigences de sécurité sismique



© vistadoc

La réduction de la vulnérabilité

Bien que la sécurité sismique n'ait pas été l'élément déclencheur de ce projet, elle a joué un rôle important lors des travaux de planification et de construction. Il faut en effet savoir qu'un séisme majeur aurait pu être très dommageable à ce pont vieux de 120 ans. Il existait notamment un risque que les appuis du pont en acier, qui transmettent toutes les forces aux piles du viaduc, cèdent dans le sens transversal. De plus, des parties de la digue en terre auraient pu glisser. Les éléments les plus robustes sont les deux viaducs en pierre naturelle. Cependant, on pourrait imaginer un scénario dans lequel certaines pierres tombent, voire des pans entiers s'effondrent.

Un séisme de grande magnitude aurait interrompu la ligne ferroviaire entre Berne et Neuchâtel pour une longue durée. Dans le pire scénario, des trains auraient pu dérailler et le pont, être entièrement détruit.

Des appuis de pont pour un soutien suffisant

À la suite du doublement de la voie et de l'augmentation de la vitesse à laquelle ce tronçon pourra être parcouru (160 km/h), la société BLS Netz AG, qui assurait la maîtrise d'ouvrage et est propriétaire de ce monument historique d'importance nationale, a considérablement amélioré la sécurité sismique de ce pont. Les travaux ont élargi la digue en terre et, grâce

Figure 53

Le viaduc le plus court a été élargi latéralement avec des pierres naturelles, dans le style de construction ancien, afin d'accueillir le tracé nouvellement doublé.



© Fürst Laffranchi Bauingenieure GmbH

à une bonne composition granulométrique du matériel de remblai, également stabilisé celle-ci pour offrir une meilleure résistance aux séismes. Il a été particulièrement délicat de maintenir l'infrastructure des deux viaducs en pierre. Pour ce faire, les travaux ont assaini et amélioré la portance de certaines fondations en injectant du ciment.

Les viaducs doivent désormais supporter l'auge à ballast en béton armé, qui dépasse de la maçonnerie de 3,35 m, tant à droite qu'à gauche. L'auge est construite de sorte à empêcher un train qui aurait déraillé de chuter du pont. La nouvelle auge à ballast répartit les forces agissant verticalement et horizontalement dans les sens longitudinal et transversal du pont. Elle sert aussi d'élément de liaison entre les différentes piles du pont, ce qui améliore le comportement en déformation de l'ensemble du viaduc, en particulier des piles de rive. En plus d'assurer cette fonction statique, la nouvelle auge à ballast protège la maçonnerie en-dessous contre les infiltrations d'eau, prévenant ainsi les dommages à la structure portante en pierre naturelle.

Le treillis métallique de la partie centrale avait atteint la fin de sa durée de vie et a donc été entièrement remplacé. Les nouveaux appuis de pont, qui relient la construction en acier aux deux piles de rive, maintiennent la construction en place même en cas de séisme majeur. Comme une sollicitation

horizontale des appuis à la hauteur de la banquette d'appui aurait entraîné des charges trop élevées sur la maçonnerie, les forces horizontales sont transmises directement dans l'auge à ballast. Pour ce faire, l'auge à ballast de la section traversant la Sarine a été reliée par des tirants de précontrainte à l'auge en béton coulé sur place de la section plus courte du viaduc à l'est. Les forces de précontrainte appliquées sont transmises entre les deux parties de l'ouvrage par des appuis en élastomère. Comme la construction comprend des tôles métalliques intégrées, ces appuis (qui sont principalement en caoutchouc et déformables) peuvent absorber et transmettre des forces, des torsions et des déplacements sans que des éléments mobiles soient nécessaires.

Une protection sismique sans frais supplémentaires

La sécurisation sismique n'a entraîné aucun frais supplémentaire, car toutes les mesures ayant contribué à renforcer la sécurité sismique étaient de toute façon nécessaires dans le cadre de l'assainissement et du doublement de la voie. Dans son état actuel, l'ouvrage répond désormais aux normes à 100 %, et ce sans restriction.

Le plus grand défi de ce chantier était la gestion de l'interruption totale du trafic ferroviaire sur cet axe important. Une préparation minutieuse a permis de limiter la durée de l'interruption pour les travaux à cinq semaines.

Figure 54

Les appuis de pont guidés latéralement sécurisent l'ouvrage même en cas de fortes secousses sismiques perpendiculaires à l'axe du pont. Dans le sens longitudinal, la transmission des forces s'effectue par le biais de la précontrainte longitudinale des auges à ballast.



© vistadoc

Figure 55

La BLS a fait remplacer entièrement la structure en treillis métallique qui enjambe la Sarine. Malgré des exigences de sécurité accrues, qui ont nécessité le remplacement d'éléments importants, l'ouvrage a été conservé dans ses grandes lignes.



© Fürst Laffranchi Bauingenieure GmbH

6.2 Transport ferroviaire

Nouvelle cabine technique de la Zentralbahn à la gare de Horw (LU)

Un grand impact à moindre coût

Des bâtiments sans fenêtres, faits de béton, d'aluminium ou de bois et ressemblant à des conteneurs sont disposés à des intervalles réguliers le long du réseau ferroviaire. Il s'agit de cabines techniques pour le domaine ferroviaire qui abritent tous les éléments techniques nécessaires pour piloter et surveiller les aiguillages, les signaux et les éclairages des quais. Autrefois, les postes d'enclenchement étaient souvent de très grands bâtiments qui ne passaient pas inaperçus. Du personnel ferroviaire était présent pour assurer la surveillance et commander les aiguillages ou les signaux de façon manuelle. Aujourd'hui, de nombreuses opérations sont automatisées et donc commandées électroniquement. Les éléments techniques sont implantés dans des cabines et des bâtiments techniques du domaine ferroviaire. Dans la plupart des cas, il n'y a plus de personnel sur place.

Une infrastructure ferroviaire centrale

À elle seule, la division Infrastructure des CFF exploite et entretient plus de 500 cabines techniques et installations de

sécurité servant le pilotage de quelque 14 000 aiguillages et 32 000 signaux. Active en Suisse centrale, l'entreprise Zentralbahn n'a besoin que de 24 installations de ce type.

Dans le cadre de l'assainissement de la gare de Horw dans le canton de Lucerne, elle a construit une nouvelle cabine technique qui protège l'ensemble des installations de sécurité, d'électricité et de télécommunication ainsi que l'approvisionnement en électricité. Cette cabine doit répondre aux exigences en matière de protection incendie et contre les effractions et de sécurité sismique. Plutôt grand, ce bâtiment de 13 m de long a été produit par une entreprise spécialisée et livré en deux parties préfabriquées. Une grue sur pneumatique a ensuite installé la cabine sur la semelle filante en béton prévue à cet effet. Cette semelle est 50 cm plus haute que son environnement afin de protéger l'installation contre les crues.

Une mesure simple pour de grands effets

La cabine technique de Horw couvre un tronçon relativement long, de la gare de Luzern Allmend à celle de Hergiswil Matt. En cas de séisme, les ouvrages conventionnels pourraient subir des dommages, ce qui entraînerait une

Figure 56

Nouvelle cabine technique de la Zentralbahn à la gare de Horw. De petites plaques métalliques (en bas à gauche, à côté de la descente de toit) relient le cadre en acier des éléments de parois aux fondations bétonnées. Cela permet à la construction de ne pas glisser en cas de séisme.



© Zentralbahn

Figure 57

Les supports du faux-plancher sont répartis de manière uniforme sur le sol et vissés au cadre en acier de manière à résister à la flexion.



© Sven Heunert

interruption de longue durée du trafic ferroviaire, car il ne serait plus possible de garantir la sécurité de l'exploitation. L'entreprise exploitante pourrait visser les aiguillages en cas d'urgence à la suite d'un séisme, mais cette mesure restreindrait de manière extrême les capacités de transport. C'est pourquoi il est essentiel de disposer d'une technique ferroviaire répondant aux exigences parasismiques pour assurer le fonctionnement du transport par le rail.

Il n'a pas été nécessaire de prendre des mesures techniques coûteuses pour atteindre cet objectif. Des calculs ont montré que, compte tenu du faible aléa sismique dans la région, quelques plaques métalliques de 20 par 30 cm pour une épaisseur de 10 mm étaient suffisantes sur le plan parasismique. Ces plaques sont posées sur l'enveloppe externe du bâtiment et relient le cadre métallique sur le sol de la cabine technique aux fondations en béton, ceci afin que l'installation ne puisse pas glisser. Cet ancrage constructif, associé à un jeu suffisant pour les conduites et les câbles d'alimentation, prévient les arrachages des éléments précités en cas de séisme. Les coûts des calculs statiques et des matériaux nécessaires pour réaliser cette mesure simple et efficace de sécurité sismique, qui ne nécessite aucun entretien, s'élèvent à quelques milliers de francs par objet.

Pour réduire la vulnérabilité des installations techniques à l'intérieur de la cabine, la Zentralbahn a vissé les éléments particulièrement à risque (comme les armoires de commande) les uns aux autres et les a fixés en haut du mur. Les supports du faux-plancher compact sont répartis de manière uniforme sur le sol et vissés à la construction de manière à résister à la flexion.

Figure 58

Plusieurs de ces cornières en acier relient les armoires pour une alimentation sans interruption (ASI) les unes avec les autres, ce qui augmente la surface au sol et réduit donc leur élancement.



© Sven Heunert

Figure 59

Sécurisation en haut d'une armoire ASI grâce à une cornière en acier fixée au mur.



© Sven Heunert

6.3 Transport ferroviaire

Nouvelle toiture pour le quai de la gare de Muttentz (BL)

Des approches ingénieuses pour une structure porteuse robuste

L'immense gare de triage de Bâle-Muttentz sert avant tout à la formation des trains marchandises sur l'axe ferroviaire nord-sud. Muttentz accueille également une gare voyageurs. Dans le cadre du projet d'extension des installations ferroviaires lancé en 2020 pour désenchevêtrer cet emplacement (« Entflechtung Basel-Muttentz »), l'agencement du labyrinthe de voies et d'aiguillages est en train d'être revu. L'objectif principal est de simplifier et de rendre plus performant le trafic voyageurs et marchandises à l'entrée de la gare de Bâle CFF afin d'assurer davantage de liaisons ferroviaires et une meilleure ponctualité. Les CFF ont introduit pour ce faire différentes mesures. Par exemple, une adaptation des gares aux exigences actuelles, la remise en état d'un pont, et la construction d'un nouveau pont ferroviaire de 360 m de long ainsi que d'une passerelle pour la mobilité douce.

Un aléa sismique élevé

Ce projet d'envergure concerne également la gare CFF de Muttentz. La modernisation devrait permettre de répondre

aux besoins des personnes en situation de handicap et aux exigences de sécurité sismique. Elle devrait aussi tenir compte, dans la conception du projet, du bâtiment de service sud, qui est un monument protégé. Un des changements les plus visibles est le nouveau quai de 230 m de long de la voie 4, qui comprend une toiture de 73 m de long couvrant le nouvel accès au passage inférieur pour piétons à l'est de l'ancien bâtiment de service. S'arrêteront sur cette voie 4 notamment les trains RER en provenance de Bâle.

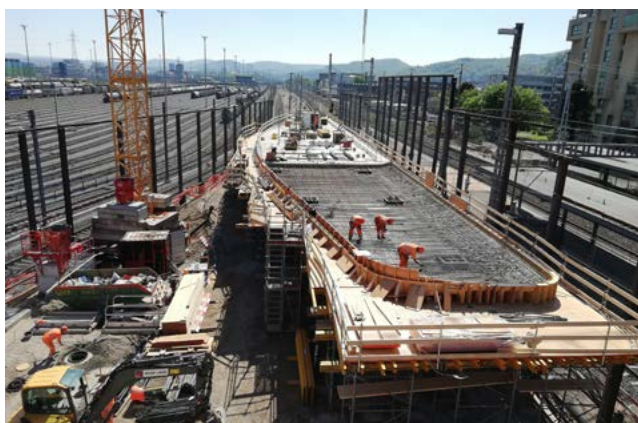
La gare de Muttentz est située dans la zone sismique Z3a, soit celle présentant un des aléas les plus élevés du pays. Les CFF ont tenu compte des actions sismiques de cette zone dans leurs calculs de dimensionnement et ont classé la toiture du quai dans la CO II. L'objectif est, en cas de séisme, de protéger les personnes sur le quai et de garantir le fonctionnement de toutes les installations.

Une structure porteuse aux connexions ductiles

La structure porteuse du toit du quai a été dimensionnée selon le microzonage sismique en vigueur pour la région bâloise, qui dépend du sol de fondation. Dans les choix liés au mode de construction, le projet a veillé à concevoir les zones de transmission des forces (les liaisons des piliers avec les fondations et avec le toit) de sorte que

Figure 60

Les éléments en acier des piliers qui soutiennent la marquise sont intégrés dans les armatures de la structure du toit. Grâce à une conception ductile des connexions, la structure porteuse présente une grande robustesse, même en cas de séisme majeur.



© CFF

Figure 61

Le toit du nouveau quai 4 de la gare de Muttentz respecte les principes de la construction parasismique. Les installations techniques telles que l'éclairage du quai sont fixées de sorte à résister aux séismes.



© CFF

celles-ci soient ductiles. Il est ainsi possible d'exclure les mécanismes de rupture fragiles même en cas de séisme majeur. Pour que la structure porteuse puisse, en cas de séisme, absorber les moments de flexion et transmettre les forces de traction, le projet a relié les barres d'armature et les éléments de construction en acier par des manchons spéciaux approuvés pour les contraintes dynamiques.

La nouvelle toiture du quai est un exemple éloquent de la compatibilité entre la sécurité sismique d'une part et la complexité esthétique et géométrique des ouvrages d'autre part. Lorsque les concepts pour les structures porteuses sont bien pensés, les différents éléments s'assemblent de manière harmonieuse. La forme géométrique complexe du couvert a cependant nécessité une concertation précise entre les bureaux d'études et les entreprises de construction.

Une protection contre la chute d'éléments

Le toit du quai de Muttenz comprend différentes installations, notamment des chemins de câbles, un éclairage, des haut-parleurs, de lourds panneaux d'affichage électroniques renseignant sur les trains ainsi que d'autres signalisations. Pour pouvoir garantir la sécurité des voyageurs ferroviaires même en cas de séisme, les éléments de montage ont été dimensionnés en conséquence.

Figure 62

Les piliers en béton supportant le toit du quai ont été préfabriqués en usine. Ils sont dotés, en pied et en tête, d'éléments en acier encastrés avec des manchons soudés afin de permettre une transmission ductile des forces.



Dans le cas du bâtiment de technique ferroviaire de Muttenz, la sécurité sismique concerne en premier lieu les installations techniques commandant des parties importantes du trafic ferroviaire. Partant, le projet a par exemple sécurisé les armoires du local informatique contre les actions sismiques en les vissant afin que celles-ci ne puissent pas se renverser et continuent de fonctionner en cas de séisme. Des pannes des postes d'enclenchement entraîneraient le cas échéant des problèmes non seulement sur ce tronçon, mais aussi, par effet domino, dans tout le nord-ouest de la Suisse.

Figure 63

Tête de pilier dans le coffrage avec l'armature en partie vissée via des manchons.



Aviation civile

7 Degré de protection accru pour les aéroports également

Dans les airs, les secousses sismiques n'ont pas d'impact sur le trafic aérien. Mais au sol, elles menacent les installations comme les terminaux, les tours de contrôle, les hangars et d'autres infrastructures des aéroports. Certes, la Confédération n'a pas d'obligations de propriétaire dans ce cas. Cependant, en raison de l'importance du trafic aérien à l'échelle du pays, elle est appelée à prendre certaines responsabilités et à vérifier que les exigences sismiques soient respectées lors de la planification, de l'approbation et de la concession.

Les aéroports améliorent l'accessibilité d'une région et donc son attrait. Cela se traduit par des avantages économiques, qui sont tributaires d'une bonne connexion internationale avec les principales plaques tournantes mondiales du trafic aérien. Cela se traduit également par des avantages pour la population, lorsque le temps pour rejoindre l'aéroport pour des voyages d'affaires ou de loisirs est relativement court ou lorsqu'un hélicoptère de secours peut intervenir rapidement en cas d'urgence.

Dans son rapport sur la politique aéronautique de la Suisse de 2016, le Conseil fédéral a réalisé une analyse de la situation. Il a ainsi renforcé sa volonté de prendre les devants et de concilier développement durable et aviation civile. Cette dernière doit faire état d'un niveau de sécurité élevé, être utile à l'économie, satisfaire la demande de mobilité de la population et de l'économie et éviter autant que possible de porter atteinte à l'être humain et à la nature.

L'aviation civile suisse dispose actuellement de 3 aéroports nationaux, de 11 aéroports régionaux, de 49 champs d'aviation et de 25 terrains d'atterrissage pour les hélicoptères. En 2021, quelque 3000 aéronefs étaient immatriculés en Suisse et quelque 20 millions de personnes ont utilisé un aéroport civil ou un champ d'aviation (départ, arrivée ou correspondance). Ce nombre est toutefois encore largement limité par les restrictions liées à la pandémie

de COVID-19, avant laquelle l'aviation civile enregistrait bien plus de passagers (58 millions). Par ailleurs, environ 500 000 t de fret et de courrier aériens ont été transbordés, pour une valeur de plus de 70 milliards.

Une procédure d'approbation des plans décisive

En 1998, le Conseil fédéral a adressé un message au Parlement dans la perspective de faciliter les procédures d'autorisation pour une série d'installations. Du point de vue du droit aérien, cela signifie que « la procédure d'approbation des plans réglera toutes les questions liées à l'infrastructure aéronautique ». Le Plan sectoriel de l'infrastructure aéronautique définit des aspects essentiels tels que le site, l'ampleur des agrandissements et le but des aérodromes. L'ordonnance sur l'infrastructure aéronautique règle les détails des procédures relatives à l'approbation des plans. Elle prévoit également que la surveillance revient à l'Office fédéral de l'aviation civile (OFAC). Cette tâche consiste à surveiller ou faire surveiller « l'application des exigences spécifiques à l'aviation, des exigences opérationnelles, des exigences de la police des constructions [...] ».

Dans le but d'améliorer la protection sismique des installations au sol, l'OFAC a élaboré, sous l'égide de l'OFEV, un manuel intitulé « Évaluation de la sécurité sismique dans l'approbation de projets de construction de l'aviation civile ». Ce document se fonde sur l'état actuel de la technique tel que décrit dans les normes pour les structures porteuses de

la SIA. Il comprend un tableau listant les caractéristiques permettant de déterminer la classe d'ouvrages (CO). Parmi les critères déterminants, on citera notamment le nombre de personnes fréquentant l'ouvrage (ou la fréquentation maximale possible), la fonction d'infrastructure, la valeur matérielle à risque ainsi que l'impact sur l'environnement si l'ouvrage est endommagé.

Le manuel définit en outre les documents à inclure dans le dossier d'approbation de projet. À partir de la CO II, la convention d'utilisation et la base du projet (comprenant le concept de la structure) constituent les documents utilisés pour l'évaluation du respect des exigences de sécurité sismique. Alors que la convention d'utilisation porte sur les objectifs de protection et d'utilisation principaux du projet de construction, la description dans la base du projet présente les situations de danger considérées, les propriétés du sol de fondation, les hypothèses concernant le modèle de la structure et le modèle d'analyse et les risques résiduels considérés comme acceptables. Un concept de la structure porteuse parasismique est le prérequis d'un niveau de sécurité élevé.

La sécurité sismique des installations de l'aviation civile

L'autorité unique pour la délivrance d'une autorisation de construction d'un aéroport est l'OFAC. Le domaine Séisme de l'OFEV évalue si un projet de construction répond aux exigences normatives de sécurité sismique. La procédure et le manuel reposent sur le programme « Mitigation des séismes – Mesures de la Confédération », qui est arrêté tous les quatre ans par le Conseil fédéral.

En raison de leur importance et de leur forte fréquentation, les aéroports nationaux (au minimum) sont rangés dans la CO II, pour laquelle la norme sur les structures porteuses de la SIA prévoit un degré de protection accru. En revanche, de nombreux bâtiments d'aéroports de moindre taille appartiennent à la CO I. Les ouvrages revêtant une importance centrale pour la maîtrise des événements, comme les services du feu dans la zone d'un aéroport, doivent être catégorisés dans la CO III. Selon le manuel, les calculs doivent dans ce cas également faire partie du dossier d'évaluation.

Aide à l'exécution

- *Évaluation de la sécurité sismique dans l'approbation de projets de construction de l'aviation civile ; OFAC / OFEV, Manuel, 2020*

7.1 Aviation civile

Aéroport de Genève (GE)

Une plaque-tournante internationale à grande affluence

L'aéroport national de Cointrin relie la région de Genève aux plus grandes métropoles du monde. Des avions y décollent pour plus de 140 destinations. Genève accueille environ 3000 entreprises multinationales et 350 organisations non gouvernementales. Parmi ces institutions figurent des acteurs importants comme l'Organisation mondiale de la santé et l'Organisation mondiale du commerce.

Avant la baisse liée à la pandémie de COVID-19, l'aéroport de Genève avait totalisé en 2019 près de 18 millions de passagers (départ, arrivée ou correspondance). Plus de 33 000 emplois dépendent directement ou indirectement des activités de l'aéroport. Quelque 11 000 postes sont implantés sur le terrain de l'aéroport et répartis parmi les 200 entreprises présentes. Toutes ces personnes s'attendent à être en sécurité même en cas de séisme.

Un nouveau terminal pour remplacer un pavillon provisoire

Cet aéroport inauguré en 1920 a connu sa plus grande extension dans les années 1970. À l'époque, la zone a accueilli quatre nouveaux hôtels pour 1150 chambres ainsi que trois centres d'affaires internationaux. Un pavillon

gros-porteurs avait été construit à titre provisoire en 1975 et n'a été remplacé qu'à l'achèvement en 2021 de la nouvelle Aile Est. Cette nouvelle aile est conçue avant tout pour les gros-porteurs et les liaisons intercontinentales. Compte tenu du nombre de personnes fréquentant le terminal, celui-ci appartient à la CO II. Les exigences de cette classe d'ouvrage et les propriétés du sol de fondation ont été intégrées aux calculs de la structure porteuse du bâtiment, dont la stabilité est ainsi garantie même en cas de séisme.

Cet ouvrage se distingue non seulement par ses impressionnantes dimensions, mais aussi par l'élégance du parallélépipède incliné, son ossature en acier en porte-à-faux et ses surfaces vitrées. Cette prouesse architectural a nécessité des mesures spécifiques afin de garantir la stabilité en cas de secousses sismiques. La portance du bâtiment a dû être calculée séparément pour le sens longitudinal et le sens transversal.

Comme le bâtiment fait plus de 500 m, un joint de dilatation est placé tous les 80 m sur les poutres en acier horizontales afin que la structure puisse absorber les déformations dues aux changements de température.

Des ouvrages ainsi subdivisés sont vulnérables aux séismes, car les différentes parties du bâtiment peuvent s'entrechoquer lorsque leurs mouvements sont contraires. Les dispositifs parasismiques prévus à l'Aile Est maintiennent le bâtiment

Figure 64

Des parois d'acier et de verre en porte-à-faux caractérisent cette nouvelle aile trapézoïdale de l'aéroport.



© Joas Souza

Figure 65

Grâce aux joints de dilatation, la construction peut, dans le sens longitudinal, s'adapter aux variations de température. Les STU transmettent cependant les charges dynamiques soudaines liées aux séismes.



© zVg INGÉROP Paris

ensemble et empêchent ainsi que les différents blocs se déplacent différemment les uns par rapport aux autres dans le sens longitudinal. Les chocs entre les diverses parties du bâtiment sont ainsi évités.

Dans le sens transversal, le terminal est stabilisé par une construction en acier en forme de trapèze divisée en deux triangles indéformables. La transmission des forces des dalles d'étage à la structure en acier s'effectue à l'aide d'unités de transmission des chocs (STU). Ces STU contiennent des liquides visqueux et permettent des déplacements libres pour des contraintes agissant lentement, qui surviennent par exemple à la suite de variations de température. Si cependant, comme c'est le cas lors d'un séisme, de fortes charges dynamiques apparaissent soudainement, les STU offrent une connexion rigide au système de renforts. Ce fonctionnement est comparable à ce qui se produit avec une cuillère dans un pot de miel. Si l'on sort lentement la cuillère du pot, il n'y a que peu de résistance. Si l'on effectue un mouvement rapide cependant, c'est bien plus difficile.

De la nécessité de maintenir les chemins de fuite libres

À l'intérieur du terminal, il s'agissait surtout de prévenir, en cas de séisme, la chute ou le basculement de plafonds, de panneaux ou de cloisons de séparation pour éviter de blesser des personnes, mais aussi d'encombrer des chemins de fuite. En raison de l'importante hauteur de chute potentielle, le projet devait avant tout sécuriser les lourds panneaux suspendus

aux plafonds. Certains éléments de façade ont également été dotés de fixations supplémentaires afin de prévenir toute chute sur des passants en cas de séisme.

Par ailleurs, une sécurisation est prévue pour les faux-planchers accueillant des conduites. Si ces planchers s'effondraient lors d'un séisme, les câbles situés dessous pourraient être endommagés. Sont également fixés aux cloisons et aux plafonds les installations d'alimentation électrique de secours ou autres installations électriques, les armoires informatiques, les appareils de lutte contre le feu, les éléments d'éclairage ainsi que des composants de chauffage.

Un site en évolution permanente

Depuis l'ouverture de l'aéroport de Cointrin il y a une centaine d'années, les installations ont constamment évolué. Cette évolution se voit également dans les bâtiments annexes qui ne sont pas directement liés au trafic aérien. Après la surélévation de trois étages en 2002 du parking couvert P51 construit sur deux étages au début des années 1980, des travaux de sécurité sismique ont été entrepris en 2021. Ces travaux consistaient en particulier à renforcer les longerons entre les fondations et la structure porteuse en acier. Par ailleurs, ils ont assaini les consoles d'appui de la construction en acier afin de prévenir un effondrement des dalles d'étage. Une couche de protection a en outre été appliquée sur l'acier pour empêcher la corrosion du métal.

Figure 66

Dans le sens transversal, une construction en forme de trapèze divisée en deux triangles indéformables stabilise le terminal.

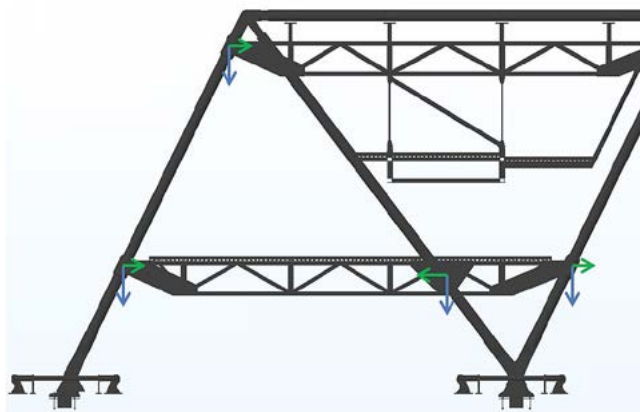
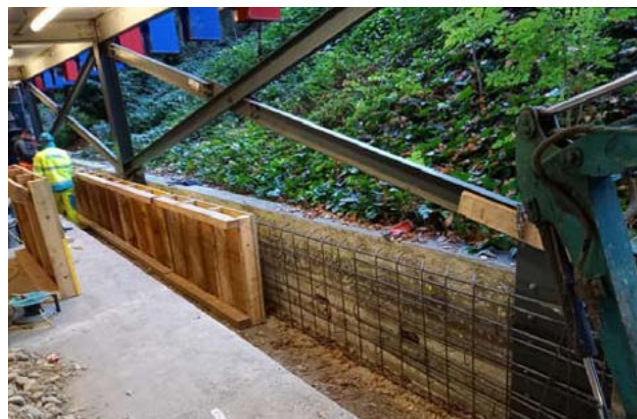


Figure 67

Des croix en acier installées ultérieurement et des murs de fondation fortement armés renforcent le parking P51 de l'aéroport de Genève.



7.2 Aviation civile

Aérodrome de Gstaad-Saanen (BE)

De la haute technologie en bois

L'aérodrome de Saanen a trouvé ses sources dans l'armée. En effet, au début de la Seconde Guerre mondiale, alors que l'armée s'était retirée dans les Alpes – dans le « Réduit », comme on l'appelait – les aérodromes sur le Plateau n'étaient plus suffisamment protégés. C'est pourquoi il a été nécessaire de bâtir des aérodromes dans les montagnes. En 1939 a été ouverte la nouvelle base aérienne de soutien à Gstaad. Après la fin de la guerre, des vols civils ont progressivement, d'abord à titre exceptionnel, puis de plus en plus souvent, reçu des autorisations de décollage ou d'atterrissage. Le secteur touristique a été attiré par cette opportunité. En 1965, un premier exploitant civil a pris la responsabilité de l'aérodrome, avant la naissance en 1986 de la coopérative Flugplatzgenossenschaft Gstaad-Saanenland (FGGS). En 2011, cette coopérative a acquis l'entière propriété de cet aérodrome. La FGGS assure aujourd'hui l'exploitation civile de l'aérodrome, qui comprend des taxis aériens, des transports de matériel, des vols charter, de l'hélicoptère et des sauvetages en hélicoptère, surtout au service du tourisme.

Figure 68

Une structure en bois lamellé-collé avec des caissons creux imbriqués soutient le toit plat du terminal.



Une modernisation pour répondre aux exigences actuelles

Dès le changement de millénaire, des voix s'étaient élevées pour critiquer l'infrastructure démodée, qui ne répondait plus aux exigences modernes. On a alors montré du doigt les toilettes, très anciennes, des fissures dans les murs des hangars ou l'absence d'une installation de dégivrage, pour ne citer que quelques exemples. En 2015, la commune a accepté un assainissement général du bâtiment de l'aérodrome. Les nouveaux ouvrages ont été inaugurés en juillet 2018 : quatre hangars, dont un pour hélicoptères, ainsi qu'un terminal à deux étages.

L'aérodrome se trouve dans une zone appartenant à la classe de terrain de fondation C. En d'autres termes, le sous-sol est un peu moins stable que la roche, mais présente une meilleure portance en cas de vibrations que le sable fin non consolidé ou les matériaux d'alluvions. La zone de transition entre le nord du Valais (région avec un aléa sismique très élevé) et le Plateau, à laquelle appartient le Pays d'Enhaut (et donc Gstaad), se situe dans la zone sismique Z3a, soit la deuxième plus élevée. Cependant, comme l'aérodrome n'accueille pas un grand nombre de passagers, les ouvrages ont été placés dans la CO I.

Figure 69

Les contreventements en bois, disposés symétriquement en plan et ancrés dans les fondations, empêchent la torsion.



La sécurité sismique sous charge de neige

Pour tous les ouvrages de cet aéroport, le bois revêt à la fois un rôle esthétique et une fonction porteuse. Le bois est un matériau de construction durable et local, qui présente également de grands avantages sur le plan statique. Pour le terminal de deux étages en construction massive, le toit plat est soutenu par une structure en bois lamellé-collé et des caissons creux imbriqués. La construction des hangars repose entièrement sur le bois. Comme la forme en plan est carée et le système de contreventement, symétrique pour chacun des bâtiments, aucune torsion ne se produit en cas de séisme. Si les déformations restent moindres, alors on peut partir du principe que les portes des hangars ne se bloqueront pas et pourront s'ouvrir sans accroc même après un événement.

Le calcul des actions sismiques a dû prendre en compte les charges supplémentaires dues au poids de la neige. À haute altitude, les charges liées à la neige sur la toiture doivent être intégrées au calcul, car le poids correspondant

entre également en oscillation en cas de séisme. Il faut donc revoir à la hausse les forces d'inertie à reprendre.

Les éléments non structuraux qui pourraient tomber sur des personnes, ou endommager la structure porteuse des bâtiments ou d'importantes installations, ont été sécurisés dans les structures en bois. S'agissant de l'étage supérieur du terminal, et en particulier pour les hangars également, les spécialistes se sont basés sur la statique des ouvrages pour déterminer des points de fixation appropriés pour les tuyaux de chauffage et des sanitaires. Ces points ont été dotés de renforts locaux supplémentaires en bois. Le personnel responsable du montage a reçu des plans spécifiques à cet effet, pour placer les fixations des tuyaux exactement au bon endroit. Pour les ouvrages appartenant à la CO I, il n'est pas nécessaire de démontrer l'aptitude au service après un séisme. Cela revient à accepter le fait que l'aéroport ne puisse pas, ou pas complètement, être utilisé après un événement. La stabilité des bâtiments doit cependant être garantie pour la protection des personnes.

Figure 70

Le bois joue un rôle esthétique et fonctionnel déterminant. Aux emplacements où passent des conduites de chauffage ou sanitaires, la structure en bois a été renforcée localement.



Figure 71

Lors du calcul de l'action sismique, il fallait également tenir compte de la charge de neige attendue dans les régions de montagne.



7.3 Aviation civile

Base de la Rega à Gordola (TI)

Une protection sismique invisible à l'intérieur des parois

Le Tessin représente un terrain exigeant pour la garde aérienne suisse de sauvetage Rega. Dans cette région, les pilotes d'hélicoptères doivent naviguer à proximité de pentes boisées, de vallées étroites, mais aussi de grandes étendues d'eau. Comme 80 % des surfaces du canton sont boisées et que les hélicoptères ne peuvent pas y atterrir, les équipes d'intervention sont souvent tributaires des treuils de sauvetage. Parmi les principales causes d'intervention, on citera notamment des accidents de la circulation ou de travail, des blessures lors d'excursions en montagne ou sur les pistes de ski, ou encore des accidents de baignade. En 2023, les secouristes de la base tessinoise de la Rega ont effectué 768 interventions par les airs.

Deux organisations de sauvetage regroupées dans un bâtiment

Depuis 2013, l'équipe tessinoise de la Rega dispose d'une base répondant aux dernières exigences, située à Gordola, près de Locarno. Selon la carte de l'aléa sismique, cette

base se trouve dans la zone sismique Z1a, soit celle présentant l'aléa le plus faible en Suisse.

Le bâtiment de la Rega appartient à la CO II. Il a une forme de carré de près de 30 m par 30. Le bâtiment comprend un hangar pouvant accueillir deux hélicoptères de sauvetage AgustaWestland da Vinci autour duquel s'articule un espace en U comprenant onze pièces (notamment un local de séjour, une cuisine, plusieurs bureaux, un atelier et un garage pour les véhicules ambulanciers). Il faut en effet savoir qu'une aile de ce bâtiment modulaire est utilisée par SALVA, les services d'ambulance de Locarno et des vallées voisines. L'étage supérieur abrite quatre chambres à coucher avec chacune une salle de bain pour les membres des équipes d'intervention effectuant un service de piquet, qui doivent pouvoir partir au pied levé en cas d'urgence.

Une architecture favorisant la sécurité sismique

La base tessinoise de la Rega est caractérisée par l'utilisation de béton apparent, ce qui a facilité la tâche aux ingénieurs chargés d'intégrer à la structure porteuse les aspects de protection contre les séismes. Facilité, car toutes les parois en béton (également celles à l'intérieur du bâtiment) sont porteuses et jouent ainsi un rôle stabilisateur. À l'extrémité des parois, où les forces de traction et de compression sont plus élevées, se trouvent des cages

Figure 72

La base de la Rega à Gordola près de Locarno est caractérisée par l'utilisation de béton apparent.



© Rega

Figure 73

Grâce à la géométrie régulière et à la réalisation en béton coulé sur place, un concept de la structure porteuse parasismique a été réalisé.



© Rega

d'armature parasismiques. Ces cages s'étendent du radier jusqu'au toit.

Pour relier solidement les cages d'armature aux fondations, on les enfle sur des fers d'attente qui dépassent de la dalle de fondation. À chaque emplacement, quatre armatures de liaison en forme de L sont reliées à l'aide d'un étrier d'armature et disposées à l'extrémité des parois. Au rez-de-chaussée et au premier étage, ce sont ainsi une bonne vingtaine de ces cages d'armature qui ont été installées.

Les ingénieurs ont procédé à des calculs spécifiques et inscrit dans les plans l'emplacement exact des armatures de liaison et le diamètre nécessaire des fers d'armature. Invisibles depuis l'extérieur du bâtiment, ces renforcements améliorent la stabilité d'ensemble du bâtiment. Grâce à ces mesures, cette base de la Rega peut résister sans dommages non seulement aux séismes, mais aussi à de violentes rafales de vent.

Figure 74

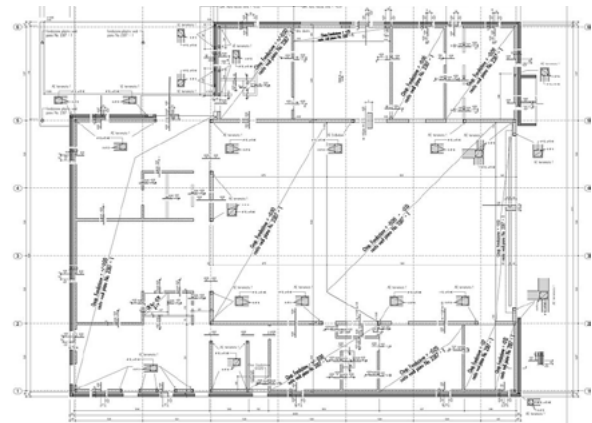
Toutes les parois sont porteuses et jouent un rôle stabilisateur.



© Rega

Figure 75

Pour résister aux grandes forces de traction et de compression, des cages d'armature parasismiques ont été bétonnées à l'extrémité des parois. Les plans indiquent non seulement l'emplacement exact des fers d'attente, mais aussi le diamètre des armatures nécessaires.



© Martinelli, Lafranchi und Partner

Figure 76

Le renforcement ponctuel de l'armature contribue à ancrer les éventuelles forces de traction dans les parois.



© Martinelli, Lafranchi und Partner

Approvisionnement en gaz naturel

8 Des gazoducs peu vulnérables

Contrairement à ce qu'on voit dans les films de catastrophe, les conduites de gaz naturel causent rarement des explosions et des incendies dévastateurs après un séisme. En Suisse, des mesures de sécurité sont prises avant tout pour les bâtiments des installations de transport par conduite. Ce sont surtout les postes de détente et de comptage qui doivent répondre à des exigences de sécurité sismique afin de minimiser les risques liés à l'approvisionnement en gaz.

Depuis les gisements en Europe du Nord jusqu'en Suisse, le gaz naturel circule à de hautes pressions de l'ordre de 16 à 70 bars. Tant qu'il se trouve dans les conduites à haute pression, ce gaz est considéré comme un bien non dédouané. Avant de rejoindre le réseau d'un exploitant local cependant, le gaz naturel doit passer par un poste de comptage douanier. Il en existe 18 en Suisse au total. Ces postes utilisent des appareils de mesure scellés pour mesurer la quantité de gaz injecté dans le réseau local et calculer les droits de douane correspondants. Aux postes de livraison qui injectent le gaz dans le réseau de distribution régional, les postes de détente et de comptage (PDC) réduisent par ailleurs la pression du gaz à 5 bars au maximum.

L'approvisionnement en gaz du point de vue des autorités

En 2012 déjà, l'OFEV avait fait examiner la vulnérabilité aux séismes des infrastructures de gaz à travers le programme de mesures de mitigation des séismes. Le rapport compare notamment les expériences faites lors de séismes majeurs à l'étranger avec les conditions géologiques, techniques et organisationnelles en Suisse.

Selon le rapport, si l'on appliquait les scénarios des quatre coins du monde à la situation helvétique, le pays se trouverait dans une situation relativement sûre. Car la Suisse dispose de sols plus favorables (moins vulnérables au tassement et à la liquéfaction) que l'Italie notamment, où de fortes secousses sismiques ont provoqué d'énormes dégâts par le passé.

D'un point de vue technique également, le rapport confirme que les conduites de gaz à haute pression en Suisse présentent une faible vulnérabilité aux séismes. Par

ailleurs, le risque que la rupture de la faille du séisme se propage jusqu'en surface est limité dans notre pays. En outre, comme le recommandent les spécialistes, il convient de poser les conduites dans le sens de la pente dans les terrains potentiellement instables. Ce pour garantir que les laves torrentielles ou les glissements de terrain éventuels s'écoulent dans le sens des conduites sans causer de gros dégâts.

Le rapport souligne en particulier la vulnérabilité aux points de passage sur des ponts, où le sous-sol et l'ouvrage peuvent se déplacer différenciellement en cas de séisme. La Suisse compte quelques centaines d'ouvrages spéciaux par lesquels traversent des conduites à haute pression. Cependant, la plupart d'entre eux ont une faible portée. Le risque de déplacement relatif est ainsi presque négligeable.

En outre, des expériences faites à l'étranger montrent que les fuites de gaz naturel et les incendies tant redoutés que celles-ci peuvent causer sont plutôt rares après un séisme et que, le cas échéant, la source du problème est presque toujours une fuite due à la corrosion. En effectuant une bonne maintenance des conduites et en prévenant l'usure du matériel, on peut ainsi se protéger contre les dégâts dus aux séismes.

Les enseignements à retenir sur le plan organisationnel

L'étude de vulnérabilité réalisée sur mandat de l'OFEV fournit toute une série de recommandations d'ordre organisationnel. Par exemple, les postes de commandement pour l'approvisionnement en gaz doivent être installés dans des bâtiments sûrs du point de vue sismique et tous les plans de réseau essentiels doivent être conservés dans des ouvrages résistants aux séismes et, si possible, de manière redondante à plusieurs emplacements physiques.

En outre, les PDC doivent être construits hors de la zone d'influence de bâtiments pouvant s'effondrer ou subir d'autres dégâts en cas de séisme. Finalement, les vannes permettant de stopper la circulation du gaz doivent être marquées de telle sorte qu'on puisse les repérer même si les bâtiments alentour se sont effondrés. Ces vannes doivent de surcroît être conçues pour rester fonctionnelles même après un séisme.

Une notice pour vérifier la sécurité sismique des installations

En raison de l'étude de vulnérabilité susmentionnée notamment, l'OFEV a élaboré la notice « Vérification de la sécurité sismique de bâtiments d'installations annexes des installations de transport par conduites sous surveillance fédérale ». L'objectif est d'éviter qu'une « quantité importante de carburant ou de combustible sous forme liquide ou gazeuse [ne s'échappe] des installations de manière incontrôlée » lors d'un séisme. La notice définit une « démarche pour une conception parasismique des bâtiments » et donne des indications sur la sécurité sismique des structures porteuses et des éléments non structuraux. La dernière page de cette notice est un formulaire à remplir pour les bâtiments neufs ou les extensions des installations de transport par conduites. Ce formulaire dûment complété doit être soumis avec le dossier d'approbation des plans à l'autorité d'approbation.

Cette notice a fait ses preuves dans la pratique en tant que base pour l'évaluation sommaire et la sécurisation des installations. Le projet d'exécution pour la station de La Tène notamment (voir exemples de cas) s'appuie explicitement sur ce document. Le projet de réhabilitation des installations à Ruswil cite également l'étude de vulnérabilité de l'OFEV.

La répartition des compétences

L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) est l'autorité de surveillance des installations de transport par conduites (oléoducs et gazoducs) en Suisse. La surveillance porte sur les risques liés à la construction et à l'exploitation des installations de transport par conduites d'une pression supérieure à 5 bars et dont le diamètre extérieur dépasse 6 cm (installations sous haute pression). En outre, l'OFEN assure la haute surveillance des conduites placées sous la surveillance des cantons. En pratique, l'Inspection fédérale des pipelines (IFP) est l'autorité de surveillance technique de toutes les installations de transport par conduites. L'IFP n'est pas

subordonnée à l'OFEN, mais est un organe indépendant intégré à l'Association suisse d'inspection technique.

La notice susmentionnée est le fruit d'une collaboration entre l'OFEV, l'IFP et l'OFEN. Les autorisations de construire et d'exploiter des installations de transport par conduites sont délivrées par l'OFEN, mais l'OFEV est entendu au cours de la procédure d'approbation des plans.

Globalement, le réseau de gaz naturel souterrain totalise en Suisse plus de 20 500 km de conduites. Quelque 2300 km sont des conduites dont la pression dépasse 5 bars. Celles-ci sont exploitées par les deux sociétés anonymes Transitgas et Swissgas ainsi que par quatre sociétés régionales. Les quelque 18 000 km de conduites à une pression inférieure à 5 bars restants sont placés sous la responsabilité des distributeurs de gaz régionaux et locaux, qui appliquent les directives de la Société suisse de l'industrie du gaz et des eaux (SSIGE).

Des bases légales et des lignes directrices

L'ordonnance concernant les prescriptions de sécurité pour les installations de transport par conduites prévoit que celles-ci doivent être protégées contre les influences mécaniques (notamment les séismes). La directive IFP tient également compte de la protection contre les séismes, en particulier dans le dimensionnement de bâtiments selon la norme SIA relative aux structures porteuses.

Selon cette directive, les installations dont la pression dépasse 5 bars (donc les PDC et les stations de compression) appartiennent à la classe d'ouvrages III, celle qui prescrit les plus hautes exigences de sécurité. Dans ce contexte, les vannes jouent un rôle de toute première importance. Celles-ci doivent rester fonctionnelles après un séisme afin qu'il soit possible d'interrompre le débit de gaz en cas d'urgence pour éviter que du gaz naturel ne s'échappe du réseau endommagé.

Aide à l'exécution

Vérification de la sécurité sismique de bâtiments d'installations annexes des installations de transport par conduite sous surveillance fédérale ; OFEV, Notice, 2021

8.1 Approvisionnement en gaz naturel

Détecteurs de séisme pour l'approvisionnement en gaz de la région de Bâle (BS)

Un système de préalerte

Le réseau dense de conduites de gaz qui circule sous terre dans la région de Bâle est la propriété des Industrielle Werke Basel (IWB). Cette entreprise assure l'approvisionnement de la région en eau, en services de télécommunication, en gaz naturel, en électricité, en chaleur à distance et fournit bien d'autres services. Parmi sa clientèle, l'IWB compte des particuliers ainsi que d'autres sociétés, dont des hôpitaux et des entreprises commerciales ayant besoin de gaz naturel pour la production. Une interruption du transport du gaz ne signifierait pas uniquement une température désagréablement froide dans les appartements, mais aussi l'impossibilité pour les hôpitaux de stériliser leurs instruments et un arrêt total de la production pour de nombreuses entreprises industrielles et artisanales. Il peut s'agir d'entreprises pharmaceutiques ou d'artisans ; par exemple une société fabricant des produits de construction. L'IWB acquiert du gaz naturel auprès de la société Gasverbund Mittelland AG. Dans les conduites de cette dernière, le gaz circule avec une pression de 50 à 70 bars. Le gaz passe par cinq postes de transfert pour arriver

aux conduites de l'IWB, avec une réduction de pression jusqu'à 5 bars. A partir de ces 5 bars, la pression est encore réduite pour répondre aux besoins spécifiques de la clientèle dans des installations de consommation. L'IWB exploite généralement un réseau à 40 mbar pour les petits clients finaux.

De précieuses secondes gagnées

Dans la région de Bâle, comme l'aléa sismique dans le Haut-Rhin est l'un des plus élevés de la région germanophone, on est sensibilisé à la problématique des séismes. En 2012, trois détecteurs de séisme ont été installés dans chacun des cinq PDC, au passage des conduites de la société GVM à l'IWB. Il s'agit d'une application pionnière pour la Suisse. Dans chaque station, les trois systèmes d'alerte fonctionnent indépendamment les uns des autres, ce qui réduit à un minimum le risque de fausses alertes. Chaque station connaît le statut des autres, car celles-ci sont reliées aussi bien par radio que par des câbles à fibre optique. Pour des raisons de sécurité, les cinq systèmes d'alerte sont aussi dotés d'une alimentation indépendante en courant de secours.

Les détecteurs de séismes sont en mesure d'identifier de faibles vibrations que l'être humain ne ressent pas. Ces ondes volumiques primaires de compression précèdent

Figure 77

L'appareil principal du système d'alerte rapide dans le poste de transfert de Schönenbuch (BL) de l'entreprise Industrielle Werke Basel (IWB).



© IWB

Figure 78

Si le système d'alerte rapide est déclenché, les conduites sont fermées automatiquement grâce aux deux vannes installées sur le côté droit.



© IWB

les futures secousses. Grâce à un algorithme intégré au système d'alerte rapide il est possible d'estimer l'intensité des ondes surfaciques destructrices (Rayleigh et Love). Les ondes volumiques secondaires de cisaillement se propagent moins vite que les ondes primaires. Ces dernières atteignent donc les emplacements des systèmes d'alerte rapide plus vite. Cela permet de gagner de précieuses secondes avant le séisme en tant que tel.

Dès que deux des trois détecteurs de séisme du système de l'IWB identifient des ondes sismiques, la vanne de sécurité du PDC concerné se ferme automatiquement, ce qui permet de ne couper du réseau d'approvisionnement en gaz que le secteur concerné. Le système envoie simultanément un signal au centre de contrôle. Pour stopper intégralement le transport de gaz dans toute la zone d'approvisionnement de l'IWB, il faut qu'au moins deux des cinq PDC envoient un signal décentralisé à tous les autres postes.

Une étude réalisée en 2013 sur mandat de l'OFEV confirme les avantages considérables que présente ce système. Elle conclut cependant qu'il serait peu utile d'introduire de tels systèmes de détection rapide des séismes sur l'ensemble du territoire suisse. Il faut savoir que, dans notre pays, la distance entre les emplacements à protéger et l'épicentre

Figure 79

Si la vanne de sécurité s'est fermée en raison d'une fausse alerte, un interrupteur d'urgence dans un boîtier jaune permet de la réouvrir manuellement.



d'un séisme n'est que de dix à vingt kilomètres en moyenne. Les ondes surfaciques destructrices arrivent ainsi très rapidement, seulement quelques secondes après les ondes volumiques primaires et secondaires. L'intervalle de temps entre les deux types d'ondes est suffisant pour fermer les vannes de sécurité, mais en principe pas pour prendre d'autres mesures. Dans tous les cas, il est certain que des personnes n'ont pas le temps de s'échapper des bâtiments.

Des équipes spécialisées pour les cas de sinistre

La technique ne fait pas tout. L'IWB dispose aussi d'un état-major d'intervention spécialisé dans les cas de sinistres qui se met au travail en cas d'avarie (une catastrophe aérienne, une attaque terroriste ou évidemment un séisme). Dans un tel scénario, une des préoccupations majeures est de garantir la sécurité de l'approvisionnement, de protéger l'ensemble des installations contre les dommages potentiels et, si l'exploitation est interrompue, de remettre celles-ci en service aussi rapidement que possible.

Figure 80

Conduites de gaz à une pression de 5 bars dans l'installation de Schönenbuch (BL). Sur ce site, le gaz naturel passe du réseau de transport de la société Gasverbund Mittelland AG (conduites orange) au réseau de distribution de l'IWB (conduites jaunes).



8.2 Approvisionnement en gaz naturel

Modernisation du poste de compression et de comptage douanier de Ruswil (LU)

Un poste de contrôle sûr pour le transport du gaz en Europe

Dans les paysages somptueux de la vallée lucernoise du Rottal se trouve le « centre névralgique » suisse du transport de gaz européen sur l'axe nord-sud : le poste de compression et de comptage douanier de Ruswil. Grâce à une modernisation réalisée il y a quelques années, l'exploitation et le bâtiment sont désormais bien protégés contre les séismes.

Le poste de Ruswil est situé à peu près au milieu du gazoduc reliant les gisements de gaz du nord de l'Europe à l'Italie (en passant par le col de Gries, dans les Alpes). L'objectif de l'installation est de réguler la quantité de gaz transportée par le gazoduc, car le volume dépend fortement de la pression. Lorsque la pression augmente, la conduite peut transporter davantage de gaz. En tant que poste de comptage douanier, l'installation de Ruswil mesure également la quantité de gaz transportée depuis la conduite de transport vers le réseau de distribution régional.

À Ruswil, quatre turbines à gaz produisent la pression nécessaire pour garantir le transport du gaz sur le gazoduc de 300 km en direction du sud. En 2021, ce gazoduc a acheminé

pas moins de 4,6 milliards de m³ de gaz. Depuis 2017, la station de Ruswil est en mesure d'inverser le sens de transport habituel du gaz (donc d'envoyer du gaz du sud vers le nord), ce qui améliore la sécurité d'approvisionnement en Europe.

La construction, l'entretien et l'exploitation de ce gazoduc sont la responsabilité de la société Transitgas SA. Pour les spécialistes, ce gazoduc de Transitgas SA intégralement composé de tubes d'acier ne présente pas de risque particulier s'agissant des dégâts dus aux séismes. Swissgas, Société anonyme suisse pour le gaz naturel est responsable du poste de comptage douanier.

Un examen de la sécurité sismique

Le poste de compression de Ruswil comprend au total onze parties d'installation, notamment des bureaux, deux bâtiments de contrôle, un entrepôt et différentes installations techniques. Sur la base des données géologiques, on estime que le sous-sol (une moraine compacte datant de la dernière glaciation) est stable et peu problématique. Les conditions phréatiques et les caractéristiques géotechniques du sol permettent en outre d'exclure une liquéfaction du sol.

En 2016, des spécialistes ont procédé à un examen de la sécurité sismique de l'ensemble des composants, puis mis en œuvre les mesures de sécurité recommandées. Il s'agissait alors en particulier de sécuriser des éléments essentiels comme des armoires de commande ou des racks de

Figure 81

L'agrandissement du bâtiment administratif de deux étages de Transitgas était l'occasion d'améliorer la sécurité sismique de l'ouvrage.



© C. Schiess, Schiess ITI AG

Figure 82

Sur la face extérieure ouest, un renforcement avec une paroi en béton reliée au radier et aux deux dalles des deux étages a été exécutée.



© C. Schiess, Schiess ITI AG

batteries de secours afin de prévenir tout renversement en cas de séisme. Lorsqu'il n'était pas possible de fixer ces éléments aux murs, ceux-ci ont été fixés au plafond. Les armoires situées les unes à côté des autres ont été reliées entre elles afin d'agrandir leur zone d'appui et ainsi d'améliorer leur stabilité. De plus, les faux-planchers accueillant des conduites ont été sécurisés à l'aide de raidisseurs horizontaux sur la dalle pour éviter qu'ils ne s'effondrent en cas d'événement.

Assainissement du bâtiment administratif

Les travaux les plus importants ont été réalisés sur le bâtiment administratif de deux étages de Transitgas SA. Depuis sa construction dans les années 1970, cet ouvrage a déjà connu plusieurs transformations légères. Après l'achèvement en 2002 du dernier tronçon dans le cadre des travaux d'extension du gazoduc traversant le col de Gries, le besoin de main-d'œuvre a augmenté. Il fallait donc également procéder à une extension du bâtiment administratif. L'occasion se présentait d'améliorer la sécurité sismique. Seules quelques parois de contreventement étaient continues sur les deux étages. Par ailleurs, la dalle relativement mince au-dessus du rez-de-chaussée était soumise à des sollicitations trop importantes et les murs en béton des locaux du rez n'atteignaient pas la base de la dalle.

En procédant à certaines permutations dans le bâtiment existant, il a déjà été possible de gagner quelques postes de travail supplémentaires. En outre, la société Transitgas a érigé une construction attenante de deux étages qui participe également à la sécurisation contre les séismes. Le complexe à deux étages au nord-est a été doté de parois extérieures en construction massive, ce qui stabilise l'ensemble du bâtiment. De plus, le mur extérieur ouest a été renforcé avec une paroi en béton, désormais solidement reliée au radier et aux dalles des deux étages. Ces renforcements de la structure porteuse, tous réalisés à l'extérieur du bâtiment existant, ont permis de beaucoup mieux protéger le bâtiment contre les dégâts liés aux séismes.

La protection du poste de comptage douanier

Il s'agissait également de protéger le poste de comptage douanier de Swisssgas situé à proximité immédiate du PDC contre les dégâts dus aux séismes. Entre deux colonnes en béton, les parois de cette construction d'une hauteur relativement élevée étaient simplement maçonnées avec des briques silico-calcaires. Pour sécuriser le bâtiment contre les dommages entraînés par les séismes, on a ancré deux diagonales en acier dans les piles en béton pour renforcer les parois en maçonnerie.

Figure 83

Pour sécuriser le poste de comptage douanier de Swisssgas contre les dommages liés aux séismes, deux diagonales en acier ont été ancrées dans les piles en béton pour rigidifier les parois maçonnées.



Figure 84

Détail des diagonales en acier ancrées dans la maçonnerie, qui améliorent la sécurité sismique de la station de mesure douanière.



8.3 Approvisionnement en gaz naturel

Poste de détente et de comptage de La Tène (NE)

Une « boîte à chaussures » parasismique

Le nouveau PDC de La Tène ressemble à une boîte à chaussures surdimensionnée. Après dix mois de travaux, ce poste a été mis en service en septembre 2020 pour remplacer l'installation vétuste de Marin-Épagnier. La conduite entre Gampelen et La Tène et la liaison en provenance du PDC de Chaumont alimentent notamment la ville de Neuchâtel en gaz naturel. Plus de 70 % des ménages s'y chauffent grâce à cet agent énergétique.

La nouvelle construction comprend, outre le gazomètre qui constitue le cœur de l'ouvrage, des locaux pour le chauffage et les installations électriques ainsi qu'un local de réserve. Le débit de ce PDC est de 6000 m³ par heure, la pression du gaz étant réduite de 64 à 5 bars.

Une construction en béton ancrée en profondeur

Déjà en raison de la nature du sous-sol, la résistance du bâtiment a été source de discussions entre les spécialistes : le sol a une forte teneur en tourbe et se tassera donc au fil du temps. C'est pourquoi le radier en béton de 30 cm d'épaisseur et ses 24 pieux en fonte ductile ont été ancrés à 15 m de profondeur dans le sous-sol. Ces pieux

ductiles ont une grande résistance et offrent également une grande marge de sécurité, même contre les actions sismiques horizontales.

Pour l'installation des éléments non structuraux, ce sont les recommandations de l'OFEV qui ont été suivies, celles figurant dans la « Vérification de la sécurité sismique de bâtiments d'installations annexes des installations de transport par conduites sous surveillance fédérale ». Toutes les armoires électriques ont été fixées de manière à répondre aux exigences de sécurité sismique. Les batteries de secours sont installées de manière fixe au sol et ne peuvent donc pas tomber. De plus, des éléments intercalaires empêchent que les boîtiers fragiles des batteries s'entrechoquent.

Les supports pour les conduites reposent librement sur le sol. En cas de séisme, ces éléments peuvent donc se mouvoir indépendamment de la structure porteuse du bâtiment et absorber les vibrations sans subir de dommages.

Une sécurisation après-coup du bâtiment existant

Si le PDC de La Tène est un ouvrage entièrement neuf, celui de Chaumont, bâti en 1980, a été assaini en 2019. La sécurisation parasismique constituait l'un des objectifs principaux de ces travaux. S'il n'y a pas eu d'autres vérifications en amont, un projet de construction est en effet un bon motif pour évaluer la sécurité sismique. Les

Figure 85

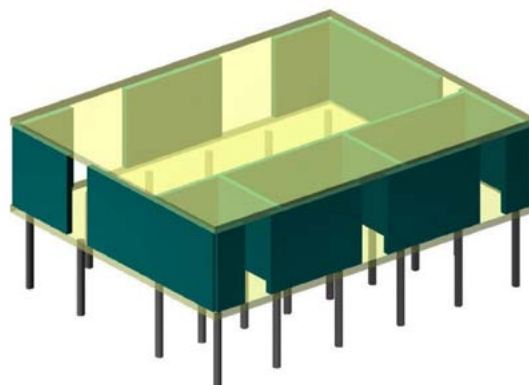
Le PDC de La Tène a été construit sur un sol à forte teneur en tourbe qui devrait se tasser au fil du temps.



© zVg Gasverbund Mittelland AG

Figure 86

Le radier en béton du PDC de La Tène a été ancré à environ 15 m de profondeur par 24 pieux en fonte ductile.



© zVg Gasverbund Mittelland AG

mesures visant à prévenir les dégâts dus aux séismes ont été prises de manière volontaire et dans l'intérêt du propriétaire d'ouvrage.

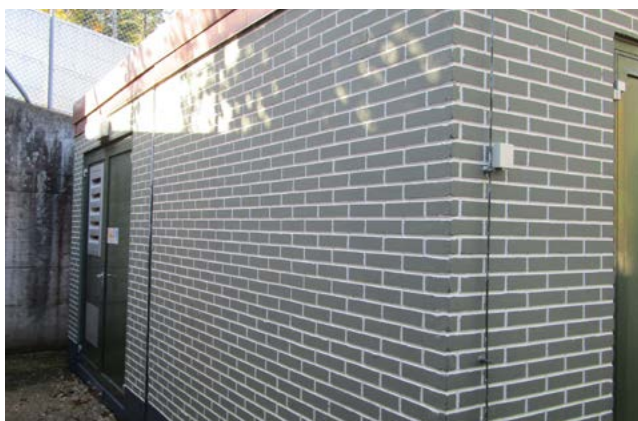
La construction d'origine de ce poste était très simple : deux boîtes en béton préfabriquées posées à l'aide d'une grue à pneus sur des fondations préparées à l'avance. Ensuite, les deux modules en béton avaient été assemblés pour former une seule unité grâce à des treillis soudés.

Il manquait toutefois une liaison mécanique entre les deux modules en béton et les fondations, ce qui constitue un défaut important au regard de la sécurité sismique. Pour pallier ce manque, d'épaisses plaques en acier de 60 cm de long et de 30 cm de haut ont été installées sur trois côtés de la construction. Fixées au radier et aux parois en béton par des chevilles composites, ces plaques réunissent sur le plan mécanique la structure porteuse de l'ouvrage et les fondations.

Par ailleurs, les joints entre les deux modules en béton ont été assainis par la même occasion. Le bois inséré dans les vides a été retiré afin d'assurer assez de jeu pour éviter que les deux parties du bâtiment ne s'entrechoquent en cas de séisme. Finalement, l'installation des armoires électriques, des batteries de secours et des conduites a été effectuée selon les exigences de sécurité sismique.

Figure 87

Au PDC de Chaumont, des plaques en acier ont été posées sur trois côtés de l'ouvrage. Celles-ci relient le module en béton aux fondations.



Approvisionnement et élimination

9 Essayer de garantir l'approvisionnement de base

Des communes, des associations communales et des entreprises dont les cantons et la Confédération sont les propriétaires majoritaires sont chargées d'assurer en Suisse l'approvisionnement de base pour différents services essentiels. On citera notamment l'approvisionnement en eau potable et en électricité, les services de communication, mais aussi l'élimination des eaux usées et des déchets. Certains de ces services revêtent une importance capitale lors d'un séisme.

Les installations d'approvisionnement et d'élimination couvrent une large palette de services et assurent en Suisse l'approvisionnement de base de la population en biens et services essentiels. Cela comprend l'approvisionnement des personnes en eau potable, en signaux télévisuels et de téléphonie mobile, mais aussi l'élimination des eaux usées et des déchets. Les exemples présentés concernent l'épuration des eaux usées, une centrale de chauffe et un centre de calculs, type d'installation indispensable à tous les services numériques du pays.

Le haut degré d'aménagement d'installations essentielles

À bien des égards, la Suisse est très bien lotie en matière d'installations pour l'approvisionnement et l'évacuation. S'agissant des raccordements au réseau à large bande, elle se place en haut du classement de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). En 2021, plus de 99 % des ménages étaient équipés d'un accès Internet à large bande. Par ailleurs, plus de 99 % des personnes de 15 à 29 ans utilisaient Internet, contre quelque 85 % tout de même chez les plus de 60 ans. Les réseaux de téléphonie mobile couvrent environ trois quarts du territoire helvétique. En 2021, 98 % de la population suisse a accédé à Internet via un téléphone mobile.

Notre pays est privilégié également en ce qui concerne l'approvisionnement en eau propre. Toutefois, dans les zones sinistrées, l'eau potable peut vite devenir un bien rare. La Suisse, bien qu'elle soit considérée comme un château d'eau, ne ferait pas exception ici, sachant que chaque personne y consomme en moyenne près de 140 litres d'eau potable par jour. Près d'un tiers de ce volume

est évacué avec la chasse d'eau. À noter qu'on ne compte pas ici la consommation d'eau dans les domaines de l'agriculture, du commerce et de l'industrie.

Ce sont 97 % des bien-fonds qui sont reliés à une canalisation. La valeur de cet impressionnant réseau souterrain en Suisse est estimée à près de 125 milliards de francs. L'eau consommée circule dans des conduites tant publiques que privées sur plus de 130 000 km, dans un réseau qui compte environ 800 stations d'épuration des eaux usées (STEP). À partir de là, l'eau retourne dans les cours d'eau et les lacs.

Des compétences qui reflètent le fédéralisme

Dans notre pays fédéraliste, les rapports de propriété de nombreuses installations sont imbriqués les uns dans les autres. Alors que les installations de communication sont possédées par différentes entreprises privées (Swisscom étant une actrice majeure proche de l'État), l'élimination des eaux usées revient aux communes, qui s'organisent souvent en organisations régionales poursuivant un but commun.

Selon l'Association de réseaux de communication Suisse-digital, le réseau de communication helvétique comprend environ 190 sociétés privées ou de droit public réparties dans toute la Suisse et au Liechtenstein. Outre les entreprises de communication conventionnelles comme Swisscom, les acteurs du secteur sont surtout des entreprises électriques et des prestataires de télévision par câble. Ces acteurs possèdent et entretiennent des câbles en cuivre et en fibre optique qui acheminent vers trois millions de ménages au total des services de télévision, de radio, du réseau Internet et du réseau fixe, et fournissent aussi certains

services de téléphonie mobile. La commission fédérale de la communication (ComCom) a octroyé à Swisscom une concession de service universel.

Les STEP et les canalisations ont été pour une bonne partie construites dans les années 1970, avec une généreuse participation financière de la Confédération. Il a ainsi été possible, entre 1960 et 2005, de faire grimper la part des ménages raccordés aux stations d'épuration des eaux usées de 12 % à 97 %. Les communes sont chargées de l'entretien des STEP.

L'élimination et l'approvisionnement dans le viseur de la Confédération

Sur mandat de l'OFEV, la société Studer Engineering s'était déjà intéressée en 2012 aux effets potentiels des séismes sur les systèmes d'égouts. Dans le cadre de cette étude, la société avait commencé par analyser la vulnérabilité des installations existantes. Sur la base des résultats, les spécialistes avaient ensuite élaboré des recommandations en matière de sécurité sismique et développé des critères pour évaluer les risques pour l'environnement à la suite d'un séisme. Ils avaient par ailleurs conçu un concept de vérification à plusieurs niveaux pour les installations existantes. L'étude visait ainsi à renforcer la prise de conscience pour les problématiques de sécurité sismique dans le domaine des eaux usées et à favoriser la responsabilité personnelle des responsables. L'étude a été réalisée avec l'aide d'un groupe de soutien et d'accompagnement comprenant l'Association suisse des professionnels de la protection des eaux et une sélection représentative d'exploitants de diverses STEP.

Ce rapport de l'OFEV de 2012 a ensuite circulé pour atteindre le niveau cantonal. C'est ainsi notamment que le service des déchets, de l'eau, de l'énergie et de l'air (AWEL) du canton de Zurich a cité l'étude dans son manuel de 2018 sur la prévention des risques sismiques pour les installations d'approvisionnement en eau et d'élimination des eaux usées.

En 2019, l'OFEV a publié un rapport sur la gestion de crise et la continuité d'activité en cas de séisme. La publication liste notamment des dégâts aux infrastructures pour les eaux et les eaux usées qui ont pu être constatés à l'étranger dans des contextes de séismes majeurs, par exemple à L'Aquila en Italie en 2009 ou à Christchurch en Nouvelle-Zélande en 2011. Elle s'intéresse par ailleurs aux dommages redoutés aux

installations de communication en cas de rupture de câbles et de pannes d'ordinateurs. À l'étranger, la vulnérabilité de ces éléments a affecté la maîtrise des dégâts dus aux séismes dans des proportions variables. Comme le montrent les expériences dans le domaine, il convient d'accorder une attention particulière aux éléments non structuraux des installations de télécommunication tels que les armoires de commande et les groupes électrogènes de secours.

Anwendungshilfe

- *Séismes et infrastructures – Réseaux d'assainissement* ; étude sur mandat de l'OFEV, 2012 (extrait du rapport traduit en français)

9.1 Approvisionnement et élimination

Station d'épuration des eaux usées d'Opfikon (ZH)

Des pinces et des cornières en acier contre les forces sismiques

Inaugurée en 1962, la STEP de Kloten Opfikon comprenait au départ une étape de traitement mécanique et une étape biologique, complétées par une digestion des boues. La précipitation du phosphate est arrivée plus tard. En 1989 ont commencé des travaux d'extension, notamment pour répondre à la croissance de la population dans la région. Ces travaux concernaient en particulier les villes de Kloten et d'Opfikon ainsi que l'aéroport de Zurich. La STEP disposait désormais non seulement de capacités supplémentaires, mais aussi d'autres étapes de procédés, en particulier pour la nitrification, la dénitrification, la filtration ainsi que pour la déshydratation et le séchage des boues d'épuration. En 2017, la STEP a connu un autre assainissement et une autre extension. Elle a alors été une des premières STEP de Suisse à être dotée d'une étape biologique avec utilisation de biomasse granulée ainsi qu'une étape de traitement dédiée à l'élimination des micropolluants.

Figure 88

Le plan circulaire des tours de digestion garantit un transfert de charge optimal en cas de séisme.



L'extension de cette STEP était l'occasion de vérifier la sécurité sismique des ouvrages existants et planifiés. Pour les emplacements où des parties de bâtiments sont séparées par des joints de dilatation, les spécialistes ont divisé les modèles de calcul selon ces séparations, puis modélisé la sécurité sismique des diverses parties des bâtiments de manière séparée. Cette approche permet de saisir le comportement effectif des constructions de manière réaliste en cas de séisme.

Lors de la vérification, les ouvrages existants se sont tous distingués par le fait qu'ils respectaient tous les normes en vigueur sur les structures porteuses et par là même toutes les exigences relatives à la sécurité sismique. Les seules parois non porteuses de ces bâtiments sont en forme de U, si bien qu'il est possible d'exclure un basculement si le scénario du séisme se réalise.

Sur le site de la station d'épuration, les tours de digestion circulaires attirent l'attention. L'eau et la boue se trouvant à l'intérieur entreraient en oscillation en cas de séisme et viendraient exercer des pressions supplémentaires sur les parois. Les spécialistes ont cependant pu démontrer par la

Figure 89

Éléments vissés au sol à l'étape de prétraitement des boues.

Les évidements circulaires aménagés dans le sol garantissent que les conduites qui le traversent ne soient pas endommagées en cas de mouvements d'un séisme.



modélisation que la forme circulaire des tours de digestion garantit une transmission optimale des efforts. On peut ainsi exclure des dommages importants.

Des améliorations pour la nouvelle construction

Quelques améliorations étaient nécessaires dans le nouveau bâtiment de prétraitement. Les parois non porteuses en briques silico-calcaires auraient pu s'effondrer en cas de séisme. Partant, elles ont été fixées en tête de mur à l'aide de cornières en acier.

Par ailleurs, plusieurs éléments n'étaient pas protégés contre les déplacements. Il s'agissait notamment de pompes, de soufflantes, mais aussi de conduites d'évacuation, de bacs de rétention ainsi que des purificateurs d'air et des ventilateurs d'évacuation. Ces éléments ont été fixés au sol a posteriori à l'aide de pinces ou de cornières en acier pour prévenir les glissements.

Les spécialistes ont découvert certaines faiblesses également sur le toit de la nouvelle construction. Par exemple, les biofiltres sur la toiture avaient été déplacés sur leur socle lors d'une intempérie. Ces filtres sont désormais fixés

aux quatre coins avec des profilés en acier. De plus, les conduites d'évacuation d'air vers l'échangeur de chaleur et aussi l'échangeur de chaleur en tant que tel ont été sécurisés de sorte qu'ils ne puissent pas glisser en cas de séisme.

Le rapport de vérification a cependant relevé des solutions conformes aux principes de sécurité sismique dans la majorité des cas. Par exemple, les installations électriques et d'aération ont depuis le début été suffisamment fixées à la structure porteuse ou au sol ; le système d'aération a été fixé de manière flexible au plafond ; les armoires électriques, assemblées les unes aux autres pour augmenter leur surface d'appui et ainsi prévenir tout basculement.

Figure 90

Dans le local des pompes, les conduites sont fixées à la structure porteuse.



Figure 91

L'étape biologique dans la station d'épuration rénovée. Grâce à la bonne qualité du béton, qui résistera aussi à un séisme, les nouveaux réacteurs ont pu être construits sur l'ancienne structure.



9.2 Approvisionnement et élimination

Centre de données de l'EPFL (VD)

La sécurité sismique et la durabilité sous un seul toit

La Suisse est le pays le plus novateur au monde. En 2022, elle a annoncé 8442 nouveaux brevets à l'Office européen des brevets. Les universités et autres hautes écoles ont largement contribué à ce succès. Pour leurs activités de recherche et de développement, ces institutions ont besoin d'équipements optimaux pour les auditoriums, les laboratoires, les centres de recherche et d'autres installations. Toutes ces infrastructures doivent être protégées contre les dégâts que peuvent causer les séismes.

L'Université de Lausanne (UNIL) compte plus de 17 000 personnes immatriculées, du premier cycle jusqu'au doctorat. À ce nombre s'ajoutent environ 13 500 étudiants et doctorants de plus de 120 pays qui fréquentent l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Avec un corps enseignant comptant près de 1000 membres, cette zone à l'ouest de Lausanne, entre Renens et Écublens (VD), est un véritable carrefour intellectuel très dynamique.

Un refroidissement qui exploite l'eau du système de chauffage

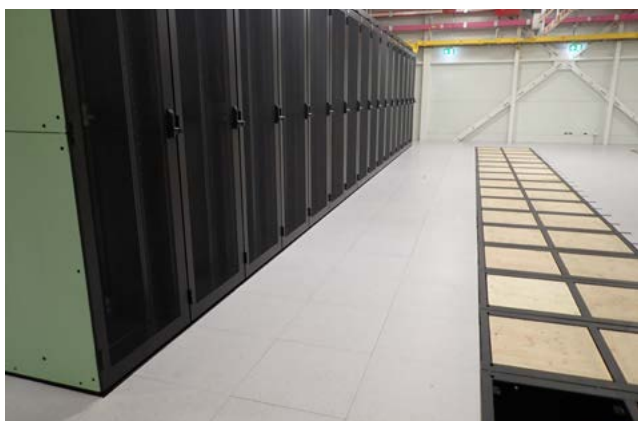
Pour son nouveau centre de données, l'EPFL a créé des synergies entre ses systèmes de chauffage et de refroidissement. Hébergé dans un bâtiment rouge qui ne passe pas inaperçu près de l'arrêt du M1 UNIL-Sorge, le centre de données se trouve un étage au-dessus de la centrale de chauffe. Le centre offre des capacités de calcul et de stockage pour la haute école et accueille, en tant que centre le plus récent parmi les trois existants, des infrastructures particulièrement sensibles, critiques et à haute intensité énergétique.

Ce bâtiment appartenant à la classe d'ouvrages (CO) II présente des exigences élevées en matière de sécurité structurale. Même s'il a repris l'emplacement d'une ancienne centrale thermique, il s'agit globalement d'un nouveau bâtiment. La façade et la toiture sont entièrement recouvertes par des panneaux photovoltaïques qui fournissent 200 kWc de puissance. Le centre de données est implanté à l'étage supérieur à la nouvelle centrale thermique de l'EPFL.

Pour refroidir ses serveurs, le centre utilise de l'eau dont la centrale thermique de la haute école a exploité la chaleur. Cette eau circule dans les portes des armoires à serveurs et vient les refroidir. En circulant dans les serveurs, l'eau atteint

Figure 92

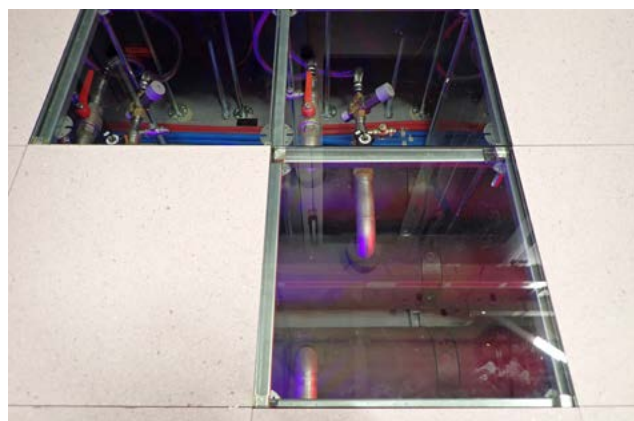
Les armoires à serveurs du centre de données de l'EPFL sont posées sur des cadres métalliques ancrés dans la dalle du sol.



© OECOCOM, Lucienne Rey

Figure 93

Sous le faux-plancher se trouvent les conduites d'eau pour le système de refroidissement du centre de données.



© OECOCOM, Lucienne Rey

une température de 25 ° C. Elle est ensuite réinjectée dans le circuit de chauffage. Cette approche permet de récupérer environ 80 % de la chaleur produite par les serveurs à des fins de chauffage.

Des cadres fixes pour les armoires à serveurs

Le centre de données abrite des armoires à serveurs massives (jusqu'à un poids de 2 t) et leurs racks. Ces armoires sont solidement posées, chacune dans un cadre métallique ancré au radier. Cette construction permet de faire passer sous le faux-plancher les conduites d'eau du système de refroidissement du centre de données.

Sous le plafond du centre de données passent des tracés électriques ainsi que les câbles électriques et de fibre optique servant à la transmission des signaux. Les tracés électriques reposent sur des profilés métalliques protégés contre les glissements ou les chutes par des bloqueurs en métal.

Des mesures contre les coupures de courant

À côté du centre de données se trouvent les quatre conteneurs de la zone énergétique abritant l'alimentation électrique de secours. Il s'agit d'une alimentation électrique sans interruption (ASI) avec batteries. Si l'installation détecte une panne de courant, le groupe électrogène de secours prend le relais pendant quelques secondes pour fournir au centre de

données l'électricité qui fait défaut. Si l'alimentation électrique normale est interrompue sur une longue période, il est ainsi possible de garder les serveurs sous contrôle et de les arrêter sans perdre de données.

Deux des conteneurs ASI de 14 t environ sont posés sur une structure métallique sécurisée contre les mouvements à l'aide de cales d'acier. Deux autres conteneurs sur le toit abritent des filtres et la cheminée d'évacuation. Ils sont donc plus hauts que les conteneurs du groupe électrogène. Pour éviter leur basculement, ces éléments ont été fixés les uns avec les autres, de toit à toit, à l'aide d'un profilé métallique.

Les batteries ne sont pas la seule solution pour assurer un approvisionnement en électricité continu. Par exemple, dans le centre de calculs de la Confédération à Frauenfeld (TG), l'alimentation en courant de secours repose sur une installation ASI dynamique, qui n'utilise non pas des batteries pour stocker l'énergie, mais une masse oscillante. Cette masse est entraînée en permanence par un moteur électrique et possède une énergie de rotation élevée. Pendant le bref intervalle de temps s'écoulant entre une panne de courant dans le réseau et le démarrage du groupe de secours, cette masse transmet son énergie de rotation. Ce système rotatif sert ainsi à démarrer rapidement l'alimentation de secours et à couvrir le bref déficit d'électricité.

Figure 94

Des bloqueurs en métal empêchent les tracés électriques du centre de données de glisser ou de tomber.

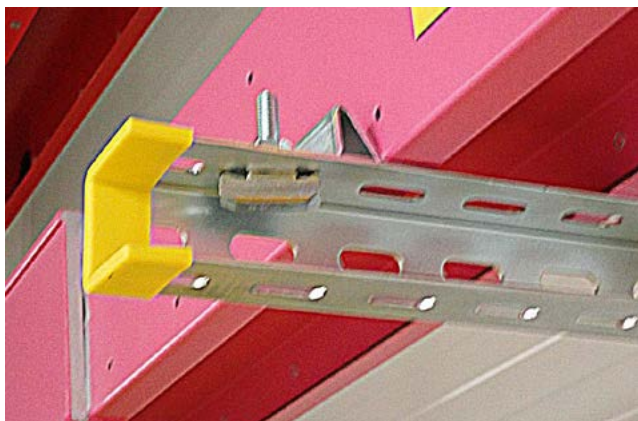


Figure 95

Pour éviter que les containers du groupe électrogène de secours ne basculent en cas de séisme, ils sont reliés entre eux par un profilé métallique de toit à toit.



9.3 Approvisionnement et élimination

Installations de chauffage et de refroidissement des hautes écoles vaudoises (VD)

De l'énergie puisée dans le lac

Pour les hautes écoles vaudoises, la proximité du Léman était une invitation à se servir du lac comme fournisseur d'énergie. En 1978 déjà, l'UNIL et l'EPFL avaient opté pour cette technique alors visionnaire à l'époque : refroidir les bâtiments avec l'eau du lac. En 1986, l'EPFL s'est dotée de pompes à chaleur afin de rendre également son chauffage plus respectueux de l'environnement. À la fin de son parcours à travers différentes installations de chauffage et de refroidissement, l'eau retourne en partie dans la Sorge et en partie directement dans le Léman.

Après plus de 30 ans d'exploitation, l'installation était obsolète sur le plan technique et ne remplissait plus les exigences de durabilité. C'est pourquoi les responsables ont engagé en 2019 une autre étape d'extension.

Des conduites stables

Pour moderniser l'infrastructure de chauffage et de refroidissement, il fallait commencer par extraire davantage d'énergie (et donc plus d'eau) du Léman. C'est pourquoi la conduite installée en 1978 a été remplacée par un nouvel aqueduc.

Figure 96

Des bandes et des équerres métalliques viennent fixer les vases d'expansion à la paroi.



© OECOCOM, Lucienne Rey

Enfouies sous terre dès les rives du lac, les conduites passent, dans les 800 derniers mètres entre la station de pompage et la centrale thermique, par une galerie. Cette construction attribuée à la CO II impressionne par ses dimensions. Cette galerie fait en effet 7 m de large pour 2 m de hauteur, ce qui signifie qu'on peut s'y tenir debout. Les installations à l'intérieur de la galerie appartiennent en partie à l'UNIL et en partie à l'EPFL.

La galerie abrite notamment des conduites en acier destinées à l'eau de refroidissement et de chauffage, posées sur des rails métalliques reposant sur des piliers à des intervalles de 7 m. En contrôlant l'ancienne conduite de 1978, les spécialistes avaient déploré le fait que les éléments stabilisateurs des piliers, placés en moyenne à des intervalles de 80 m, étaient insuffisants. Si les fixations sont insuffisantes, les conséquences potentielles en cas de séisme sont d'autant plus graves sachant que l'eau transportée par les lourdes conduites en acier renforcerait les mouvements d'oscillation de celles-ci.

Critiquées, ces fixations existantes étaient de simples éléments en T fixés au sol par des boulons. En raison de leur conception, ces éléments n'étaient pas en mesure d'absorber les mouvements dans le sens longitudinal de la galerie. Dans l'intervalle, ces éléments ont été renforcés par des raidisseurs diagonaux. Lorsque les conduites suivent des trajectoires

Figure 97

Des raidisseurs diagonaux ont été intégrés a posteriori pour renforcer les appuis sur lesquels reposent les conduites. Dans les courbes, des entretoises supplémentaires ont été installées dans les poteaux.



© OECOCOM, Lucienne Rey

courbes, des raidisseurs supplémentaires ont même été installés. Partant, la résistance aux mouvements sismiques parallèles à la galerie est désormais assurée.

Doublement de la puissance de pompage et nouveau système de chauffage

Le nouveau système de pompage est conçu pour couvrir les besoins de l'UNIL et de l'EPFL d'ici à 2040. Pour remplir sa fonction, ce système a besoin de pompes qui sont en mesure de capter les quantités d'eau supplémentaires nécessaires dans le lac. Pour ce faire, l'ancienne station de pompage a été complétée par une deuxième station directement adjacente. Ces deux ouvrages appartenant à la CO II, partiellement encastrés dans le sol, s'intègrent bien au terrain et ne sont pas visibles depuis le Léman. Un cadre métallique fixé au sol prévient tout mouvement des pompes en cas de séisme.

Pour assurer la protection contre les secousses pouvant être causées par des changements soudains de la vitesse d'écoulement de l'eau, il est nécessaire de recourir à des amortisseurs de coup de bélier. Ces amortisseurs sont des conteneurs de petite taille abritant une chambre de compression remplie au gaz. Grâce à son effet élastique, l'amortisseur absorbe et réduit les différences de pression, par exemple lorsqu'une pompe tombe en panne. Il prévient donc les dommages sur d'autres éléments du système de

chauffage et de refroidissement. Ces amortisseurs sont ancrés au sol avec des goujons très résistants, sur des socles en plastique atténuant les vibrations. Les conduites transportant l'eau sont vissées au plafond ou aux parois à des intervalles réguliers.

Le transformateur pour l'approvisionnement énergétique des pompes est posé sur des rails, ce qui permet de le déplacer lors des travaux de maintenance. Cependant, afin d'éviter qu'il ne se déplace en cas de séisme, il a également été solidement ancré au sol avec des supports vissés. Les armoires de commande dans la salle des pompes ont été fixées aussi bien au sol qu'aux parois porteuses afin d'exclure tout risque de basculement.

Dans la centrale thermique, les pompes à chaleur utilisent de l'ammoniac naturel comme fluide frigorigène. Un système sophistiqué comprenant des compresseurs, des condenseurs et des échangeurs de chaleur extrait de la chaleur à partir de l'eau du Léman. L'eau refroidie sert ensuite à faire baisser la température des serveurs du centre de données de l'EPFL. Les pompes sont posées sur des rails ancrés au sol avec des boulons très résistants.

Des mesures parasismiques ont été prises dans cette installation de chauffage entièrement rénovée. Par exemple, les vases d'expansion, qui maintiennent la pression à un niveau stable lors des variations du volume de l'eau dues aux changements de température, ont été fixés solidement avec des bandes et des équerres en métal.

Comme dans la station de pompage, les armoires de commande de la centrale thermique sont également fixées aux parois et les unes aux autres, ce pour prévenir tout basculement ou déplacement en cas de séisme.

Une neutralité climatique intégrale en temps normal

En exploitant la chaleur de l'eau du Léman, les quatre pompes à chaleur de l'EPFL parviennent à une puissance de 24 MW. La haute école n'a ainsi plus besoin de recourir à des combustibles fossiles. En cas de panne ou de travaux de révision uniquement, elle bascule sur deux chaudières à gaz. Grâce à ce nouveau système de chauffage et de refroidissement, l'EPFL a réduit ses émissions de CO₂ de 1800 t par an.

Figure 98

Le transformateur qui alimente les pompes en énergie est fixé sur des rails, ce qui permet de le déplacer pour les travaux de maintenance.

