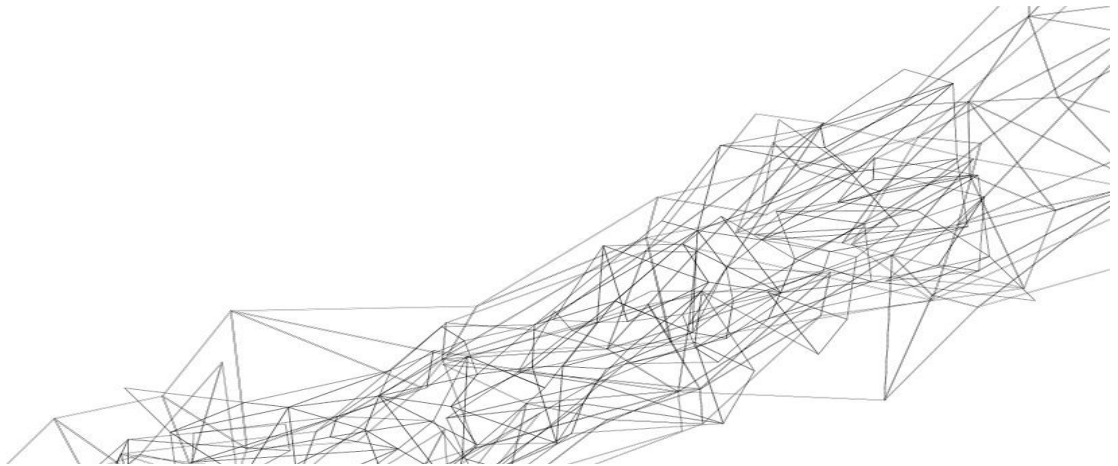


# Optimiser la protection des bâtiments contre les dangers naturels grâce au BIM (OGN)

Un projet de recherche  
de la Fondation de prévention des établissements cantonaux d'assurance

## Rapport de résultats



Muttenz

Version 1.00

## Mentions légales

Requérant :

- Benno Staub, Association des établissements cantonaux d'assurance incendie AEAI

Partenaires de recherche :

- Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW  
Institut Digitales Bauen
- Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg HEIA-FR  
Institut des technologies de l'environnement construit  
Institut TRANSFORM
- Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW  
Life Sciences und Facility Management

Partenaires de terrain :

- IDC AG
- Waldhauser+Hermann AG
- HxGN Schweiz AG

Membres du groupe de projet

Benno Staub	AEAI
Prof. Manfred Huber	FHNW
Lukas Schildknecht	FHNW
Stefan Hochuli	FHNW
Prof. Dr. Mylène Devaux	HEIA-FR
Prof. Stefanie Schwab	HEIA-FR
Prof. Redouane Boumaref	HEIA-FR
Prof. Dr. Vincent Labiouse	HEIA-FR
Simon Ashworth	ZHAW
Christoph Hess	HxGN AG
Philipp Escher	IDC AG
Marco Waldhauser	W+H AG

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Résumé</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Introduction</b>	<b>6</b>
2.1	Contexte	6
2.2	Projet Optimiser la protection des bâtiments contre les dangers naturels grâce au BIM	6
2.3	Constitution de la documentation	7
2.4	Public cible	7
<b>3</b>	<b>Contexte du projet</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Objectifs et procédé</b>	<b>11</b>
4.1	Objectif et questions de recherche	11
4.2	Procédé	11
<b>5</b>	<b>Résultats</b>	<b>14</b>
5.1	Modèle de processus	14
5.1.1	Déroulement fondamental au centre du projet OGN	14
5.1.2	Référence à la documentation SIA D0260	15
5.1.3	Modèle de processus générique	17
5.2	Règles de contrôle	22
5.2.1	Objectifs de protection, exigences et règles de contrôle	24
5.2.2	Exigences concernant les informations	27
5.2.3	Implémentation	30
5.3	Données de base et transformation	32
5.3.1	Données de base sur les aléas	32
5.3.2	Service de transformation SIG-BIM	33
<b>6</b>	<b>Discussion et conclusions</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>Perspectives et recommandations</b>	<b>39</b>
<b>8</b>	<b>Glossaire/Abréviations</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>42</b>
	<b>Annexe A Modèle de domaine</b>	<b>43</b>
	Aléa	43
	Protection et prévention	44
	Structure du projet et de l'ouvrage	46
	<b>Annexe B Informations dans les médias et actions de communication</b>	<b>47</b>

### Historique du document

Version	Date	Commentaire	Statut
0.30	06.12.2019	Version initiale	En traitement
0.70	28.01.2021	Fondements, objectifs/procédé, règles de contrôle	En traitement
0.72	05.02.2021	Résultats, discussion	En traitement
0.80	10.02.2021	Final, relecture équipe de projet	Pour examen
1.00	17.02.2021	Final	Approuvé

## 1 Résumé

La gestion intégrée des risques porte pour une part essentielle sur la réduction de la vulnérabilité des bâtiments face aux dangers naturels. D'où l'importance de veiller à choisir un mode de construction adapté aux dangers, notamment pour les nouvelles constructions et les transformations. Or, on se heurte à plusieurs problèmes quand on veut construire un bâtiment capable de résister aux dangers naturels : il s'agit principalement du manque de sensibilisation à la question des dangers naturels, de la sous-estimation des risques inhérents et souvent du délai (trop) tardif de la prise en compte des dangers naturels dans le processus de planification.

La méthode BIM (Building Information Modeling) modifie à plusieurs égards la planification, la construction et l'affectation des bâtiments. Le projet de recherche financé par la Fondation de prévention des établissements cantonaux d'assurance et intitulé « Optimiser la protection des bâtiments contre les dangers naturels grâce au BIM » a pour objectif de démontrer le potentiel et la possibilité de mise en œuvre de plusieurs aspects techniques et méthodologiques du BIM, dans le but spécifique de protéger les bâtiments contre les dangers naturels. Le processus a ainsi été étudié pour les dangers naturels que sont la grêle, les inondations, les tremblements de terre et les chutes de pierres, en se concentrant sur le rôle du maître d'ouvrage et de l'architecte, sur l'intégration de données de base dans des maquettes numériques ainsi que sur les possibilités inhérentes de contrôle des maquettes en vue de soutenir la planification.

Avec la méthode BIM, des équipes de planification interdisciplinaires placent au centre de la réflexion l'affectation du bâtiment et les processus liés à son exploitation, et ce dès les premières phases de la planification. Il importe dès lors d'apporter suffisamment tôt des solutions aux questions techniques également. Si le maître d'ouvrage souhaite profiter des avantages du BIM, il doit pouvoir décrire très précisément les objectifs du projet et les exigences du bâtiment (« compétence de commanditaire »). Cette réflexion davantage consciente menée par les mandants sur les objectifs retenus, accompagnée d'une observation globale du cycle de vie et de l'implication anticipée de techniciens sont autant d'occasions d'analyser comme il se doit les risques liés aux dangers naturels et de définir des objectifs de protection dès la planification stratégique. Afin de réussir à engager ce « dialogue sur les risques », les informations sur les dangers doivent être intégrées au début du projet et le plus simplement possible dans la maquette numérique. C'est la raison pour laquelle un Proof of Concept (c'est-à-dire une démonstration de faisabilité, également désignée par l'abréviation « PoC ») a été développé dans le cadre du projet de recherche, en vue de transformer les cartes des dangers et des aléas (qui existaient sous forme de données SIG) au format Industry Foundation Classes (IFC), un format d'échange utilisé communément par les logiciels BIM. Des premières recommandations ont été élaborées en parallèle pour la standardisation.

La maquette numérique est bien plus qu'une simple représentation virtuelle du bâtiment. Elle sert de base centrale pour donner des informations couvrant toute la durée de vie du bâtiment et portant sur l'ensemble des questions relatives à la planification, la construction et l'utilisation du bâtiment. Sous réserve que les informations soient disponibles dans un format standard et qu'elles soient reliées avec la bonne logique, la maquette numérique peut améliorer fortement la qualité de la planification et de la réalisation tout en apportant une valeur ajoutée également dans la phase d'exploitation. Les contrôles automatiques et semi-automatiques des maquettes portent sur les critères de forme ou d'exhaustivité des informations. Ils sont faciles à mettre en œuvre et permettent de ne pas oublier les dangers naturels. Des règles de contrôle appropriées ont été décrites à un niveau technique et logique. Les exigences connexes relatives aux informations portant sur la maquette numérique ont également été étudiées. Le logiciel Solibri permet de contrôler les maquettes du BIM. Comme l'a montré l'implémentation dans ce logiciel des règles de contrôle pour les dangers naturels grêle et inondation, des contrôles géométriques pour l'identification de points faibles ainsi que des contrôles détaillés au niveau

du produit peuvent aussi être implémentés dans des logiciels standard. Des règles de contrôle de ce type représenteraient la principale valeur ajoutée si elles pouvaient être le plus possible standardisées et ainsi exécutées de manière automatique et itérative dans le processus de planification. Cette standardisation en vue de l'application dans la pratique requiert des directives de modélisation qui soient surtout bien coordonnées avec d'autres domaines techniques. Par ailleurs, la recherche doit elle aussi être ponctuellement plus approfondie.

## 2 Introduction

### 2.1 Contexte

Les bâtiments subissent de plus en plus de dommages en raison des dangers naturels. La réponse logique à ce problème consiste à tenir compte des dangers naturels lors de la construction. Des solutions éprouvées existent en termes de conception et de construction, mais elles sont trop souvent ignorées. Au vu de la forte complexité et de la grande diversité thématique du domaine de la construction, il est actuellement difficile de considérer avec la clairvoyance et la constance requises certains aspects spécifiques, tels que les dangers naturels. Or, l'interdisciplinarité croissante et la numérisation modifient les conditions-cadres. Le Building Information Modeling (BIM) est non seulement synonyme de technologies modernes, mais il incite aussi à adopter de nouvelles formes d'organisation et de nouveaux processus. Le BIM comporte deux atouts uniques en faveur de la prévention des dangers naturels : la **planification prévoyante** et la **prise en compte du cycle de vie**. L'anticipation présente un fort potentiel pour le parc immobilier de demain. Il est en effet plus facile de faire face aux dangers naturels si l'on fait appel suffisamment tôt à des spécialistes techniques lors de la planification intégrale avec le BIM. Les nouvelles possibilités d'identification basée sur des modèles et les nouvelles perspectives d'élimination des erreurs de planification au moyen de contrôles de la cohérence sont d'une grande aide dans ce domaine. En valorisant la phase d'exploitation, on encourage la protection à long terme du bâtiment. Le dialogue sur les risques s'en trouve amélioré avec les maîtres d'ouvrage et les auteurs des projets, par ex. pour la définition des objectifs de protection. De nombreux problèmes actuels en lien avec les dangers naturels trouvent en effet leur origine dans le manque de sensibilisation aux risques.

Les établissements cantonaux d'assurance veulent profiter des chances offertes par le BIM tout en étudiant et en démontrant comment appliquer efficacement la méthode BIM dans la prévention des dangers naturels. Partant, la Fondation de prévention des établissements cantonaux d'assurance soutient le projet « Optimiser la protection des bâtiments contre les dangers naturels grâce au BIM » (OGN, 2019-2020).

### 2.2 Projet Optimiser la protection des bâtiments contre les dangers naturels grâce au BIM (OGN)

Le projet OGN consiste à élaborer des méthodes et des bases techniques pour optimiser au moyen du BIM la construction de bâtiments résistants aux dangers naturels. Le projet démontre quel pourrait être le « meilleur cas » d'une planification optimisée en termes de risques avec le BIM et propose une étude de faisabilité.

Le groupe de travail 1 (GT1) se concentre ici sur les processus, les formes de collaboration et le rôle de la maquette numérique (« maquette BIM ») en tant que recueil central des informations pendant toute la durée de vie d'un ouvrage. Les problèmes récurrents de l'activité de construction, tel que la reconnaissance et la prise en considération incomplètes ou trop tardives des risques, font l'objet d'une attention particulière. Sur le plan technique, l'équipe de projet s'appuie sur des références reconnues dont notamment les publications de la SIA (normes SIA 261 et 261/1 ainsi que les recommandations D 0260 « Intégration des dangers naturels dans la conception et la planification de bâtiments » et SIA 4002 « Crues – Lignes directrices relatives à la norme SIA 261/1 »). La méthodologie développée propose de nouvelles pistes pour une prévention systématique et précoce. Sur le plan technique, les prototypes suivants sont développés :

- Groupe de travail 2 (GT2) : Ensemble de règles indépendantes du système et dédiées au contrôle des maquettes BIM en ce qui concerne les dangers naturels. Exemple d'implémentation de cet ensemble de règles pour « Solibri Model Checker ».

- Groupe de travail 3 (GT3) : Service de transformation des géodonnées pour l'intégration d'informations sur les dangers dans les maquettes BIM et pour la clarification des questions de standardisation avec le format IFC.

Afin de délimiter les aspects particulièrement importants et de se concentrer sur ces éléments, l'étude se limite à quatre types de dangers naturels, à savoir la grêle, les crues, les tremblements de terre et les chutes de pierres.

## 2.3 Constitution de la documentation

La documentation portant sur les résultats de recherche se compose de trois rapports :

- Le présent **rapport de résultats** sert de document principal. Il comprend des explications générales et une description de méthodes et concepts fondamentaux.
- Le **rapport sur les processus et règles de contrôle** renseigne sur le procédé et le contrôle à l'appui de maquettes spécifiquement pour les quatre types de dangers naturels que sont la grêle, les crues, les tremblements de terre et les chutes de pierres.
- Le **rapport sur les données de base et la transformation SIG-BIM** documente les résultats concernant le traitement des données de base et l'interface avec les bases de données SIG.

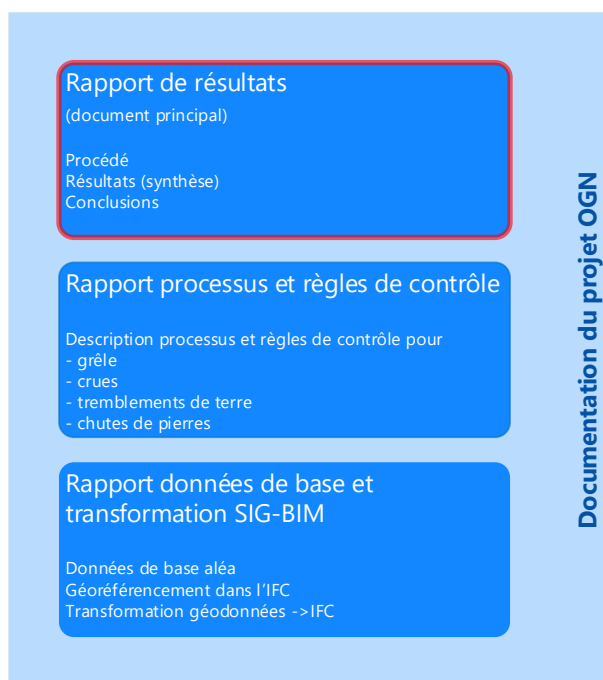


Illustration 1: Documentation du projet

## 2.4 Public cible

Les résultats de recherche ainsi que la méthodologie appliquée sont décrits dans ce rapport. Ce dernier s'adresse aux personnes spécialisées dans la prévention des dangers naturels et disposant de connaissances sur l'application et l'utilisation de la méthode BIM, notamment les maquettes numériques basées sur le format IFC (Industry Foundation Classes).

Le rapport sert de base à un traitement ultérieur et à une concrétisation des résultats de recherche en vue d'élaborer des recommandations spécifiques ou des directives d'application dans la pratique. Le rapport de résultats en soi n'est pas prévu pour une application directe dans la pratique. Au cours du projet, divers articles ont été publiés dans des revues spécialisées à l'attention des différents groupes cibles.

### 3 Contexte du projet

Bien que l'idée de travailler en collaboration sur la base d'une maquette remonte déjà à une quarantaine d'années et que l'industrie du bâtiment s'appuie depuis plusieurs décennies sur des outils de CAD, les maquettes numériques (maquettes BIM) ne sont utilisées avec succès aussi en Suisse que depuis quelques années. Les développements sont tout aussi récents et dynamiques, tant d'un point de vue technique et logiciel qu'au niveau du déroulement des processus et de la collaboration dans les équipes interdisciplinaires de planification. En comparaison avec d'autres domaines de la protection des bâtiments, il existe très peu d'études et aucun processus établi sur l'approche des dangers naturels lors de l'application de la méthode BIM. Ce n'est pas le cas par exemple dans la protection incendie, où le BIM trouve déjà une application polyvalente (le standard IFC prévoit l'attribution de produits avec la réaction au feu correspondante ; il existe des règles de contrôle pour le recoupement automatique des maquettes en vue de respecter les prescriptions réglementaires ; des modèles FM contiennent des informations telles que les intervalles de maintenance des installations de détection d'incendie ; le BIM est utilisé pour des simulations de dégagement de fumée et pour la planification de mesures d'évacuation et d'intervention, etc.).

Dans le cadre de leur formation CAS GeoBIM à la FHNW, B. Staub et Ph. Hefti ont rédigé un mémoire sur le thème de la protection des bâtiments contre les dangers naturels grâce au BIM, posant ainsi les bases pour le projet OGN de la Fondation de prévention. Au cours de la période de temps limitée consacrée au mémoire, les auteurs sont parvenus à identifier d'importantes actions possibles, sans pouvoir cependant les étudier complètement et en définir la transposition dans la pratique. Ces points doivent être abordés et approfondis dans le cadre du projet OGN.

Dernièrement, la SIA a complété ou nouvellement développé différentes normes et recommandations tant dans le domaine de la prévention des dangers naturels que dans le domaine de la méthode BIM. Ces documents de référence peuvent désormais servir de bases techniques et méthodologiques pour le projet de recherche. Pour la méthode BIM, il s'agit du cahier technique SIA 2051 « Building Information Modelling (BIM) – Bases pour l'application de la méthode BIM » et de la documentation D 0270 « Application de la méthode BIM – Guide pour améliorer la collaboration ». Ces deux documents décrivent les « bonnes pratiques » toutes récentes pour l'application de la méthode BIM en Suisse. Pour la prévention des dangers naturels, outre les deux normes centrales relatives aux structures porteuses (SIA 261 et SIA 261/1) et différentes normes spécifiques aux projeteurs, il s'agit de la documentation D0261 « Intégration des dangers naturels dans la conception et la planification de bâtiments » et des lignes directrices SIA 4002 « Crues - Lignes directrices de la norme SIA 261/1 ».



Illustration 2: Positionnement du projet / Résultats du projet OGN



Les problématiques étudiées dans le cadre du projet OGN et les résultats élaborés doivent se trouver à un même niveau de généralisation que celui des normes et documentations SIA précitées. En d'autres termes, avec le projet OGN, il convient de traiter en premier lieu les processus et les questions de gestion des informations qui se situent au niveau des planificateurs généraux (Illustration 2).

Pour déterminer l'aléa du fait de l'existence de dangers naturels en un lieu donné, des systèmes SIG sont généralement utilisés, différentes sources de données devant être consultées en fonction du processus du danger naturel et de la problématique. La résolution spatiale des cartes des aléas grêle, neige, tempêtes, tremblements de terre, radon est très peu précise. Les cartes cantonales des dangers reproduisent quant à elles les processus crues, glissements, chutes de pierres et avalanches à la parcelle près (échelle 1:5000). Ces cartes des dangers et des aléas sont disponibles sous forme de données vectorielles et de grilles de données (généralement en 2D). L'intégration de géodonnées dans des maquettes numériques est discutée dans les domaines d'application les plus divers et spécialement dans le cadre du développement du standard IFC (extension p. ex. au «Landscape», géologie entre autres). Lors du passage du SIG au « BIM », il faut en principe surmonter trois difficultés :

- Premièrement, des règles techniques claires doivent être définies pour le mapping des informations sémantiques entre les géodonnées et le modèle conceptuel de données au format IFC.
- Deuxièmement, il convient de trouver comment procéder avec l'imprécision des géodonnées.
- Troisièmement, une solution doit être trouvée pour la transformation d'une projection des cartes en un système local de coordonnées.

Pour pouvoir représenter dans les maquettes BIM les caractéristiques qui jouent un rôle dans la construction tenant compte des dangers naturels (aléa, objectifs de protection, indications sur la vulnérabilité d'éléments de construction, etc.), outre la transformation entre les différents formats de données, il manque notamment un schéma à suivre pour la représentation standardisée de ces données au format IFC. C'est là un champ de recherche encore totalement inexploité et en même temps une condition essentielle d'assurance qualité, à partir d'une maquette, pour la construction avec le BIM de bâtiments résistants aux dangers naturels.

Les avantages de la méthode BIM en matière de protection des bâtiments en général ont déjà été largement étudiés dans la littérature. Parmi les avantages manifestes, la planification selon la méthode BIM bénéficie de la disponibilité des plans actuels basés sur une maquette numérique de bâtiment (« single source of truth »), ce qui permet de prévenir les erreurs dans le processus de planification et de construction. Grâce à la planification sur le jumeau numérique, les éventuels conflits concernant les objectifs et les problèmes peuvent être décelés et résolus plus tôt. La définition plus consciente des objectifs dans les premières phases du projet devrait avoir des retombées positives sur la qualité des bâtiments. Les maîtres d'ouvrage doivent décrire plus précisément leurs attentes au niveau du produit final lors de l'application de la méthode BIM. Par ailleurs, au-delà de la planification et de la réalisation, les informations servent aussi à l'exploitation, telles que les données techniques sur les produits installés. En cas d'événement grave, ces données peuvent offrir des bases importantes pour l'organisation d'urgence (Penn State, 2019; Treado et al., 2007).

On a étudié comment un processus de planification recourant à la méthode BIM peut améliorer la protection du bâtiment pour des dangers naturels spécifiques. Une analyse tremblement de terre a par exemple été élaborée au moyen d'une maquette numérique (Alirezai et al., 2016). Il a été démontré que des analyses statiques sont possibles sur la base de la maquette numérique.

Par une recherche dans la littérature, B. Sertysilisk (2017) a étudié comment le BIM aide le secteur de la construction à augmenter la résistance contre les catastrophes. Les aspects de la gestion des déchets, de la sécurité au travail et de la garantie des chaînes d'approvisionnement sont abordés par le biais d'une recherche étendue et d'une analyse. Mais la planification n'est

évoquée que dans quelques phrases. « Une technique de construction améliorée pour les bâtiments et les infrastructures peut réduire l'ampleur des répercussions d'une catastrophe » (Sertyesilisik, 2017, p. 10), « La résistance doit être intégrée dans le droit, les directives, la culture et les méthodes de travail pendant la phase précédant une catastrophe. » (*traduction libre en français*) (Sertyesilisik, 2017, p. 10). Ces énoncés très généraux relatifs à la planification soulignent le fait que cet aspect n'a pas été étudié.

Dans un projet européen pour la protection du patrimoine culturel, les bâtiments sont transformés par le biais de CityGML en un format SIG puis le potentiel de danger est estimé (Migliorini, 2018). L'approche choisie permet de réaliser une analyse du risque. Les bâtiments étudiés sont des bâtiments historiques et ne connaissent pas de phase de planification. Par ailleurs, les informations sur les risques ne sont pas disponibles dans la maquette parce que celle-ci a été transformée en format SIG.

Il est ressorti de la recherche dans la littérature que les possibilités et les avantages des maquettes numériques ont été largement étudiés. La plupart du temps, certains aspects de la sécurité du bâtiment ont été traités et des exigences de modélisation spécifiques ont été utilisées. Les études ne portaient pas sur la façon dont l'intégration dans la planification de données connues sur les risques peut augmenter la sécurité du bâtiment. Les études s'intéressaient à certains acteurs ou certaines étapes de la planification et ne montraient pas comment la sécurité du bâtiment peut être améliorée grâce à une meilleure planification numérique associant tous les partenaires du projet.

## 4 Objectifs et procédé

### 4.1 Objectif et questions de recherche

À partir de la situation décrite, un objectif principal relatif au contenu a été défini pour le projet « Optimiser la protection des bâtiments contre les dangers naturels grâce au BIM ».

**Objectif** Le projet de recherche doit démontrer le potentiel et la faisabilité de différents aspects techniques et méthodologiques du BIM (méthode BIM) pour la protection des bâtiments contre les dangers naturels.

L'objectif du projet doit être atteint en répondant aux trois **questions de recherche** suivantes :

- En utilisant la méthode BIM, comment intégrer de manière optimale le thème des dangers naturels dans les processus ?
- Comment intégrer les données de base sur les dangers naturels (géodonnées) dans des maquettes numériques ?
- Comment soutenir de manière optimale la planification et la construction de bâtiments résistants aux dangers naturels par le biais de règles de contrôle et à l'aide de maquettes numériques ?

### 4.2 Procédé

Pour répondre concrètement aux questions de recherche, les trois **prototypes** suivants ont été développés respectivement dans le cadre de sous-projets séparés (voir aussi Illustration 3) :

<p>Sous-projet 1 (GT1) Prototype de modèle de processus</p>	<p><i>Prototype</i> : Modèle de processus avec « approches des bonnes pratiques » dans lequel le thème des dangers naturels est intégré de manière optimale en utilisant la méthode BIM dans le processus et l'organisation du projet.</p> <p>Dans le sous-projet 1, un modèle de processus « idéal » est développé, reprenant toutes les phases de la vie d'un ouvrage. L'accent est placé consciemment sur les premières phases de la planification parce que les jalons décisifs sont ensuite posés pour les mesures de protection constructives et de conception.</p> <p>Une distinction est établie entre les principales phases suivantes sur la base des phases SIA selon le modèle de prestations SIA 112 : stratégie et élaboration du plan de protection, planification, réalisation et exploitation/gestion.</p> <p>Le modèle de processus doit identifier les principaux processus et activités qui permettent de prendre en considération de manière optimale la prévention contre les dangers naturels. Le modèle de processus doit aussi mettre en évidence les rôles importants et leur interaction.</p>
<p>Sous-projet 2 (GT2) Prototype de règles de contrôle</p>	<p><i>Prototype</i> : Ensemble de règles indépendantes du système pour contrôler des maquettes BIM en ce qui concerne les dangers naturels. Implémentation de cet ensemble de règles pour le logiciel « Solibri Model Checker » au niveau des dangers naturels sélectionnés (grêle, inondations, chutes de pierres et tremblements de terre).</p> <p>Dans le sous-projet 2 sont développées des règles de contrôle permettant de soutenir de manière optimale la planification et la construction de bâtiments résistants aux dangers naturels. Cela est possible à condition que la maquette numérique soit utilisée en tant que base d'informations intégrée.</p> <p>La maquette numérique est disponible pendant tout le cycle de vie d'un ouvrage en tant que représentation numérique de celui-ci. La maquette numérique peut être consultée selon les besoins à différents moments et vérifiée à l'aide de règles de contrôle.</p>
<p>Sous-projet 3 (GT3) Prototype Transformation</p>	<p><i>Prototype</i> : Service de transformation des géodonnées pour l'intégration d'informations sur les dangers dans des maquettes BIM.</p> <p>Le sous-projet 3 montre quelles données de base portant sur l'aléa lié aux dangers naturels peuvent être intégrées dans la maquette numérique et comment cette transformation des informations peut être mise en œuvre techniquement.</p>

Tableau 1: Description/Définition des sous-projets/prototypes

Les trois prototypes ont été élaborés chacun dans un groupe de travail, respectivement dans le cadre d'un sous-projet. Les résultats ont été régulièrement échangés entre les groupes de travail et ajustés les uns par rapport aux autres. L'illustration 3 représente sous forme de schéma les thématiques des trois groupes de travail / prototypes par rapport à l'architecture du système.

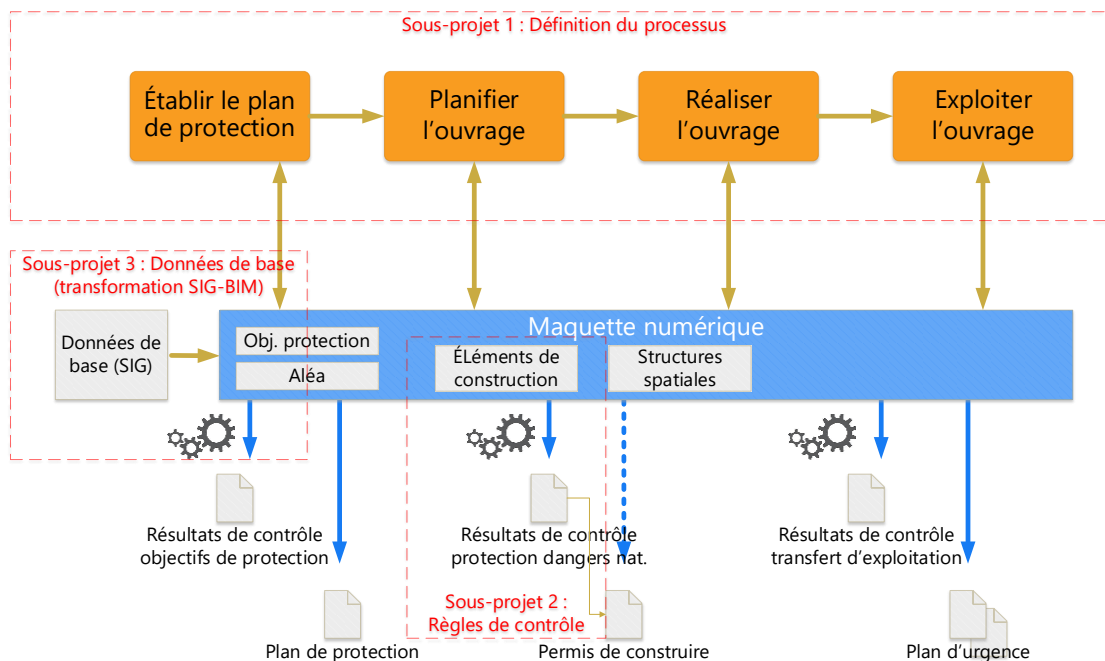


Illustration 3: Architecture du système et déroulement des processus avec les sous-projets OGN

Différents aspects techniques de la prévention des dangers naturels ainsi que de la méthode BIM ont été pris en compte dans l'élaboration des prototypes. Les groupes de travail ont essayé de reprendre des plans et des méthodes connus et établis, respectivement de les adapter comme base de développement de nouvelles approches. Parmi les facteurs d'influence les plus importants, on trouve :

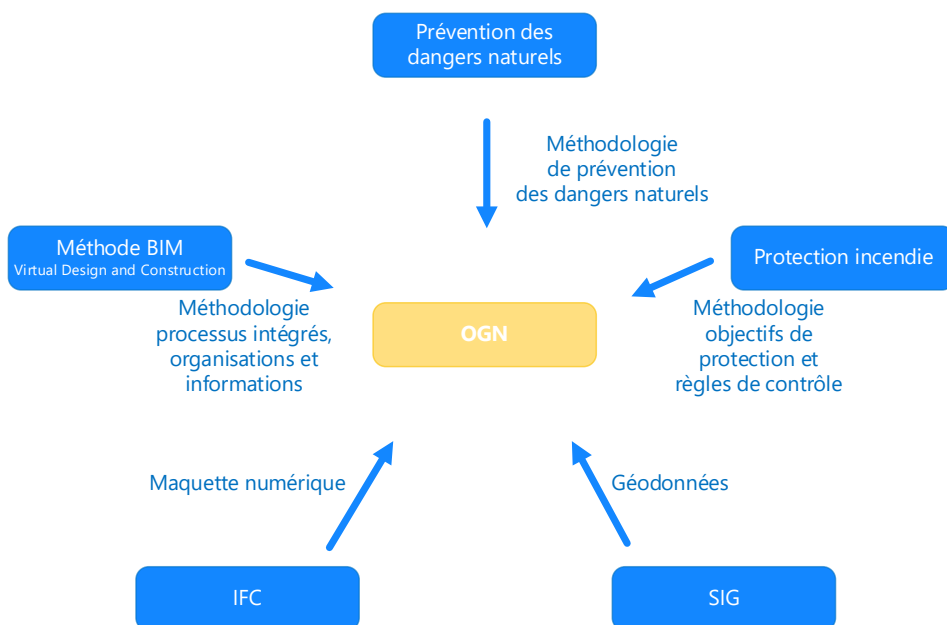


Illustration 4: Contexte et facteurs d'influence pour le projet OGN

– Prévention des dangers naturels

Il va de soi que le projet OGN s'inscrit principalement dans le domaine spécialisé de la prévention des dangers naturels. Les méthodes techniques sont ainsi posées en référence à ce domaine. À ces méthodes viennent s'ajouter de nouveaux plans ou des plans adaptés découlant d'une méthode de travail qui s'appuie sur des données ou découlant de nouvelles formes de collaboration de la méthode BIM.

– SIG

Les données sur l'existence de dangers naturels sont saisies et gérées principalement dans des systèmes d'informations géographiques (SIG). Pour une bonne intégration de ces données et une bonne interopérabilité avec les systèmes, il convient de prendre en compte des plans et des technologies relevant du domaine des géodonnées.

– Protection incendie

En tant que « discipline sœur » de la prévention des dangers naturels, la protection incendie dispose déjà d'une intégration plus avancée dans la méthodologie BIM, tel que l'a révélé l'analyse de fond. Par ailleurs, elle a recours à des concepts identiques ou proches en termes de méthodologie de la prévention (objectifs de protection, exigences). Il est dès lors possible de transposer aussi si nécessaire des concepts dans la prévention des dangers naturels.

– Méthode BIM (Virtual Design and Construction)

La méthode BIM définit des principes qui englobent de nouvelles formes de collaboration et d'organisation découlant de l'utilisation de maquettes numériques ainsi que de procédés ciblés. Ces principes constituent une base essentielle pour adapter la prévention des dangers naturels aux possibilités offertes par les méthodes de travail s'appuyant sur des données.

– IFC (Industry Foundation Classes)

Faisant partie de la méthode BIM, la maquette numérique représente la base d'information centrale et intégrale. Le standard IFC international ouvert et indépendant du système définit un modèle de données pour la maquette numérique et offre ainsi une bonne base en vue d'une compréhension mutuelle. L'IFC doit être utilisé de manière explicite dans le projet OGN.

L'illustration 4 donne une présentation schématique simplifiée des facteurs d'influence les plus importants pour le projet OGN.

## 5 Résultats

Les sous-chapitres ci-après présentent les résultats et les prototypes obtenus dans le cadre du projet OGN. Les résultats sont présentés au sein des trois sous-projets dans les sous-chapitres

- 5.1 Modèle de processus
- 5.2 Règles de contrôle
- 5.3 Données de base et transformation

Des descriptions plus poussées des résultats sont aussi disponibles dans les documentations en marge du projet (OGN, 2021a) et (OGN, 2021b).

### 5.1 Modèle de processus

Des processus ont été développés et définis dans le sous-projet 1 pour les quatre types de dangers naturels avec l'aide de partenaires du terrain. Ces processus doivent permettre d'obtenir idéalement une bonne protection contre les dangers naturels. Tandis qu'il est évident que les mesures de protection concrètes sont très différentes suivant le type de danger naturel, des matrices de portée générale sont ressorties pour le déroulement de la prévention. À partir de ces matrices, il a été possible d'élaborer un modèle de processus plus large et applicable à tous les types de dangers naturels.

#### 5.1.1 Déroulement fondamental au centre du projet OGN

Avant d'aborder le modèle de processus général au chapitre suivant, il convient ici tout d'abord de présenter en introduction un déroulement fondamental simplifié. Le déroulement se concentre très fortement sur la phase initiale du projet avec la création du plan de protection et montre l'importance pour le processus des prototypes qui ont été développés avec le projet OGN.

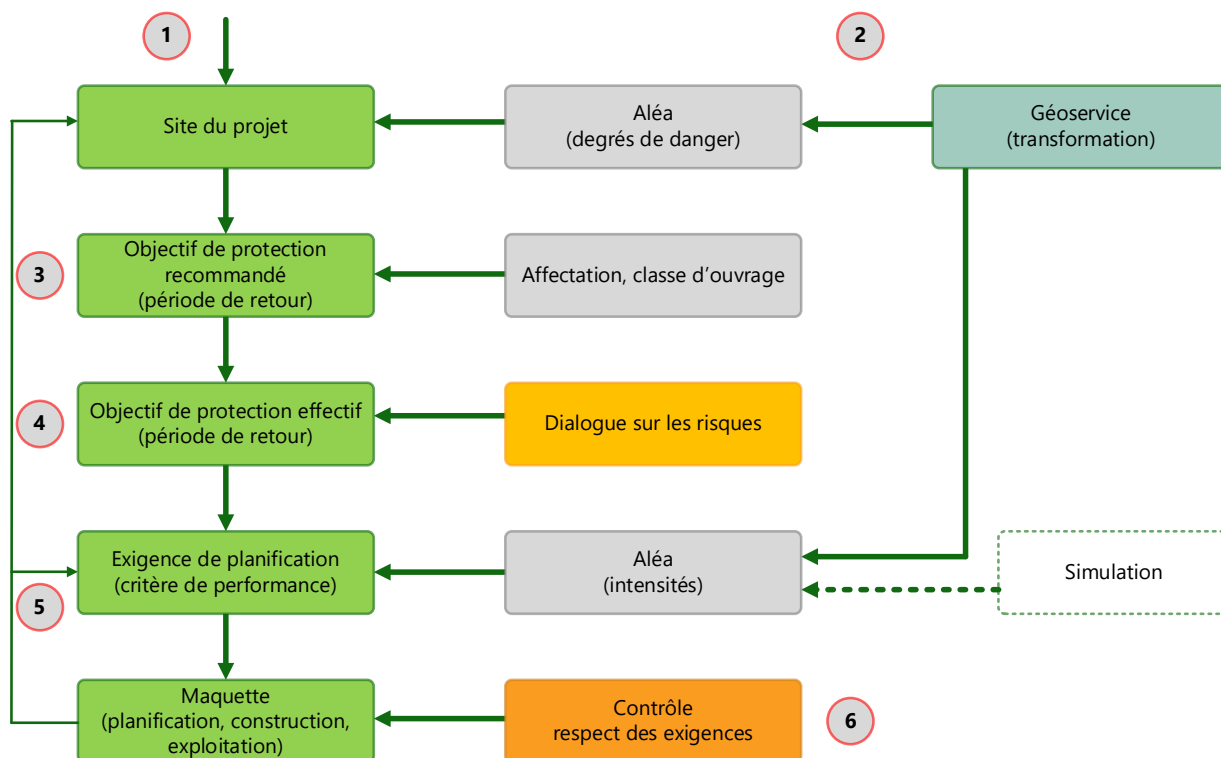


Illustration 5: Déroulement fondamental au centre du projet OGN

- 1 Pour pouvoir élaborer ou réviser des mesures de prévention des dangers naturels, il importe dans une première étape de déterminer la situation de danger sur le **site** concerné.
- 2 L'aléa lié aux dangers naturels peut être déduit notamment des géodonnées. Les informations sur l'**aléa** contenues dans les **géodonnées** sont accessibles aussi simplement que possible, ce qui favorise cette première étape de l'analyse de l'aléa. Le sous-projet / prototype 3 offre alors une piste de solution.
- 3 Sur la base des aléas existants ainsi que des informations fondamentales relatives à l'ouvrage même (affectation, classe d'ouvrage), il est possible de déduire dans les règles les **objectifs de protection recommandés** en se fondant sur les normes et conventions en vigueur.
- 4 Un **dialogue sur les risques** est engagé en vue de définir les objectifs de protection pour le projet concret. Ainsi, les **objectifs de protection effectifs** sont définis.
- 5 À partir des objectifs de protection effectifs et de l'aléa existant (intensités), il est possible de déduire les **exigences** pour l'ouvrage, respectivement pour la planification. Il s'agit ici de dispositions concrètes et, dans l'idéal, mesurables.  
L'aléa au sens des intensités attendues peut être, selon le type de dangers naturels, soit déduit des géodonnées existantes soit être défini par le biais de simulations réalisées par des experts.
- 6 Les exigences résultant des cinq premières étapes et concernant l'ouvrage, respectivement la maquette, peuvent être vérifiées par la suite par rapport aux maquettes prévues ou réalisées. Il est possible de remplir les exigences grâce aux **règles de contrôle** qui sont appliquées de manière **automatisée** à la maquette. Le sous-projet / prototype 2 offre par ailleurs des pistes de solution.  
Les exigences peuvent et doivent être contrôlées plusieurs fois au cours de toute la durée de vie d'un ouvrage. Il peut aussi s'avérer nécessaire de revoir les objectifs de protection et les exigences, p. ex. suite à une modification de la situation de danger.

### 5.1.2 Référence à la documentation SIA D0260

Le guide (SIA D0260, 2019) définit un procédé conceptuel sur la manière dont les dangers naturels doivent être pris en compte dans la planification des bâtiments. Des plans d'action et de protection fondamentaux y sont décrits. Les travaux dans le cadre du projet OGN reposent fondamentalement sur ce guide, respectivement ils le complètent pour l'application des méthodes BIM. L'illustration 6 ci-après montre comment le déroulement fondamental développé dans le cadre du projet OGN s'inspire du guide (SIA D0260, 2019).

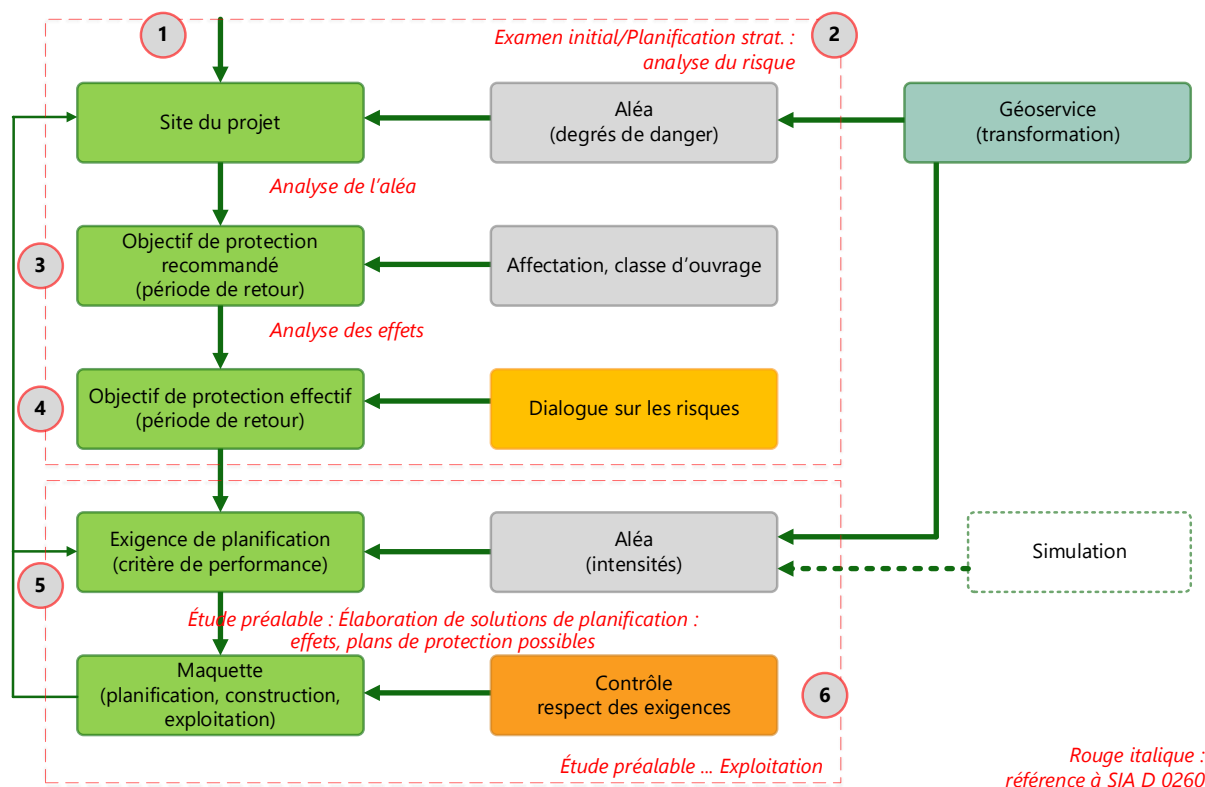


Illustration 6: Abstraction du modèle de processus en référence au SIA D0260

Avec le modèle de processus OGN, les étapes intermédiaires de l'analyse du risque (analyse des aléas et analyse des effets) sont clairement mises en relief et fortement structurées par la mise à disposition et également l'enregistrement effectif d'informations dans la maquette numérique. Cette approche doit permettre d'encourager le dialogue sur les risques, notamment avec les maîtres d'ouvrage et les autorités. Les données portant sur les aléas et tirées des géodonnées accessibles au public sont fournies si possible de manière automatisée, ce qui peut apporter une aide rapide, surtout dans le cadre de l'examen initial, pour accéder facilement aux données de base requises.

Le guide présente les possibilités de plan de protection ainsi que leurs effets contre les différents dangers naturels. Ces programmes techniques sont mis en œuvre dans le modèle de processus OGN lors de l'étape du processus « exigence de planification ». À partir des modes d'action et des plans de protection possibles, des « exigences standards » pour l'ouvrage sont formulées avec le projet OGN. Les règles de contrôle mises au point permettent de contrôler que ces exigences sont bien remplies. Des règles spécifiques en partie plus poussées ont été développées pour la formulation des règles de contrôle. Ces règles supplémentaires n'apparaissent pas dans le guide.



### 5.1.3 Modèle de processus générique

Les modèles de processus des différents types de dangers naturels (voir (OGN, 2021a)) ont fait l'objet d'une synthèse en vue de créer un modèle de processus général dont la description et la documentation répondent à la méthode de notation Business Process Model and Notation (BPMN). Ce modèle de processus générique établit en principe une distinction à deux niveaux : les phases et les acteurs.

#### Phases

La durée de vie d'un ouvrage est découpée en quatre principales phases :

- Stratégie et conception
- Planification
- Réalisation
- Exploitation

On choisit de distinguer uniquement ces quatre phases principales. Selon le modèle de phases appliqué, il peut y avoir des subdivisions plus affinées, sans conséquence toutefois sur le déroulement principal.

#### Acteurs

Pour les acteurs, on différencie trois groupes :

- Maître d'ouvrage / Propriétaire
- Projeteur / Entrepreneur / Exploitant (selon la phase)
- Bases décisionnelles (informations dans la maquette numérique)

Dans cette définition générique du processus, on renonce expressément à entrer trop dans les détails en ce qui concerne les acteurs et les rôles. Pour l'essentiel, une distinction est établie seulement entre les maîtres d'ouvrage et les autres rôles qui planifient, réalisent ou exploitent l'ouvrage sur mandat du maître d'ouvrage. Il est avant tout question de distinguer et de mettre en évidence le rôle dont dépendent les décisions centrales (maître d'ouvrage, notamment pour les objectifs de protection).

L'un des principes fondamentaux du modèle de processus consiste à saisir et à documenter toutes les informations pertinentes et les décisions dans la maquette numérique. Ainsi, la maquette sert de base pour les décisions et de documentation pour les objectifs et les décisions. La maquette numérique peut aussi renvoyer à des documents externes.

Si les informations sont saisies dans la maquette numérique selon des directives définies, elles peuvent être évaluées et vérifiées par des systèmes automatiques. Les projeteurs peuvent vérifier avec des routines de contrôles si le bâtiment répond aux objectifs de protection et aux exigences.

#### 5.1.3.1 Stratégie et conception (SIA phases 1-2)

Le maître d'ouvrage définit les objectifs de son organisation et donne pour mandat l'élaboration d'un plan de protection (Illustration 7). Ce plan comprend un examen initial de l'aléa, une évaluation de l'aléa, éventuellement des investigations sur place et les mesures de protection relevant de la planification. Le maître d'ouvrage est activement impliqué dans ce processus et doit prendre les décisions suivantes :

- Recours à des experts s'il existe un aléa
- Objectifs de protection de l'ouvrage

Les projeteurs et éventuellement d'autres experts fournissent les bases pour que le maître d'ouvrage puisse prendre les décisions.

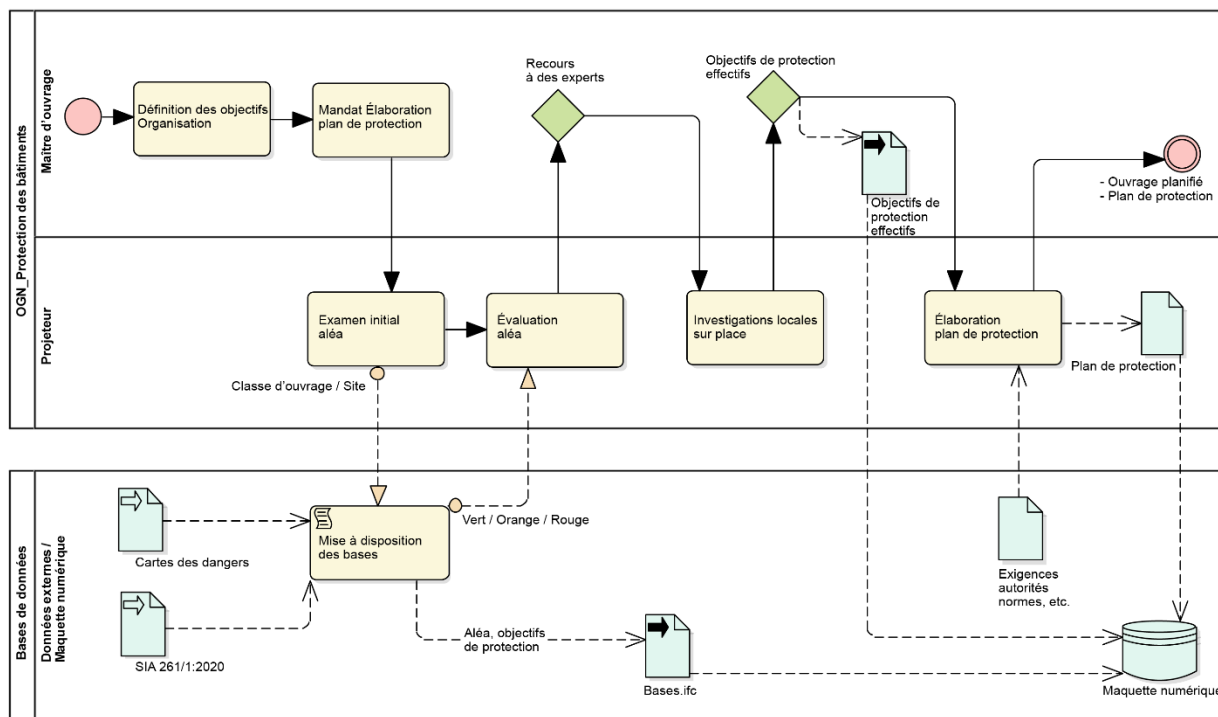


Illustration 7: Modèle de processus 1. Stratégie et conception

Support essentiel du plan de protection, le dialogue explicite sur les risques revêt un aspect central et se présente comme un corollaire de l'application rigoureuse de la méthode BIM. Ce dialogue doit avoir lieu avec la participation et l'étroite collaboration de tous les acteurs concernés (maître d'ouvrage, projeteur, expert).

Comme prévu dans la documentation SIA D0260, toutes les informations pertinentes et les décisions relatives aux différents types de dangers naturels sont comprises dans le plan de protection. Les objectifs de protection selon SIA 261 et SIA 261/1 servent de base à ce dialogue sur les risques.

Dans cette phase, d'une part les bases pour l'élaboration du plan de protection sont mises à disposition dans la maquette numérique, dont p. ex. les données sur les aléas (voir aussi 5.3). D'autre part, les décisions et les mesures résultant du dialogue sur les risques sont aussi enregistrées dans la maquette (p. ex. objectifs de protection, exigences). Les informations pertinentes de cette phase sont ainsi enregistrées de manière structurée et systématique dans la maquette numérique et servent de bases d'information pour les phases suivantes.

### 5.1.3.2 Planification (SIA phase 3)

Dans la phase de planification, les réflexions sur la conception sont affinées et l'ouvrage est planifié (Illustration 8).

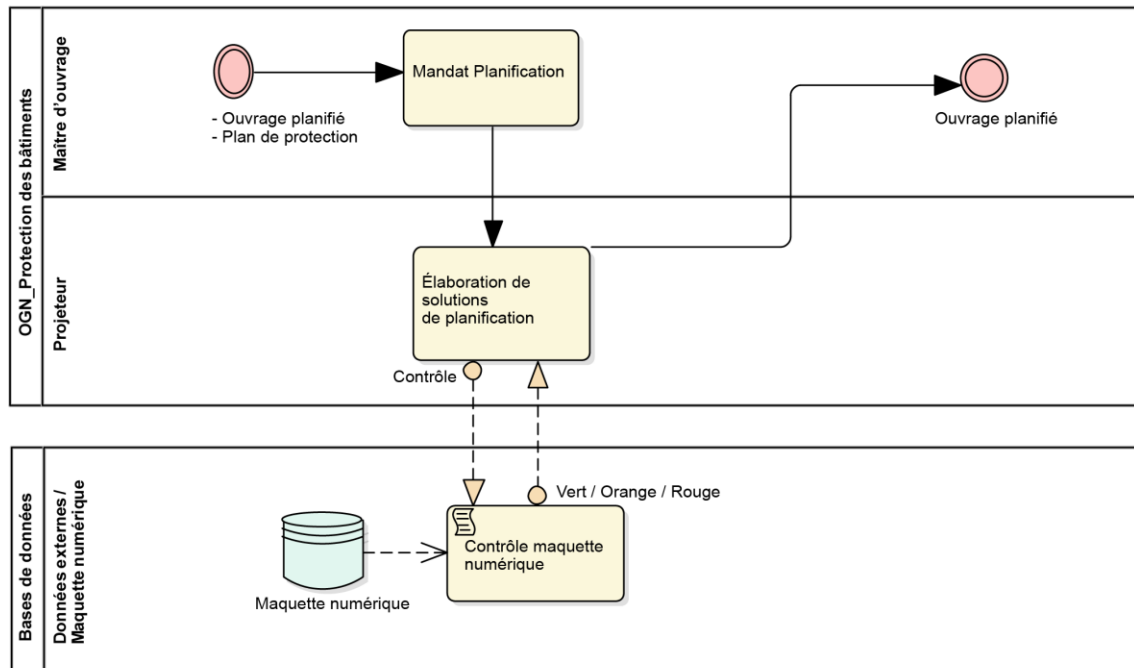


Illustration 8: Modèle de processus 2. Planification

Le maître d'ouvrage charge l'architecte et le projeteur de la planification du bâtiment. Ceux-ci travaillent sur des solutions permettant de protéger le bâtiment des dangers naturels de telle sorte que les objectifs de protection définis soient atteints. Les projeteurs sont aidés dans ce processus par des contrôles qualité basés sur la maquette.

L'ouvrage prévu est défini (modélisé) dans la maquette numérique. Les objectifs et exigences formulés dans le plan de protection peuvent être vérifiés régulièrement et automatiquement dans la maquette prévue avec des règles de contrôle. Les divergences ou les lacunes par rapport aux exigences fixées peuvent ainsi être détectées systématiquement et la planification peut de ce fait être adaptée.

### 5.1.3.3 Réalisation (SIA phases 4 et 5)

Un modèle d'exécution est conçu puis construit dans la phase de réalisation (Illustration 9). Pendant la construction, le bâtiment est réalisé physiquement et la maquette numérique est actualisée. Comme dans la phase de planification, la maquette numérique et ses sous-modèles sont contrôlés en permanence pour vérifier s'ils remplissent les objectifs de protection et les exigences et si les parties de bâtiment terminées correspondent bien à la maquette numérique. L'ouvrage et la représentation numérique sont transmis au maître d'ouvrage.

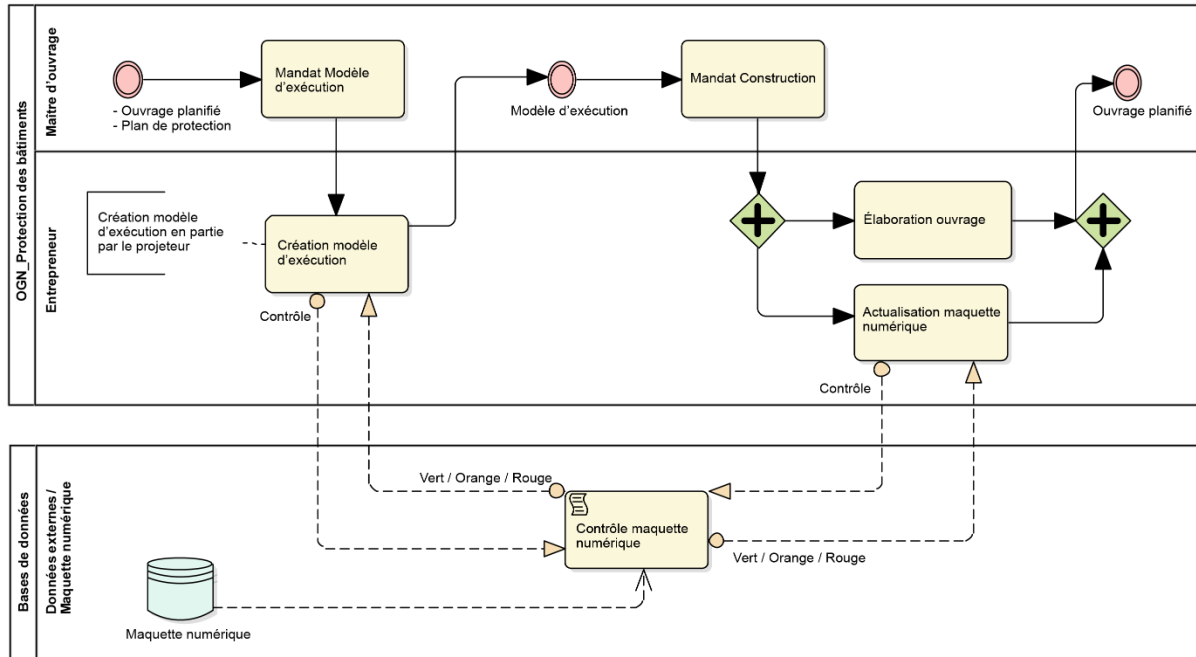


Illustration 9: Modèle de processus 3. Réalisation

### 5.1.3.4 Exploitation (SIA phase 6)

Le maître d'ouvrage remet le bâtiment au propriétaire (Illustration 10). Les objectifs pour le passage à l'exploitation doivent avoir déjà été élaborés dans la phase de conception. Pour l'exploitation, toutes les informations de la maquette numérique ne sont pas pertinentes. Le modèle est réduit et éventuellement complété pour devenir un modèle d'exploitation. Il comprend des renvois à certains documents importants, par exemple à un plan d'urgence.

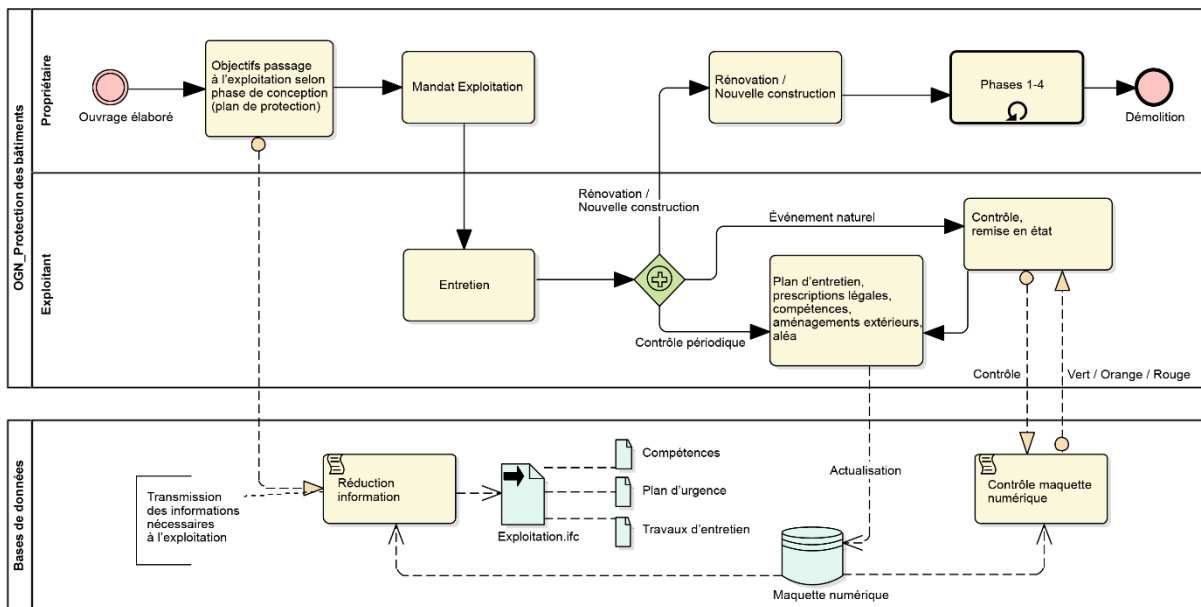


Illustration 10: Modèle de processus 4. Exploitation

Pendant la phase de maintenance, trois types d'événements peuvent survenir en principe et entraîner des modifications sur l'ouvrage et/ou sur la maquette :

1. **Contrôle périodique**  
On contrôle si la version des documents est toujours à jour, s'il y a eu des modifications sur l'ouvrage ou si l'aléa a évolué. La maquette numérique est alors actualisée.
2. **Événement naturel**  
En cas d'événement naturel, il peut être nécessaire de procéder à des remises en état ou à des adaptations du bâtiment ou de l'environnement. La maquette numérique est mise à jour et contrôlée comme dans les phases ci-dessus
3. **Rénovation ou nouvelle construction**  
Les phases 1-4 sont répétées.

## 5.2 Règles de contrôle

Les informations d'une maquette numérique sont évaluées systématiquement et automatiquement à l'aide de règles de contrôle. Les projeteurs et les exploitants ont ainsi la possibilité de vérifier régulièrement le niveau d'actualité de la maquette numérique. Les contrôles peuvent donner des indications sur les informations manquantes, incomplètes ou erronées. Les contrôles de maquettes représentent donc un outil d'assurance qualité, tant pour les informations au sens strict que pour la planification elle-même (le résultat est consigné sous forme d'information dans la maquette numérique).

Dans le cadre de la prévention des dangers naturels, les vérifications de la maquette numérique peuvent porter en principe sur des informations de différentes phases du cycle de vie d'un ouvrage, voir Illustration 11.

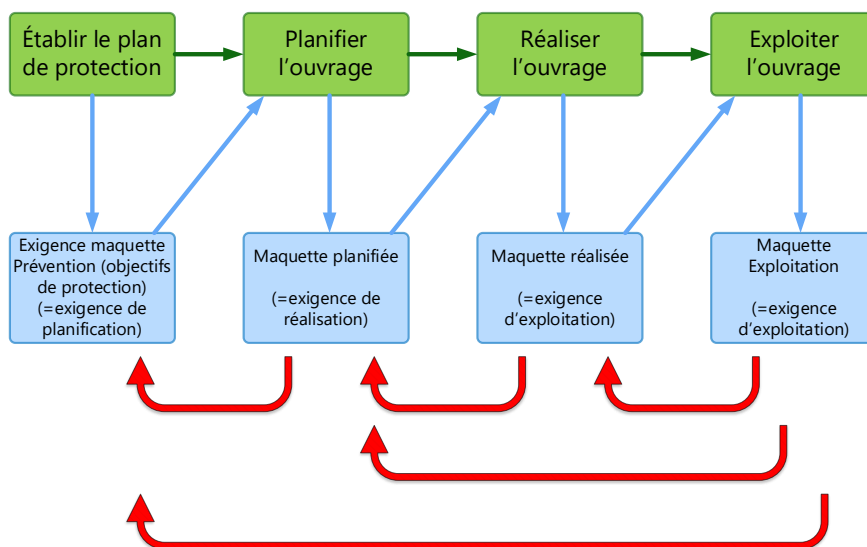


Illustration 11: Différents points de référence pour les exigences et les contrôles des maquettes

### – Stratégie et conception :

Dans cette phase sont définis les objectifs de protection et les exigences qui en découlent pour la planification. Idéalement, ces informations sont consignées dans la maquette numérique. Elles offrent ensuite la base pour la planification de l'ouvrage (exigence pour la planification).

Avec des règles de contrôle, il est possible en premier lieu de contrôler l'existence de ces informations dans la maquette numérique (contrôles d'exhaustivité). Des contrôles qualitatifs ne sont possibles que sous certaines conditions.

### – Planification :

Dans cette phase, les parties essentielles de la maquette numérique sont conçues afin que la maquette numérique définisse suffisamment les exigences pour la réalisation de l'ouvrage. Les règles de contrôle permettent de vérifier les exigences formelles pour les objets de la maquette numérique. Par ailleurs, la maquette numérique peut être comparée avec les exigences provenant de la phase de conception. En d'autres termes, il est possible de contrôler si la planification est conforme aux exigences selon le plan de protection.

### – Réalisation :

À la fin de cette phase, la maquette numérique reflète l'ouvrage tel qu'il est effectivement réalisé. La maquette définit dès lors également les exigences pour l'exploitation.

La maquette numérique peut être contrôlée par rapport aux exigences découlant de la phase de planification. De plus, il est possible et il faudrait même effectuer une vérification des exigences découlant de la phase de conception (plan de protection), c'est-à-dire vérifier si l'ouvrage construit répond aux exigences du plan de protection. Cette vérification s'avère utile

dans la mesure où, pendant la réalisation, des modifications par rapport à la phase de planification peuvent avoir lieu tant dans le plan de protection que dans la construction.

– **Exploitation :**

Comme pour les phases précédentes, l'état actuel de la maquette numérique peut faire l'objet d'un contrôle portant sur les objectifs de protection ainsi que sur l'avancée de la planification et de la réalisation.

Dans le cadre du projet OGN, des règles de contrôle ont été développées pour les types de dangers naturels retenus. Ces règles servent en premier lieu à accompagner la planification dans les premières phases de la conception. Une méthodologie a été mise au point pour la formulation et la documentation systématiques des règles de contrôle. Cette méthodologie repose sur la distinction entre les niveaux d'ébauche, comme c'est d'usage dans le domaine de la modélisation (de données) (voir p. ex. : (Kemper & Eickler, 2015) ou (KOGIS, 2011)). L'illustration 12 donne une représentation schématique du procédé et de la méthodologie développée pour spécifier les règles de contrôle.

Niveau sémantique

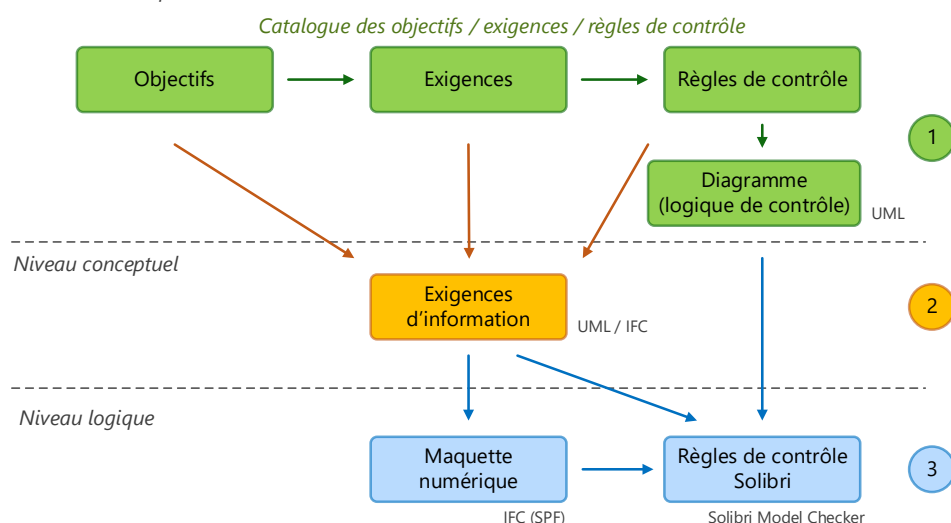


Illustration 12: Méthodologie des règles de contrôle

– **1 Niveau sémantique : Catalogue des objectifs / exigences / règles de contrôle et diagramme**

Dans une première étape, les objectifs de protection sont saisis systématiquement dans un catalogue au niveau sémantique, ainsi que les exigences en découlant et les règles en vue de vérifier les exigences. Pour chaque règle de contrôle, la logique de contrôle est également déterminée en détail avec des diagrammes (diagrammes d'activité). Les descriptifs sont purement techniques et du point de vue des spécialistes en protection incendie.

– **2 Niveau conceptuel : Exigences en matière d'information**

Les exigences d'information portant sur la maquette numérique sont déduites et décrites à partir des dispositions du niveau sémantique. Les exigences en matière d'information sont formulées en tenant compte du modèle conceptuel de données de l'IFC. UML (Unified Modelling Language, (OMG, 2017)) est aussi utilisé comme langage formel.

– **3 Niveau logique : Implémentation**

L'implémentation des règles de contrôle intervient dans une troisième étape sur le plan logique avec une technologie concrète, respectivement un logiciel. Dans le projet OGN, les règles de contrôle ont été implémentées avec le logiciel Solibri Model Checker et appliquées aux maquettes au format IFC (Step Physical File, SPF).

Les résultats du projet pour les trois niveaux sont résumés dans les sous-chapitres suivants. Il est avant tout question de la méthodologie développée. Les résultats détaillés d'un point de vue technique sont documentés par type de danger naturel dans le rapport séparé sur les processus et les règles de contrôle (OGN, 2021a).

## 5.2.1 Objectifs de protection, exigences et règles de contrôle

### Catalogue des objectifs / exigences / règles de contrôle

Pour la formulation technique et la spécification des règles de contrôle, une structure simple sous forme de tableau est utilisée, dans laquelle sont définis les contenus suivants :

- Objectif de protection en général
- Objectif de protection sur le plan fonctionnel
- Exigence en matière de planification (critère de performance inclus)
- Sélection d'objets
- Règle de contrôle

Cette structure du contenu découle directement du modèle du domaine OGN développé. Elle reflète ainsi de manière très systématique le principe fondamental dans lequel s'inscrit la cascade de définition des objectifs et des exigences en ce qui concerne les critères de performance (définitions et détails, voir modèles du domaine dans l'0).

L'illustration 13 montre par exemple trois règles de contrôle pour la grêle, y compris leur « justification » par rapport aux objectifs de protection et aux exigences.

Objectif de protection en général	Objectif de protection sur le plan fonctionnel	Exigence en matière de planification (critère de performance inclus)		Sélection d'objets	Règle de contrôle
Valeurs matérielles (éléments de construction)	L'élément de construction ne subit aucun dommage avec $z =$ [valeur cible] (RG fonctionnel)	H0.1	Les objectifs de protection fonctionnels sont définis (global par bâtiment, pour les cas spécifiques par élément de construction/catégorie d'élément de construction)	Tous les éléments de construction de l'enveloppe extérieure	Des objectifs de protection fonctionnels sont attribués à tous les éléments de construction de l'enveloppe du bâtiment (valeur RG)
Valeurs matérielles (éléments de construction)	L'élément de construction ne subit aucun dommage avec $z =$ [valeur cible] (RG fonctionnel + esthétique)	H0.2	Les objectifs de protection fonctionnels sont définis (global par bâtiment, pour les cas spécifiques par élément de construction/catégorie d'élément de construction)	Tous les éléments de construction de l'enveloppe extérieure	Des objectifs de protection fonctionnels sont attribués à tous les éléments de construction de l'enveloppe du bâtiment (valeur RG)
		H.1.2.2	Constitution produit/système : la valeur RG selon le répertoire grêle remplit l'objectif de protection fonctionnel	Éléments de construction exposés de l'enveloppe extérieure	Pour le produit, il y a dans le répertoire grêle un certificat AEAI valable avec valeur RG => taille des grêlons (z)

Illustration 13: Catalogue des objectifs / exigences / règles de contrôle (exemple)

La formulation des règles concrètes de contrôle se compose de deux parties :

- Sélection de l'objet  
On définit sur quels objets de la maquette numérique les règles de contrôle doivent être appliquées ; par exemple toutes les fenêtres, tous les murs extérieurs, seulement les façades comprenant un certain matériau, etc.
- Règle de contrôle (concrète)  
On définit quel contrôle est réalisé concrètement (sur les objets sélectionnés) ; par exemple la classe de résistance à la grêle de l'élément de construction doit être supérieure à une certaine valeur, l'ouverture doit se trouver à une hauteur supérieure à une certaine cote, etc.



Les exigences sont numérotées et identifiées clairement. La numérotation est conçue selon un schéma hiérarchique et le préfixe indique le type de danger naturel :

- A : Exigences générales
- H : Grêle
- W : Eau
- E : Tremblement de terre
- S : Chute de pierres

Il est important que l'identification de chaque exigence soit univoque afin de pouvoir établir un lien avec la définition technique dans les étapes ultérieures portant sur la déduction des exigences d'information ainsi que sur l'implémentation.

### **Diagramme (logique de contrôle)**

Les règles de contrôle gagnent rapidement en complexité qui ne peut être rendue de manière suffisamment précise par une formulation purement linguistique. C'est pourquoi les règles de contrôle sont définies et identifiées uniquement sous forme abrégée dans le catalogue. Le descriptif de la logique de contrôle passe ensuite par des documents et des règles techniques supplémentaires. Un diagramme formel est au moins établi (ordinogramme, diagramme d'activité), représentant le déroulement du contrôle d'un point de vue technique.

Le diagramme doit comprendre au moins les informations suivantes :

- Identification de l'exigence (numéro de l'exigence)
- Identification la plus précise possible des informations de la maquette numérique nécessaires au contrôle.

L'illustration 14 montre par exemple un extrait pour les règles de contrôle grêle

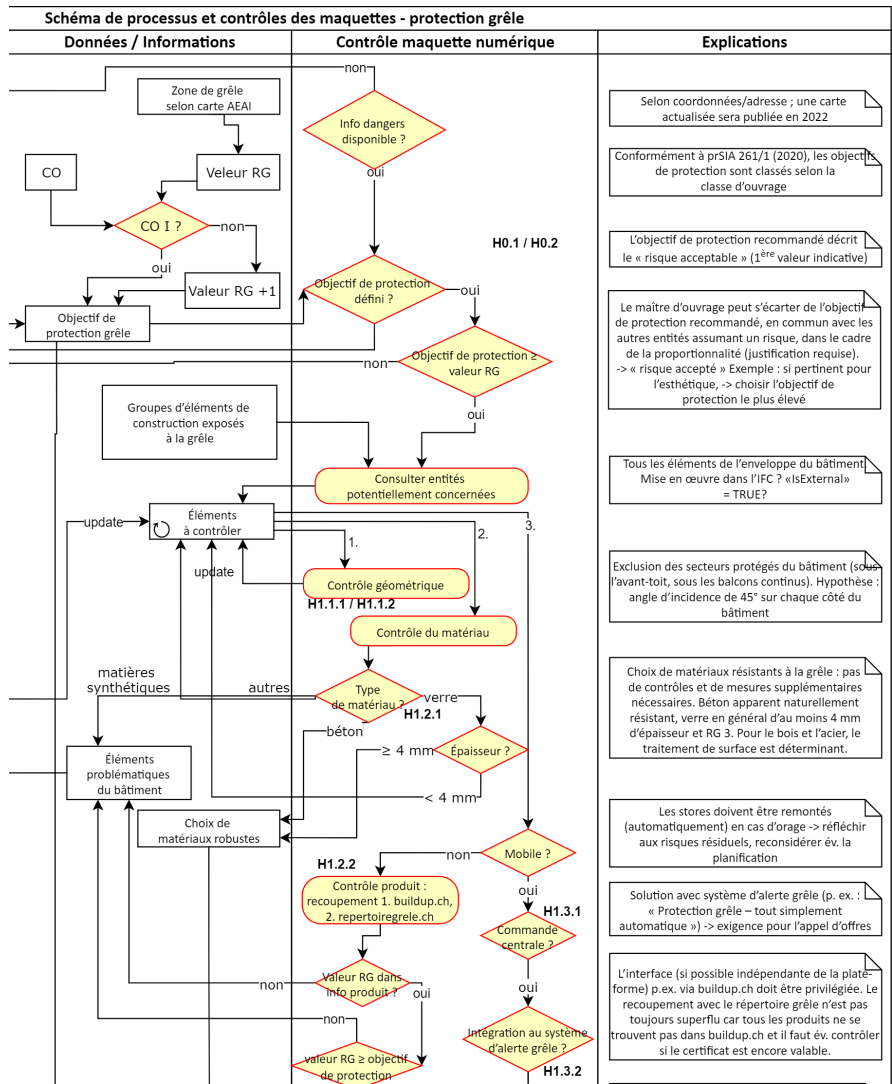


Illustration 14: Diagramme Logique de contrôle (exemple)

## 5.2.2 Exigences concernant les informations

Les exigences concernant les informations sur la maquette numérique sont déduites à partir des règles de contrôle définies au niveau sémantique. Ce processus passe par deux étapes :

- Identification des types d'objets (classes, entités)
- Identification des propriétés (attributs)

Afin que les exigences concernant les informations puissent être spécifiées de manière précise et univoque, elles doivent être formulées en référence à un modèle de données concret. Le standard Industry Foundation Classes (IFC) largement répandu, ouvert et librement accessible convient tout à fait ici (buildingSmart International, 2017). Dans le projet OGN, toutes les exigences d'information ont été en effet aussi formulées sur la base de l'IFC (version 4.0.2.1). Cette version est aussi publiée comme norme ISO (ISO 16739-1:2018).

### Aspects techniques

Lors de la définition de l'exigence concernant les informations, un aspect central est à observer : la maquette numérique doit non seulement contenir les informations à contrôler mais aussi les critères de contrôle, voire les paramètres pour l'élaboration des critères de contrôle. Concrètement, pour construire un bâtiment résistant aux dangers naturels, les objectifs de protection tout comme les exigences en découlant doivent être représentés de la manière la plus précise possible dans la maquette. Ce paradigme trouve son fondement par une argumentation au niveau du procédé et sur le plan technique :

- Procédé

Comme indiqué dans les résultats sur la définition du processus, un dialogue systématique et explicite sur les risques joue un rôle central dans la prévention des dangers naturels. Si les résultats du dialogue, soit les objectifs de protection convenus, sont intégrés dans la maquette, il est possible de contrôler simplement la tenue du dialogue sur les risques et l'existence des résultats grâce aux règles de contrôle. Si ces informations sont absentes de la maquette numérique, des indications appropriées peuvent être délivrées dans les règles. Combinées à la logique des règles de contrôle, les informations de la maquette numérique servent alors « d'aide-mémoire » pour la planification.

- Technique

Si, pour un contrôle, les objets à contrôler tout comme les critères de contrôle eux-mêmes sont compris dans la maquette, cela facilite (potentiellement) la configuration et l'adaptation des règles de contrôle implémentées dans un système. Les règles implémentées dans un système peuvent prélever de manière dynamique les critères (en temps réel) dans la maquette. Une modification des critères de contrôle (p. ex. : suite à une adaptation des objectifs de protection) n'impose pas d'adaptation des règles de contrôle.

Pour représenter les objectifs de protection et les exigences, dans la maquette, un ensemble de propriétés PropertySet<sup>1</sup> spécifique a été défini (CHVKF\_NG\_SchutzzielAnforderung). Les informations pertinentes sur les objectifs de protection et sur les exigences pour chaque type de danger naturel y sont enregistrées (voir par exemple Illustration 16).

<sup>1</sup> Voir encadré séparé

## Encadré IFC et PropertySet

Le modèle de données de l'IFC définit des propriétés valables en général (Property resp. PropertySet). Cet aspect repose sur l'orientation internationale et l'universalité de l'IFC. On renonce expressément à fournir une définition globale des propriétés, car d'une part elle serait beaucoup trop vaste pour pouvoir représenter une aide pour tous les cas d'application et d'autre part une harmonisation technique sur le plan international ou supra-régional est peu probable. À la place, le standard IFC prévoit des mécanismes d'extension. Il s'agit de structures définies sur une base générique avec lesquelles il est possible de définir des propriétés nationales, de domaine ou de projet.

De tels PropertySets sont habituellement définis au niveau `IfcSite`, c'est-à-dire avec une validité pour l'ensemble du site. Tous les ouvrages et les éléments de construction attribués au site sont soumis à ces objectifs et à ces exigences.

Les objectifs et les exigences ont pu être définis en principe aussi à un niveau inférieur de la structure spatiale, p. ex. pour un élément de construction concret (une façade par exemple) si des objectifs et des exigences divergents sont fixés pour des objets sélectionnés. Dans ce cas, la règle veut que pour un objet ce soit l'exigence « la plus proche » dans la structure spatiale qui s'applique. De telles définitions « dispersées » des objectifs et des exigences avec des « ordres prioritaires » correspondants n'ont pas beaucoup d'impact sur le plan technique. En revanche, cette approche a tendance à rendre davantage complexes la logique de contrôle à implémenter ainsi que la cohérence technique des informations.

Le fait de choisir d'enregistrer les exigences dans la maquette répond à un principe similaire qui se trouve actuellement en cours d'élaboration par un groupe de travail également dans le domaine de la protection incendie. Les affectations des locaux donnent lieu à de nombreuses exigences en matière de protection incendie. Les exigences sont d'ailleurs aussi spécifiées à ce niveau (et non au niveau `IfcSite` ou `IfcBuilding`, comme pour les dangers naturels).

En plus de la définition des PropertySets, on a aussi utilisé la possibilité offerte par le format IFC de référencement des documents (voir Illustration 15). Il s'est avéré que les documents joueront toujours un rôle essentiel dans le futur également et ils seront élaborés et échangés en complément de la maquette numérique. Dans le cadre de la prévention des dangers naturels, cet usage porte d'une part sur la documentation du plan de protection où sont consignées des informations plus larges issues de l'élaboration du plan de protection, par exemple selon les recommandations de (SIA D0260, 2019). D'autre part, des documents doivent également être transmis spécifiquement aussi lors du passage à l'exploitation. Il s'agit de documents importants pour la prévention des dangers naturels dans cette phase (plan de protection, manuels, plan d'urgence, fiches d'information).

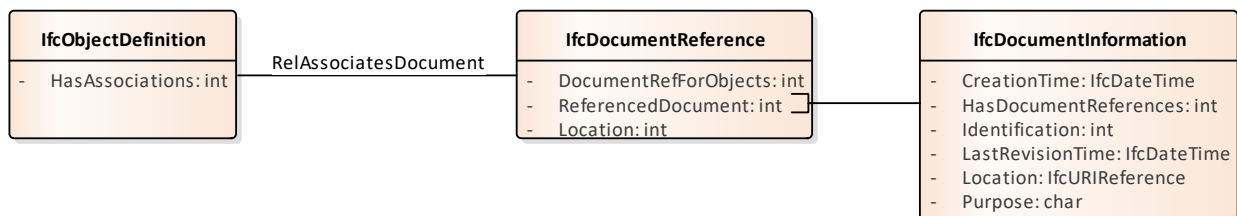


Illustration 15: Schéma IFC Document de référence (extrait diagramme de classes)

Dans la maquette numérique avec l'IFC, il est possible d'échanger des métadonnées portant sur des documents définis et enregistrés sur un support externe. Cette possibilité consiste à imposer la présence de documents externes sélectionnés dans les exigences d'information. L'annexe A de (OGN, 2021a) comprend d'autres indications sur l'utilisation de schémas IFC.

## Aspects formels

La spécification des exigences d'information se présente aujourd'hui en général sous forme de tableau Excel, de manière très hétérogène. Les tableaux reprenant les exigences d'information deviennent vite illisibles : ils ne facilitent pas la vue d'ensemble et la reconnaissance des principes et des interdépendances. C'est pour cette raison qu'une notation graphique basée sur des diagrammes de classes selon UML a été choisie pour le projet OGN. Dans le sous-projet IfcRail de buildingSmart International, des directives de modélisation ont été définies pour l'application d'UML dans le cadre de l'IFC (buildingSmart International, 2019). Les exigences d'information sont définies sous forme de graphique dans le projet OGN, sur la base de cette directive. Les directives issues du projet IfcRail ont été encore élargies aux besoins spécifiques dans le projet OGN et elles ont été en particulier orientées également vers une utilisation spécifique dans l'outil CASE<sup>2</sup> Enterprise Architect, qui servait d'outil central pour la modélisation des processus et des exigences d'information (Schildknecht, 2020).

La notation graphique servant à spécifier les exigences d'information est par exemple représentée dans l'illustration 16. Les exigences sont représentées (à droite) et peuvent être référencées par leur numéro d'identification avec le catalogue de règles de contrôle. Pour chaque exigence, il est ensuite défini quelles entités et quelles propriétés sont nécessaires pour contrôler que l'exigence est respectée, c'est-à-dire quelles informations concrètes doivent être présentes dans la maquette afin de pouvoir contrôler automatiquement que l'exigence est remplie.

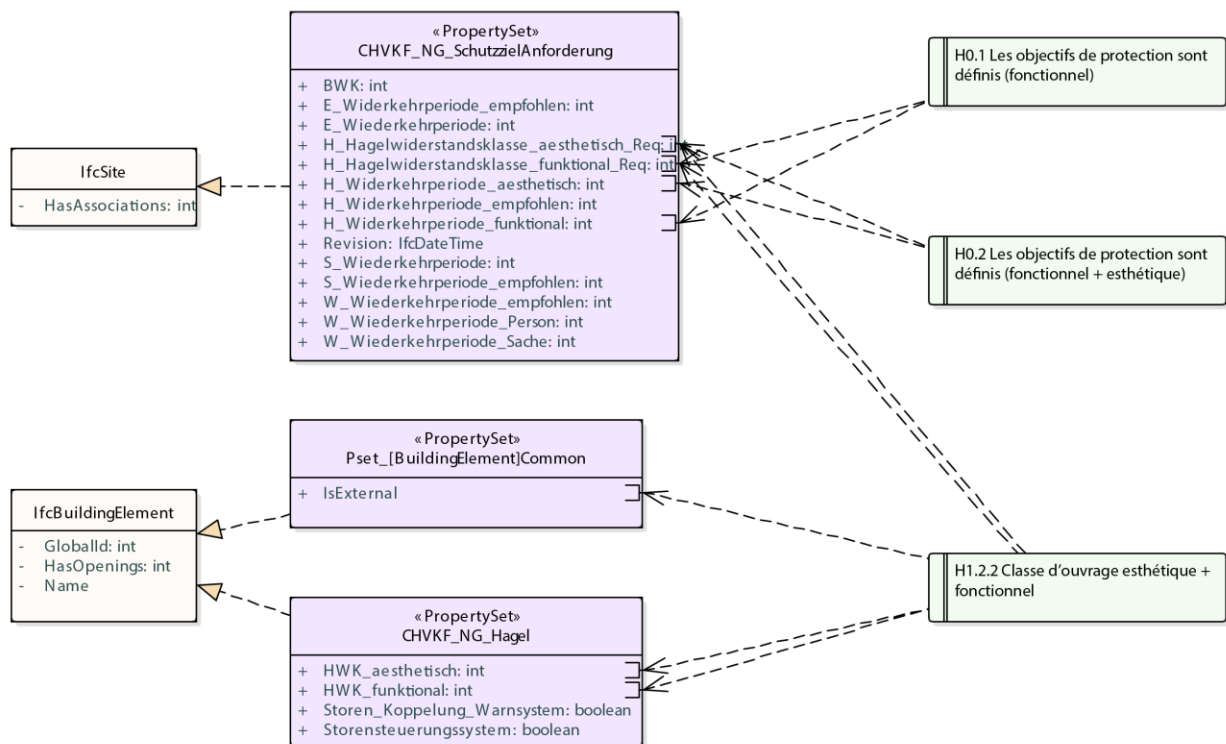


Illustration 16: Définition formelle des exigences d'information, sous forme de graphique (exemple)

Avec un outil CASE, les exigences d'information peuvent être non seulement délivrées sous forme de graphique par des diagrammes, mais elles peuvent aussi être évaluées comme information structurée. Ainsi, il est possible de générer à partir de l'IFC une comparaison entre toutes les exigences et toutes les entités / tous les attributs nécessaires et de réaliser des contrôles de cohérence. Il est de même possible de délivrer automatiquement les exigences d'information aussi sous forme de tableau (voir Tableau 2 ci-après).

<sup>2</sup> Outil CASE : Logiciel d'assistance de Software Engineering : (CASE : Computer Aided Software Engineering).

req.name	entity.name	pset.name	prop.name
H0.1 Schutzziele sind definiert (Funktion)	IfcSite	CHVKF_NG_SchutzzielAnforderung	H_Hagelwiderstandsklasse_funktional_Req
H0.1 Schutzziele sind definiert (Funktion)	IfcSite	CHVKF_NG_SchutzzielAnforderung	H_Widerkehrperiode_funktional
H0.2 Schutzziele sind definiert (Funktion + Aussehen)	IfcSite	CHVKF_NG_SchutzzielAnforderung	H_Hagelwiderstandsklasse_aesthetisch_Req
H0.2 Schutzziele sind definiert (Funktion + Aussehen)	IfcSite	CHVKF_NG_SchutzzielAnforderung	H_Widerkehrperiode_aesthetisch
H1.2.2 HWK ästhetisch + funktional	IfcBuildingElement	CHVKF_NG_Hagel	HWK_funktional
H1.2.2 HWK ästhetisch + funktional	IfcBuildingElement	CHVKF_NG_Hagel	HWK_aesthetisch
H1.2.2 HWK ästhetisch + funktional	IfcBuildingElement	PSet_[BuildingElement]Common	IsExternal
H1.2.2 HWK ästhetisch + funktional	IfcSite	CHVKF_NG_SchutzzielAnforderung	H_Hagelwiderstandsklasse_aesthetisch_Req
H1.2.2 HWK ästhetisch + funktional	IfcSite	CHVKF_NG_SchutzzielAnforderung	H_Hagelwiderstandsklasse_funktional_Req

Tableau 2 Définition formelle des exigences d'information, sous forme de tableau (exemple)

Pour les types de dangers naturels et les règles de contrôle étudiés dans le projet, seuls quelques PropertySets ont dû être redéfinis. Pour la plupart des informations à contrôler, des propriétés adéquates ont été trouvées dans les PropertySets prédéfinis de l'IFC.

Une convention d'appellation a été définie pour les PropertySets redéfinis : le préfixe «CHVKF\_\*» a été choisi, conformément à la recommandation (provisoire) dans (CEN/TC 442, 2019).

Par mesure de simplification, les PropertySets redéfinis ont été définis (seulement) en allemand. Pour une application nationale et internationale, les définitions de PropertySets devraient être redéfinies une nouvelle fois pour être compréhensibles dans toutes les langues.

### 5.2.3 Implémentation

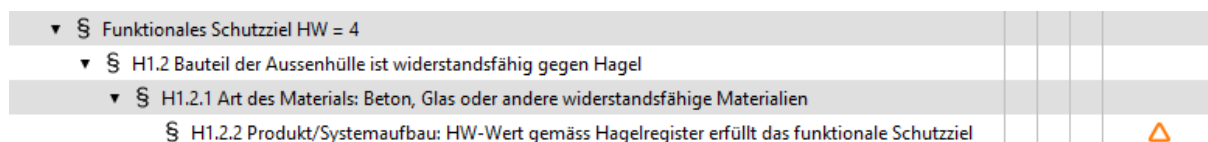
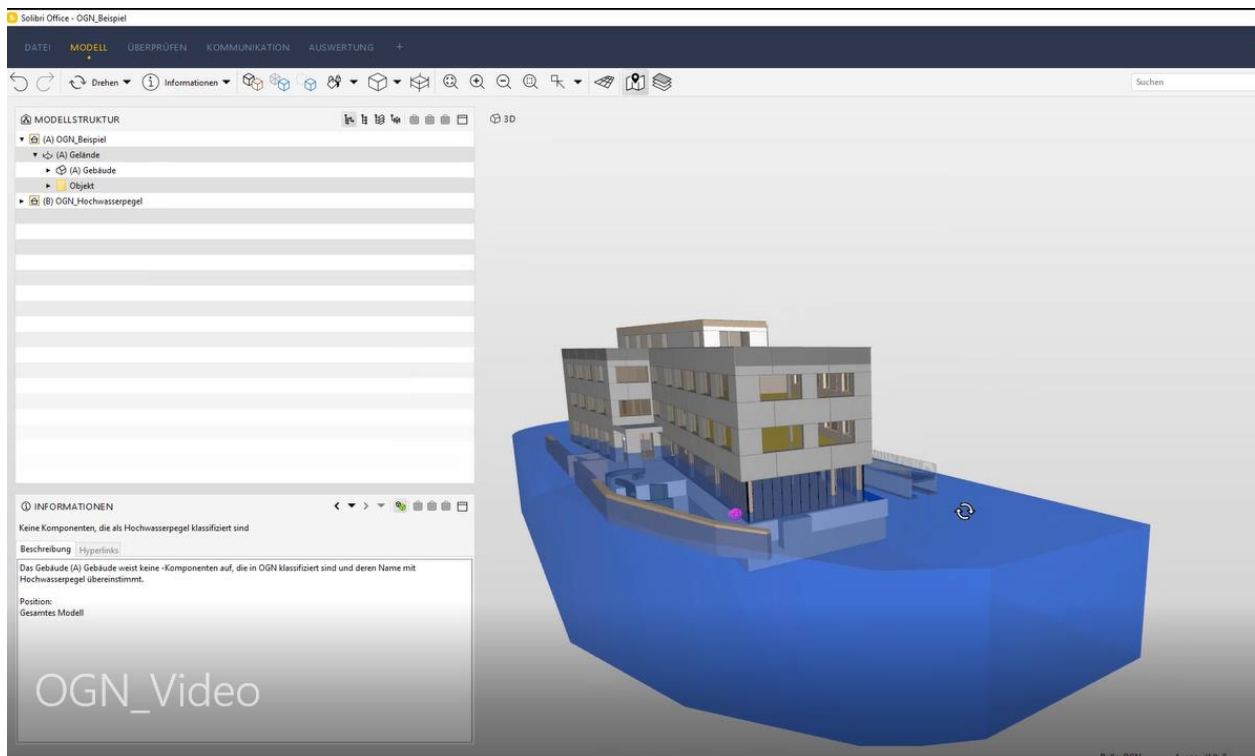
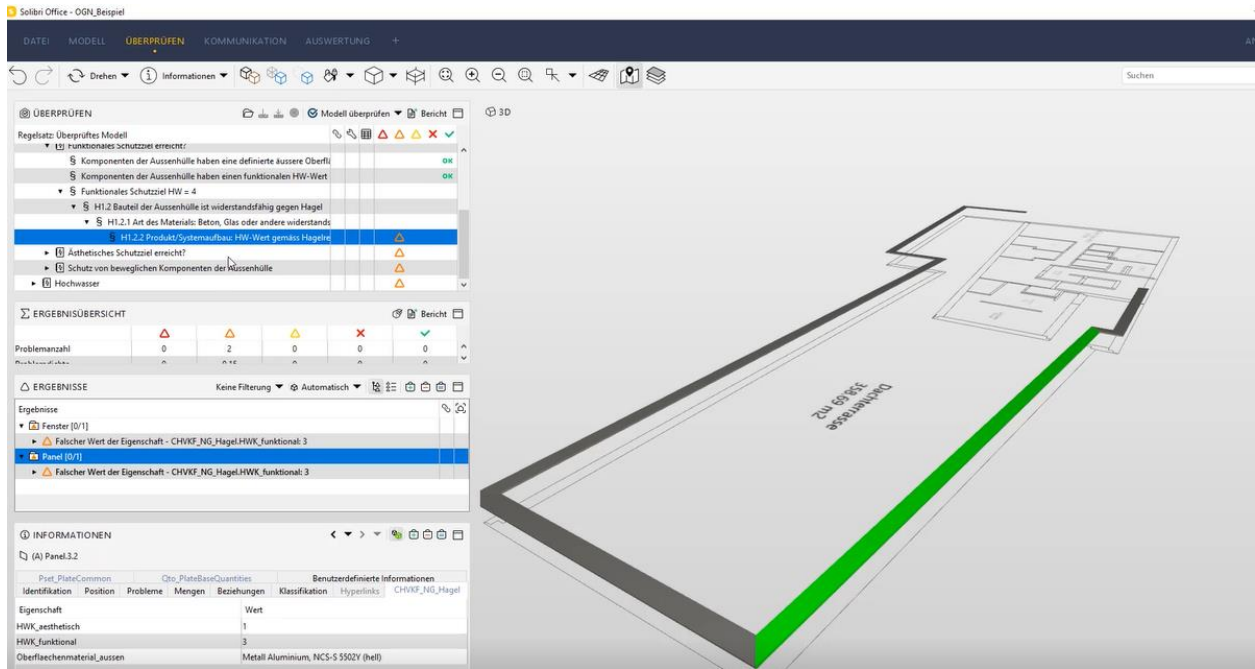


Illustration 17: Règles de contrôle implémentées dans Solibri (exemple)

Fondation de prévention des établissements cantonaux d'assurance  
 Optimiser la protection des bâtiments contre les dangers naturels grâce au BIM (OGN)



### 5.3 Données de base et transformation

Dans le rapport sur les données de base et la transformation SIG-BIM (OGN, 2021b), les données de base et le service de transformation SIG-BIM font l'objet d'une description détaillée. Ce chapitre aborde les principales conclusions.

Comme démontré dans la définition générale du processus au chapitre 5.1, le simple fait que des informations sur les aléas soient disponibles dans le cadre de maquettes numériques constitue une base essentielle pour pouvoir intégrer correctement la prévention des dangers naturels dans le processus de planification. Dans le projet de recherche, on a évalué dans une première étape pour différents types de dangers naturels s'il existe des informations sur les aléas et sous quelle forme et si ces informations sont disponibles.

Dans une seconde étape, un processus a été défini pour des données aléas sélectionnées. Ce processus a été implémenté sous forme de prototype dans un logiciel permettant d'intégrer les données aléas dans des maquettes numériques.

#### 5.3.1 Données de base sur les aléas

L'aléa lié aux dangers naturels est représenté dans différentes données de base et sources de données.

Les données de base ne sont pas (encore) mises à disposition de manière centralisée. Les données appartiennent aux cantons ou à la Confédération qui ont la charge de les mettre à jour. Cette situation est la source de grandes différences entre les blocs de données en termes de disponibilité, d'exhaustivité et d'homogénéité. Dans le projet OGN, il a été question uniquement de données disponibles au niveau national. Dans certains cantons, il peut exister néanmoins des données supplémentaires sur les portails de géodonnées.

Les données de base suivantes ont été identifiées et analysées :

Processus de danger	Bloc de données	Souveraineté des données	Acquisition des données	Exhaustivité	Homogénéité
Dangers naturels gravitationnels	Géodonnées de base Carte des dangers 166.1	Cantons	WFS <sup>3</sup> , autres formats	non	moyen
Ruissellement de surface Pluies intenses	Carte de l'aléa ruissellement	Confédération	Visualiseur cartographique Confédération 4, WMS 5	oui	élevé
Grêle	Zones de grêle	Confédération	SIA, AEAI 6	oui	élevé
Tremblements de terre	Zones sismiques	Confédération	SIA, visualiseur cartographique Confédération 4	oui	élevé
Tremblements de terre	Classes sismiques de sols de fondations	Cantons	Visualiseur cartographique Confédération 4	non	faible

Tableau 3: Origine des données de bases

<sup>3</sup> wfs.geodienst.ch/gefahrenkarten

<sup>4</sup> map.geo.admin.ch

<sup>5</sup> wms.geo.admin.ch

<sup>6</sup> [https://www.schutz-vor-naturgefahren.ch/files/media/Fachebenen/Hagel/Hagelgefaehrungskarte\\_50-jaehrlich\\_VKF.JPG](https://www.schutz-vor-naturgefahren.ch/files/media/Fachebenen/Hagel/Hagelgefaehrungskarte_50-jaehrlich_VKF.JPG)



L'acquisition des géodonnées peut être automatisée en passant par les interfaces de données standardisées WFS (Web Feature Service, données vectorielles) et WMS (Web Map Service, grilles de données). Les données peuvent être consultées individuellement et conviennent de ce fait bien pour le projet OGN. Les autres sources d'acquisition (p. ex. : visualiseur cartographique propriétaire) ne sont pas (encore) utilisables en raison de l'impossibilité de consultation ou de l'absence de géoréférencement.

Au vu de leur bonne disponibilité sur le plan technique, deux blocs de données sur les aléas ont été définis pour le projet OGN pour l'implémentation dans un service de transformation sous forme de prototype. Ces blocs font l'objet d'une brève explication technique ci-après.

### Géodonnées de base Carte des dangers 166.1

Ce bloc de géodonnées est défini par le modèle minimal de géodonnées de base n° 166.1. Le modèle de données couvre les dangers naturels gravitationnels, dont font partie les principaux processus de crue, glissement de terrain, chute de pierres et avalanche. Ceux-ci font la plupart du temps l'objet d'une distinction en sous-processus (Ruf, 2019).

Les données cantonales sont rendues disponibles par le biais du portail national de la Conférence des services cantonaux de géoinformation (CCGEO) sous forme de données vectorielles au format WFS. Le modèle de données est constitué des éléments suivants :

- Un modèle de données minimum : imposé à tous les cantons (partie obligatoire).
- Un modèle de données élargi : parties restantes de la cartographie des dangers (partie facultative).

Le prototype implémenté dans le projet traite uniquement le modèle minimum avec une carte des intensités et des zones de danger.

### Carte suisse de l'aléa ruissellement

La carte qui couvre l'ensemble du territoire suisse indique les zones potentiellement menacées par un ruissellement de surface (période de retour > 100 ans) à l'échelle 1:12 500. À caractère purement informatif, elle contribue à sensibiliser la population (BAFU et al., 2018). La Confédération la met à disposition en tant que carte raster (WMS).

## 5.3.2 Service de transformation SIG-BIM

La mise à disposition de données sur les aléas dans un environnement « BIM » a été implémentée et démontrée sous forme de prototype à l'aide d'un service de transformation. L'illustration 18 donne une représentation schématique de l'architecture du système et de l'exécution du programme du prototype de transformation.

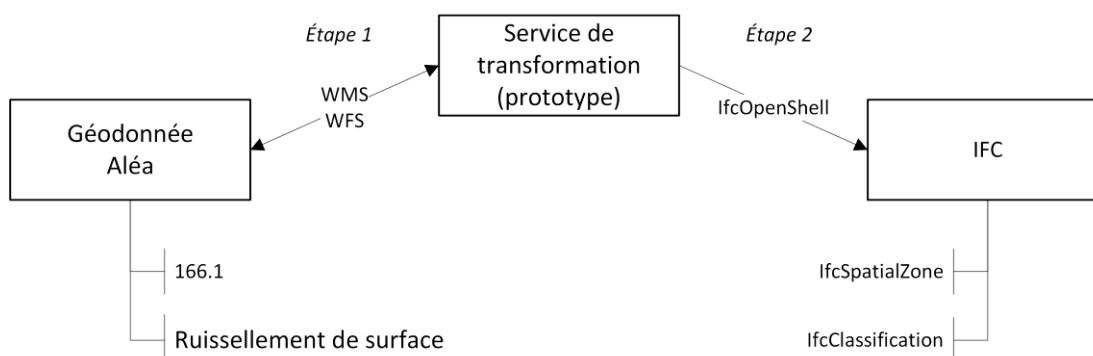


Illustration 18: Schéma Service de transformation SIG-BIM

Le service de transformation reprend les coordonnées du site (p. ex. de la parcelle concernée) en tant que paramètres d'entrée et recherche pour cet emplacement des données sur les aléas auprès des géoservices disponibles. Les informations trouvées sont transformées selon le format IFC et placées à la disposition de l'utilisateur au sein d'un fichier ifc.

Le service de transformation transforme en deux étapes les données sur les aléas, depuis les formats des géodonnées en format IFC. Des transformations ont alors lieu tant au niveau du format que des modèles de données. Les blocs de géodonnées « cartes des dangers 166.1 » ainsi que « carte de l'aléa ruissellement » sont traités dans l'implémentation sous forme de prototype. Il s'agit alors d'une part d'un bloc de données vectorielles et d'autre part d'un bloc de grilles de données. Les géodonnées sont obtenues par les géoservices. Ainsi les fichiers traités sont au format WFS et WMS.

Les informations sur les aléas sont transformées en modèle de données de l'IFC et inscrites dans un fichier au format Step Physical File (.ifc), de telle sorte que les données puissent être lues et rendues facilement disponibles dans des outils BIM courants. Les informations sur les aléas sont délivrées sous forme de « IfcSpatialZone ». L'illustration 19 ci-après montre la transformation du modèle au niveau conceptuel.

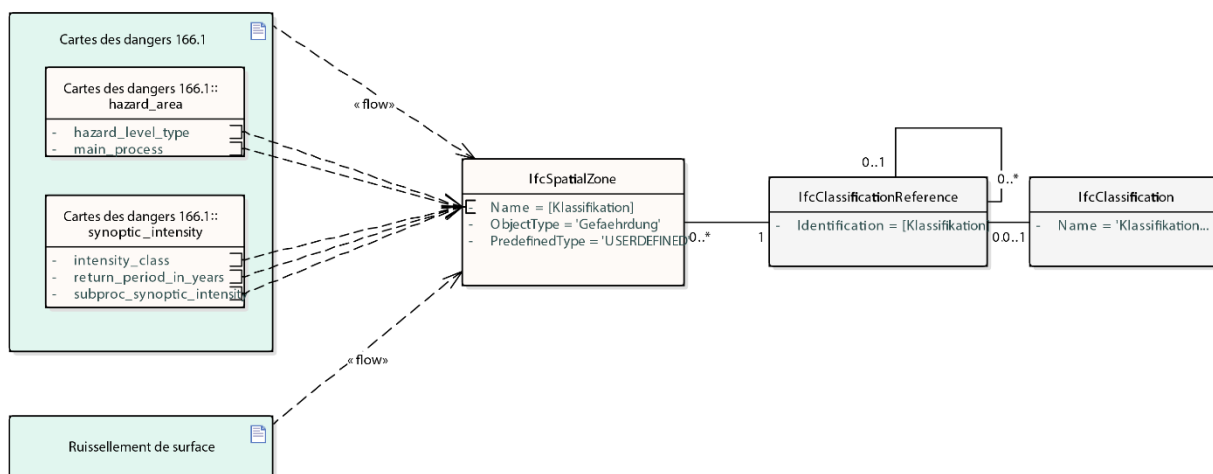


Illustration 19: Transformation des données sur les aléas à partir des géodonnées selon l'IFC

L'ensemble des informations sur les aléas sont transférées au format IFC dans l'entité IfcSpatialZone où elles sont signalées avec l'ObjectType = aléa. Le type et la puissance de l'aléa sont transposés en IFC par le biais d'une classification. La valeur de la classification de chaque aléa est déterminée tant dans le nom de l'IfcSpatialZone (par une convention d'appellation structurée) que par le système de classification.

Se référer à (OGN, 2021b) pour les informations plus détaillées sur la transformation.

## 6 Discussion et conclusions

Plusieurs développements actuels comme la construction durable ou la loi fédérale révisée sur les marchés publics (LMP) pourraient bien avoir des répercussions positives sur la construction de bâtiments résistants aux dangers naturels parce que la qualité du bâtiment joue un rôle central pour son affectation. La méthode BIM va dans le même sens. Elle apporte toutefois des modifications plus profondes en termes de méthodologie et de technologie. Ces nouveautés étendent le champ des possibilités pour les questions techniques les plus diverses, même si la construction ne s'en trouve pas facilitée. Le projet OGN a réussi à démontrer le potentiel du BIM et à esquisser avec des prototypes une mise en œuvre possible dans la pratique.

Par principe, il est possible de protéger convenablement les bâtiments contre les dangers naturels aussi en passant par un processus traditionnel de planification et de construction. Cela présuppose toutefois de réfléchir profondément à la question dès les premières phases du projet et exige de la part du maître d'ouvrage et de l'architecte une attitude proactive et la mise en place conséquente de mesures. Pour protéger un bâtiment contre les dangers naturels, la reconnaissance et l'évaluation des risques constituent des étapes décisives. Le manque de sensibilisation aux risques liés aux dangers naturels représente le problème central auquel se heurte la prévention. La méthode BIM et la digitalisation de la planification et du secteur de la construction en général offrent de nouvelles chances d'aborder la question.

### **Collaboration, prise en compte du cycle de vie et compétence de commanditaire**

Des groupes de travail interdisciplinaires ont identifié, pour toute la durée de vie des ouvrages, des processus efficaces pour la prévention des dangers naturels que sont la grêle, les tremblements de terre, les crues/pluies intenses et les chutes de pierres avant de les documenter dans des diagrammes. L'accent était placé sur le rôle du maître d'ouvrage et de l'architecte/responsable de l'ensemble du projet et sur les orientations essentielles pour la prévention des dangers naturels dans les premières phases de la planification. Des solutions ont ensuite été cherchées pour promouvoir le dialogue sur les risques entre le maître d'ouvrage, les projeteurs et les autorités.

La réussite du dialogue sur les risques passe notamment par une sensibilisation accrue au thème des dangers naturels, par un minimum de connaissances techniques pour l'évaluation des risques ainsi que par une communication proactive et transparente entre tous les acteurs. Il est essentiel que les projeteurs collaborent étroitement entre eux d'une part, et avec le maître d'ouvrage d'autre part. Pour mener à bien ce travail en commun, il est possible de s'appuyer sur les méthodes de travail numériques et les approches basées sur des modèles. Les clarifications techniques étant avancées aux premières phases de la planification, les ingénieurs et les spécialistes sont impliqués plus tôt. Cette anticipation contribue aussi à construire en tenant compte des dangers naturels. Il est important d'interagir avec les données d'entrée interconnectées et la gestion centrale des données dans la maquette numérique.

Outre les nouvelles formes de collaboration, la prise en considération du cycle de vie surtout ainsi que la « compétence de commanditaire » davantage sollicitée du maître d'ouvrage offrent un fort potentiel en faveur de la prévention des dangers naturels. La prise en considération du cycle de vie permet non seulement que l'objectif lors de la planification d'une nouvelle construction repose sur une réalisation rapide et à moindre prix, mais assure surtout une mise en service sans entraves et une utilisation la plus intense possible du bâtiment à long terme. Le potentiel d'optimisation en matière d'utilisation, de qualité et de coûts étant le plus fort pendant la phase d'exploitation, les maîtres d'ouvrage sont les acteurs décisifs de cette évolution. Pour pouvoir profiter le mieux possible de la méthode BIM, ils doivent inévitablement réfléchir davantage aux objectifs et être capables de formuler des exigences concrètes pour le bâtiment. Contrairement à une approche ordinaire de la planification, ce rôle bien plus actif du maître

d'ouvrage représente aussi une chance unique d'analyser et d'évaluer de manière adéquate les risques liés à l'exploitation dès les premières phases de la planification. De plus, des facteurs liés au site tout comme l'aléa découlant des dangers naturels sur place (p. ex. : crues ou chutes de pierres) peuvent avoir davantage de poids. La prise en considération du cycle de vie profite aussi aux projeteurs et aux spécialistes techniques tout comme aux facility managers. En effet, ils peuvent par exemple réaliser des calculs et des simulations pour optimiser l'exploitation en se basant directement sur la maquette numérique.

Enfin, les processus dépendent très étroitement des informations : les informations peuvent permettre de déclencher des sous-processus et servent de base ou de résultat aux analyses et aux décisions. C'est pourquoi les liaisons avec la maquette numérique ont été soulignées dans les diagrammes de processus et les points nécessitant ou générant des informations ont été identifiés.

### **Les maquettes numériques : une aide pour le processus**

Un grand nombre des informations utiles à la prévention des dangers naturels peuvent être saisies et mises à disposition dans les maquettes numériques sous forme structurée et largement standardisée. Il s'agit d'une part de données de base (p. ex. : aléas), d'objectifs de protection et d'exigences du projet résultant du dialogue sur les risques ainsi que des mesures de prévention elles-mêmes qui ont été prévues et réalisées.

Les informations devant y être saisies « obligatoirement » de manière structurée, une maquette numérique requiert et favorise l'identification explicite et la désignation de résultats (intermédiaires) pertinents. Il est ainsi facile à l'aide de moyens simples et efficaces de respecter et de vérifier les étapes importantes de la planification. La définition d'objectifs de protection peut par exemple être contrôlée explicitement pour différents types de dangers naturels et un dialogue sur les risques peut alors aussi être encouragé. Cet aspect a été avant tout étudié pour la planification et la réalisation, mais il devrait aussi jouer un rôle important dans la phase d'exploitation.

Une maquette numérique peut aider les planificateurs à respecter l'intégralité des étapes du processus et à trouver une solution aux problématiques importantes. Elle sert également à la traçabilité des décisions sous forme de documentation structurée (p. ex. : objectifs de protection efficaces convenus, aléas sur lesquels repose la planification). Cet aspect est décisif en vue de la phase d'exploitation, le défi consistant à adapter judicieusement la teneur des informations pour l'exploitation et de gérer et actualiser sur le long terme ces données.

Dans le projet de recherche, différentes propositions concrètes de solutions ont été développées pour intégrer les informations sur la prévention des dangers naturels dans le modèle de données de l'IFC. Des informations sur les aléas sont intégrées dans la maquette numérique au moyen d'une `IfcSpatialZone` et elles sont structurées sur le plan technique grâce à un système de classification qui se base sur les structures des blocs de géodonnées originaux. Les objectifs de protection et les données de base nécessaires au dialogue sur les risques sont saisis et rendus disponibles directement dans la maquette numérique via des `PropertySets` techniques et spécifiques au projet. Les `PropertySets` sont alors saisis si possible en « haut » dans la structure spatiale des éléments. Pour les dangers naturels, cette saisie se fait habituellement au niveau du site (`IfcSite`) ou de l'ouvrage (`IfcBuilding`), car les objectifs de protection ne se réfèrent que rarement aux différents éléments de construction ou zones de l'ouvrage (sensiblement à l'inverse de la protection incendie). Pour certains dangers naturels, le recours à la structure spatiale peut s'avérer utile si les exigences en matière d'objectifs de protection pour un seul local ou certains éléments de construction sont plus élevées ou plus faibles que celles du site ou de l'ouvrage.

## **Les règles de contrôle : une aide à la planification**

Des exemples ont permis de montrer les possibilités et les limites des contrôles des maquettes pour les dangers naturels grêle, inondations, tremblements de terre et chutes de pierres. Pour ces dangers naturels, des règles de contrôle cohérentes d'un point de vue technique ont été transcrites dans des schémas de contrôle de conception et des exigences d'informations ont été déduites pour la maquette numérique (IFC). Un premier PoC (Proof of Concept) a été fourni pour la grêle et les inondations avec le Model Checker du logiciel Solibri.

Les contrôles de maquettes simples et pouvant être implantés directement dans des logiciels standard présentent un grand potentiel. Par exemple, les contrôles sont réalisés selon des critères de forme ou portent sur l'exhaustivité des informations. Il est en outre possible de délivrer des listes avec les éléments de construction que les architectes/projeteurs doivent évaluer de manière approfondie (p. ex : non-respect d'une contrainte). Les règles de contrôle techniques deviennent toutefois rapidement plus complexes, ce qui peut limiter les possibilités d'application. Ce point concerne d'une part la description des règles (technique) elles-mêmes, c'est-à-dire la forme précise de la spécification en référence à la maquette numérique. D'autre part, il existe actuellement aussi des limites techniques en ce qui concerne l'implémentation, notamment au niveau des interdépendances spatiales et topologiques. Pour les modélisations plus complexes nécessitant des calculs intensifs, les logiciels standard BIM risquent de ne plus suffire dans un avenir proche. Il convient toutefois généralement de partir du principe que les simulations ont tendance à remplacer de plus en plus les preuves et les expertises. Si les interfaces entre la maquette numérique et le logiciel spécialisé fonctionnent parfaitement (dans les deux sens) et de manière automatisée, des simulations aujourd'hui coûteuses et laborieuses seront plus simplement disponibles et plus souvent utilisées.

Les contrôles des maquettes (avec des règles de contrôle dans un logiciel de contrôle de maquette BIM ou aussi avec des simulations externes) nécessitent comme base des maquettes numériques de qualité adéquate. Dans le projet de recherche OGN, les contrôles ont été développés et testés avec des données tests « artificielles ». Par expérience des projets pratiques, il y a lieu d'admettre que les maquettes numériques disponibles sont saisies selon différentes méthodes et divers critères et qu'elles sont de qualité très variée. L'un des plus gros défis auquel les contrôles de maquette pourraient être amenés à faire face consiste à obtenir une qualité de données suffisante pour les contrôles automatiques et à respecter les conventions dans la saisie des données.

L'enregistrement des objectifs de protection dans la maquette numérique même est une condition essentielle qui vient s'ajouter à l'aspect de la documentation, en particulier aussi pour l'application de règles de contrôle, car il existe alors une maquette « auto-configurée ». Par auto-configuré on entend que tous les paramètres d'entrée pour le contrôle des maquettes peuvent être directement repris de la maquette numérique et qu'aucun flux d'information supplémentaire ni aucune concertation ne sont nécessaires.

## **Intégration des géodonnées (données sur les aléas)**

La préparation la plus simple possible des données de base, sans obstacle et de manière uniforme, facilite chaque projet. Au vu des raisons susmentionnées liées au manque de sensibilisation envers le thème des dangers naturels, il est important que l'information sur les dangers naturels présents sur le site ressorte dans les caractéristiques du site en ayant le moins possible besoin de recourir au maître d'ouvrage et à l'architecte. Maître d'ouvrage et projeteur devraient avoir connaissance du danger même sans rechercher activement l'information à ce sujet.

Pour déterminer l'aléa existant sur un site, il convient de consulter différentes sources de géodonnées. Un PoC a permis de démontrer quelles géodonnées peuvent être transférées dans le format IFC. Un scénario a été retenu selon lequel les géodonnées sont obtenues auprès de services en ligne avant d'être transférées dans un fichier IFC. Ce fichier peut être ensuite lu dans un logiciel BIM et servir de base. Il était possible de démontrer la faisabilité d'un point de vue purement technique. Par analogie, les géodonnées interconnectées gagneront en importance également dans de nombreux autres domaines techniques.

Comme pour les règles de contrôle, les premiers enjeux résident dans la qualité des données-sources pour l'intégration des données de base aussi. Les données sur les aléas n'existent pas toutes dans un format SIG standard et les données cantonales divergent en partie du modèle de données national. De telles données hétérogènes ne sont pas utilisables ou seulement difficilement par des services standards. De plus, les cartes de dangers cantonales révèlent des différences dans la saisie des données, ce qui ne facilite pas l'uniformisation dans l'utilisation et le traitement des données au-delà des frontières cantonales. L'harmonisation des cartes des dangers cantonales représente donc une vraie gageure.

## 7 Perspectives et recommandations

Le projet OGN a permis de démontrer que la méthode BIM de prévention des dangers naturels bénéficie d'un fort potentiel à des niveaux les plus divers. Même si l'on observe plusieurs évolutions tendant vers une amélioration qualitative des bâtiments et même si l'utilisation du BIM devrait de toute façon améliorer d'un certain point de vue la protection des bâtiments, la mise en œuvre dans la pratique de ces conclusions en matière de processus, de règles de contrôle et d'intégration des données exige une démarche proactive, par exemple de la part des établissements cantonaux d'assurance. Il est important que les activités soient bien coordonnées avec des partenaires et des représentants nationaux des domaines techniques apparentés. Car en l'absence de concertation et de consensus entre les différents domaines spécialisés, les dangers naturels resteront un sujet de niche peu considéré. En matière de planification et de construction, les questions sont multiples et d'une grande complexité. Par ailleurs, l'évolution des standards et des directives de modélisation intensifie encore plus le besoin de concertation.

### **Rôle des autorités et intégration de la procédure électronique d'octroi de permis de construire**

Pour pouvoir imposer dans la pratique un mode de construction résistant aux dangers naturels, il convient d'exercer dans un avenir proche une certaine influence sur le processus de planification et de construction. La digitalisation offre sur ce point de nouvelles possibilités et les services cantonaux et communaux, notamment l'administration des travaux, et les établissements cantonaux d'assurance jouent ici des rôles clés. Dans une prochaine étape, il faudrait donc étendre les processus et les flux d'information au rôle des autorités et à la procédure électronique d'octroi des permis de construire. Il faudrait de plus apporter la preuve tangible que les programmes élaborés fonctionnent vraiment, le mieux en passant par des nouveaux projets de construction réels dans une commune engagée dans la transition numérique et dans la mise en réseau de données.

### **Interface de simulations et rôle des spécialistes dans le processus de planification**

Le projet OGN a permis de démontrer que même de simples contrôles de maquette peuvent accompagner efficacement le processus de planification. Ces règles de contrôle pourraient être davantage développées pour un déploiement opérationnel et rendues utilisables par exemple via les App Stores. Le potentiel d'une planification optimisée grâce aux données ressort clairement aussi dans de nombreuses questions techniques en lien avec l'aléa et le dimensionnement des mesures de protection. Pour que les calculs et les simulations effectués dans des logiciels externes puissent être intégrés directement au processus de planification, il convient de trouver quelles sont les possibilités d'échange bidirectionnel des données sur un seul système. Avec une standardisation suffisante des données d'entrée et de sortie, il serait possible d'utiliser des simulations également de manière itérative et quasiment automatique. Cette solution serait très intéressante en particulier pour les dangers naturels gravitationnels mais aussi pour le vent et les tremblements de terre. Tandis qu'en matière de conception du système porteur divers fournisseurs de logiciels ont déjà bien solutionné l'échange bidirectionnel des données (malheureusement souvent au moyen de formats propriétaires), rendant possible une bonne collaboration entre architecte et ingénieur, il manque des interfaces correspondantes pour modéliser les inondations ou simuler les chutes de pierres. Les modélisations notamment de la hauteur d'inondation après une crue et un ruissellement de surface pourraient ainsi être reliées aux données géométriques de la maquette numérique (habituellement beaucoup plus précises) et intégrées directement au processus de planification. Dès lors, il deviendrait possible de bien reconnaître les points faibles du bâtiment, d'identifier les meilleures variantes et de dimensionner les mesures de protection directement sur la maquette BIM. Outre l'élargissement technique en faveur des simulations, le rôle des spécialistes dans le processus de planification devrait aussi être étudié plus précisément. Cette analyse sera certes réalisée en partie par le biais du cas d'application sur les dangers naturels

du projet Innosuisse « GEOL\_BIM » pour les glissements de terrain et les chutes de pierres. L'aspect particulièrement important de la simulation d'inondation resterait toutefois encore à approfondir.

### **Standardisation et développement de directives de modélisation uniformes**

Le monde du BIM ne voit aujourd'hui que peu de solutions pour le sujet de niche des dangers naturels. Pour profiter du potentiel de la méthode BIM, les difficultés toujours d'actualité en termes de standardisation doivent être surmontées et les processus au niveau du canton et des autorités de construction doivent être institutionnalisés. Les contrôles de maquettes par rapport à la sécurité sismique ne seront possibles que si l'on sait clairement comment les aléas, les objectifs de protection et les caractéristiques telles que la résistance à la grêle d'un élément de construction doivent être représentés dans l'IFC et de quoi dépend la modélisation de la maquette de l'architecture et du système porteur. Il ne faut pas oublier non plus de réfléchir à l'échange des données entre les logiciels afin que les simulations dans des logiciels spécialisés puissent être intégrées le plus directement possible dans la maquette numérique. Des directives cohérentes et basées sur des programmes uniformes doivent être définies pour la modélisation de maquettes numériques (directives de modélisation), en étroite concertation avec d'autres groupes spécialisés (dont la protection incendie). Il faut éviter toute ambiguïté ou redondance dans les PropertySets et les caractéristiques afin que le travail lié à la modélisation reste dans certaines limites et que les maquettes numériques puissent toujours être le plus possible échangées et utilisées indépendamment du fabricant. Le recoupement au-delà des limites des domaines devrait permettre de décider de manière significative si et comment les dispositions d'un seul domaine spécialisé peuvent être reprises par les projecteurs et les fabricants de logiciels.

### **Service de transformation en ligne pour l'intégration d'informations sur les dangers dans l'IFC**

Le prototype développé dans le projet a montré qu'il est techniquement possible de mettre en place une consultation dynamique des informations sur les dangers pour étendre un terrain donné et de réaliser une transformation dans des systèmes locaux de coordonnées d'un projet BIM au format IFC. Étant donné que les aspects du contrôle de maquette et de ce fait aussi le processus de planification dépendent largement de ces données d'entrée, le développement d'un service de transformation opérationnel devrait être lancé. Pour pouvoir utiliser ce service sur tout le territoire suisse, il est indispensable de disposer de cartes cantonales des dangers harmonisées et conformes aux modèles de données. L'information sur les dangers et d'autres données standard telles que les dispositions en matière d'objectifs de protection selon les normes SIA 261 et 261/1 pourraient être associées avec les données de référence de la mensuration officielle. Pour amplifier la portée d'un tel outil en ligne, il convient de contrôler les coopérations avec d'autres sujets techniques qui sont pareillement tributaires des données SIG.



## 8 Glossaire/Abréviations

Terme	Description
Méthode BIM	Terme anglais (traduction) : Virtual Design and Construction
BIM	Building Information Modelling
FM	Facility Management
GEOL_BIM	Les effets des mouvements permanents du sol sur les bâtiments, respectivement les possibilités de prévention grâce à l'intégration de données géologiques dans le BIM, sont étudiés en vue d'une application aux dangers naturels dans le cadre du projet GEOL_BIM. Le Service géologique de swisstopo et la haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse (FHNW) sous la direction de l'Association suisse des géologues (CHGEOL) sont responsables de la mise en œuvre du projet Innosuisse GEOL_BIM.
IFC	Industry Foundation Classes
DBM	Maquette numérique
VDC	Virtual Design and Construction
OGN	Optimiser la protection des bâtiments contre les dangers naturels grâce au BIM
PoC	Proof of Concept
SIG	Système d'information géographique
UML	Unified Modelling Language

Voir aussi <http://www.fhnw.ch/vdc-glossary>

## 9 Bibliographie

- Alirezaei, M., Noori, M., Tatari, O., Mackie, K.R., Elgamal, A., 2016. *BIM-based Damage Estimation of Buildings under Earthquake Loading Condition*. Procedia Engineering 145, 1051–1058. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.136>
- OFEV, ASA, AECA, 2018. *Carte de l'aléa ruissellement pour la Suisse - Résumé*.
- buildingSmart International, 2019. *(Draft) IFC Extensions UML Modelling Guidelines - General principles for the authoring & coordination of UML modelling across IFC domains*, buildingSmart International Infrastructure Room.
- buildingSmart International, 2017. Industry Foundation Classes 4.0.2.1 Documentation [WWW Document]. URL [https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/ADD2\\_TC1/HTML/](https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/ADD2_TC1/HTML/) (accessed 7.30.19).
- CEN/TC 442, 2019. *Guideline for the implementation of BIM Execution Plans (BEP) and Exchange Information Requirements (EIR) on European level based on EN ISO 19650-1 and -2 (Working Document)*, TC 442 WI 00442024.
- Hosser, D., 2009. *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes - Technischer Bericht vfdb TB 04-01*, Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB) der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb).
- Kemper, A., Eickler, A., 2015. *Datenbank-Systeme - Eine Einführung*.
- KOGIS, 2011. *Allgemeine Empfehlungen zur Methodik der Definition "minimaler Geodatenmodelle."*
- Migliorini, M., 2018. *The RESCULT Project - Increasing Resilience of Cultural heritage: a supporting decision tool for the safeguarding of cultural assets*.
- OGN, 2021a. *Bericht Prozesse und Prüfregele*, Optimierter Gebäudeschutz vor Naturgefahren mit BIM.
- OGN, 2021b. *Bericht Grundlagendaten und Transformation GIS-BIM*, Optimierter Gebäudeschutz vor Naturgefahren mit BIM.
- OMG, 2017. *OMG Unified Modeling Language Version 2.5.1*, OMG Object Management Group.
- Penn State, A.E., 2019. *BIM Use: Disaster Planning & Management*. [WWW Document]. URL [https://www.bim.psu.edu/disaster\\_planning\\_and\\_management/](https://www.bim.psu.edu/disaster_planning_and_management/) (accessed 4.20.20).
- PLANAT, 2015. *Niveau de sécurité face aux dangers naturels - Documentation. Plate-forme nationale "Dangers naturels" PLANAT, Bern.*, PLANAT, Berne.
- PLANAT, 2012. *Terminologie relative aux dangers naturels. Plate-forme nationale "Dangers naturels" PLANAT, Bern.* 7S.
- Ruf, W., 2019. *Datenmodell Gefahrenkartierung - Identifikator 166.1. Version 1.3.*, BAFU.
- Schildknecht, L., 2020. *IFC-Mapping - UML-Modellierungsrichtlinien*, Optimierter Gebäudeschutz vor Naturgefahren mit BIM.
- Sertyesilisik, B., 2017. *Building Information Modeling as a Tool for Enhancing Disaster Resilience of the Construction Industry*. TRANSACTIONS of the VŠB – Technical University of Ostrava, Safety Engineering Series 12, 9–18. <https://doi.org/10.1515/tvsbses-2017-0002>
- SIA D0260, 2019. *SIA D0260 Intégration des dangers naturels dans la conception et la planification de bâtiments*, Société suisse des ingénieurs et des architectes.
- Treado, S., Vinh, A., Holmberg, D., Galler, M., 2007. *Building Information for Emergency Responders* 6.
- AEAI, 2015. *27-15 Méthodes de preuves en protection incendie*, Association des établissements cantonaux d'assurance incendie.

## Annexe A Modèle de domaine

Le modèle de domaine permet d'introduire et de définir les termes fondamentaux et leur signification. Il sert à créer une base de compréhension commune.

L'illustration 20 suivante reprend les termes centraux et présente leurs interdépendances. Un diagramme des classes UML est utilisé pour la notation et son interprétation correspond à un diagramme d'ontologie. Les différents termes sont expliqués en détail ci-après.

On distingue trois domaines :

- Aléa
- Protection et prévention
- Structure du projet et de l'ouvrage

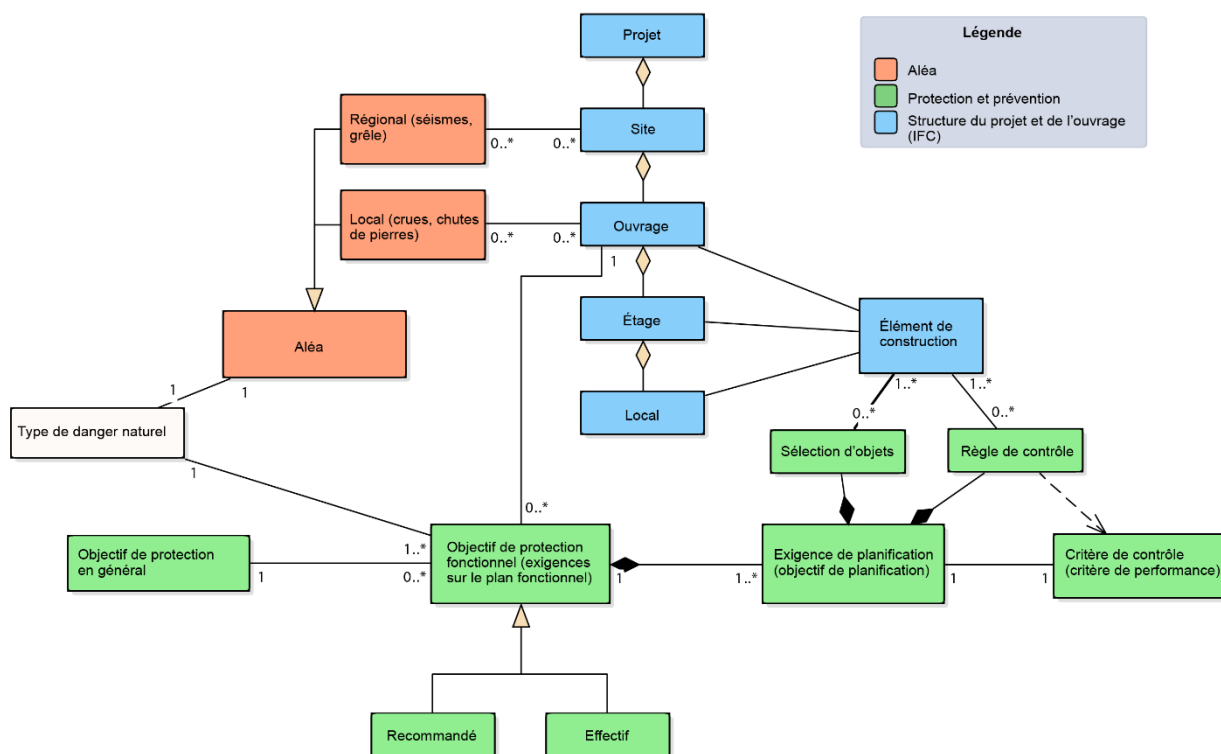


Illustration 20: Modèle de domaine / Diagramme d'ontologie

### Aléa

L'aléa décrit l'effet (physique) provoqué par un danger naturel. L'analyse de l'aléa fait partie de l'analyse du risque selon (SIA D0260, 2019). Pour les dangers naturels, l'aléa (effet) dépend d'une périodicité  $z$  (période de retour).

Selon le type de danger naturel, la zone d'effet d'un aléa peut être estimée dans une résolution spatiale différente. Les conséquences prévisibles uniquement dans une résolution spatiale très imprécise, comme la grêle et les tremblements de terre, sont désignées comme des aléas régionaux.

Les conséquences prévisibles dans une résolution spatiale relativement précise, comme les crues et les chutes de pierres, sont désignées comme des aléas locaux.

La distinction entre aléa régional et aléa local a un effet sur le contexte de l'ouvrage dans lequel l'aléa peut être envisagé. On part de l'hypothèse que les aléas régionaux s'appliquent à l'ensemble du site (attribution de l'aléa au site). À l'inverse, les aléas locaux peuvent avoir

différents impacts au sein d'un site et doivent par conséquent être classés à un niveau plus approfondi (attribution à l'ouvrage).

Terme	Explication
Aléa	L'aléa décrit l'effet (physique) provoqué par un type de danger naturel.
Aléa – régional	Aléa avec seulement une résolution spatiale sommaire (c'est-à-dire l'effet est identique sur une vaste zone).
Aléa – local	Aléa avec une résolution spatiale détaillée (c'est-à-dire l'effet est déjà différent au sein d'une petite zone). Pour un bâtiment, un aléa doit être considéré comme local s'il peut être généralement envisagé dans une résolution spatiale de la taille d'une parcelle (sites).

L'aléa local lié aux dangers naturels gravitationnels est décrit en Suisse sur des « cartes des dangers » cantonales. Ces cartes couvrent en règle générale la zone résidentielle. En dehors du périmètre étudié, des expertises spécialisées sont nécessaires pour définir l'aléa local. Seule une partie des « cartes des dangers » peut aujourd'hui être obtenue et utilisée sous forme standardisée de géodonnées. Des précisions sur l'utilisation de ces bases existantes sont documentées dans le rapport séparé « Données de base sur les aléas ».

Un prototype d'application a été développé dans le cadre de ce projet de recherche, permettant de transformer au format IFC les informations sur les aléas disponibles depuis des géodonnées. Ainsi, les informations sur l'aléa existantes pour un site peuvent être simplement et directement intégrées dans la maquette numérique et y être mises à disposition. Le rapport « Données de base sur les aléas » donne également des précisions à ce sujet.

## Protection et prévention

La détermination des mesures de prévention contre les dangers naturels passe par une cascade de définitions d'objectifs et d'exigences.

- Objectif de protection en général
- Objectif de protection sur le plan fonctionnel
- Exigence en matière de planification (critère de performance inclus)

Terme	Explication
Objectif de protection en général (Bien à protéger)	Intérêts généraux devant être protégés des dangers naturels. Il s'agit normalement ici d'objectifs globaux. <ul style="list-style-type: none"> <li>– Vie et santé (intégrité) des personnes, des animaux</li> <li>– Protection des valeurs matérielles</li> <li>– Protection des marchandises et des moyens de production</li> <li>– Limitation des interruptions de l'exploitation</li> </ul> (Sur la base de (Hosser, 2009)) Décrit <b>pourquoi</b> une protection est nécessaire. <p>Par analogie avec le terme « Objectif de protection en général », il est possible également de considérer depuis le contexte de (PLANAT, 2015) aussi le terme « Bien à protéger ». (PLANAT, 2015) définit les biens à protéger comme des valeurs pour lesquelles le risque doit être limité à un niveau acceptable. Trois catégories essentielles de biens à protéger sont définies : les personnes, les biens d'une valeur notable et l'environnement.</p>

Terme	Explication
Objectif de protection sur le plan fonctionnel	<p><b>Objectifs fonctionnels</b> se reportant à l'ouvrage et nécessaires pour atteindre les objectifs généraux. Décrit <b>ce qui</b> doit être atteint (techniquement). Dans le contexte des dangers naturels, un objectif de protection fonctionnel est normalement défini en fixant une périodicité z pour laquelle l'objectif de protection doit encore être atteint (PLANAT, 2012).</p> <p>L'objectif de protection fonctionnel décrit ce qui doit être atteint (techniquement) tandis que l'objectif de protection général décrit pourquoi quelque chose doit être atteint (Hosser, 2009).</p> <p>Remarque : Le terme « objectif de protection fonctionnel » est utilisé dans (AEAI, 2015). La définition correspond au terme « exigence sur le plan fonctionnel », tel qu'il est utilisé dans (Hosser, 2009). (PLANAT, 2015) parle aussi de niveau de sécurité, en plus des objectifs de protection.</p>
Exigence planification	<p>Exigence de planification afin de pouvoir atteindre un objectif de protection fonctionnel. L'exigence pose un objectif de protection fonctionnel concret de manière à pouvoir évaluer un résultat de planification par rapport à un critère.</p> <p>L'exigence donne une définition des propriétés concrètes de la maquette numérique devant être respectées lors de la planification.</p> <p>Remarque : Dans (AEAI, 2015), on utilise pour cela le terme « objectif de la planification ».</p>
Critère de performance	<p>Valeur visée devant être respectée pour remplir une exigence de la planification.</p> <p>Remarque : terme utilisé dans (AEAI, 2015). Dans le cadre du projet OGN, le critère de performance est compris comme une partie (intégrante) de l'exigence de planification.</p>
Sélection d'objets	<p>Critère filtre pour sélectionner une certaine quantité d'objets. Pour contrôler l'exigence.</p>
Critère de contrôle	<p>Critère pour contrôler si le critère de performance d'une exigence est rempli. Pour contrôler l'exigence. Le critère de contrôle est appliqué seulement sur les objets identifiés avec la sélection d'objets. Le contrôle peut porter sur la forme (information X disponible) ou sur le contenu (résistance à la grêle de l'élément de construction <math>\geq</math> RG3).</p>

Les termes définis ici pour « objectif de protection » vont au-delà de la définition de (SIA D0260, 2019). Dans (SIA D0260, 2019), le terme d'objectif de protection est considéré de manière très générale et aucune distinction explicite n'est établie entre objectifs de protection et exigences.

Le projet OGN développe un cadre de portée générale dans lequel les objectifs de protection envisageables sont définis comme des objectifs abstraits. Dans les différents projets, les périodicités concrètes (période de retour) sont définies par rapport aux objectifs de protection (effectif).

En termes de contenu, les objectifs de protection généraux appliqués dans le cadre du projet OGN reposent sur la norme SIA 261 2014 et SIA 261/1 (version parue en 2020). Ces objectifs de protection sont classés selon la classe d'ouvrage et ils sont ainsi « basés sur le risque » d'une manière pragmatique. Une approche basée sur le risque sous-entend aussi la mise en balance des chances et des risques que représentent les différentes solutions dans le cadre d'un dialogue sur le risque avec le maître d'ouvrage, avec toutes les entités qui assument un risque et, dans l'idéal, avec les futurs exploitants et utilisateurs du bâtiment. La méthodologie

décrite par le GT1 doit soutenir ce processus et par conséquent encourager une réflexion précoce et consciente sur le thème des dangers naturels.

Pour les objectifs de protection fonctionnels, le projet OGN développe les objectifs de planification et les critères de performance avant de les transcrire dans un algorithme de contrôle.

Dans le projet de construction concret, les valeurs concrètes (valeurs cibles) doivent être saisies pour les objectifs de protection (abstrait) prédéfinis et être enregistrées dans la maquette numérique.

### Structure du projet et de l'ouvrage

Les termes utilisés pour la structure du projet et de l'ouvrage reposent sur le modèle conceptuel de données de l'IFC, respectivement sur la pratique courante de modélisation des ouvrages dans le secteur du bâtiment.

Terme	Explication
Projet	Projet de planification, de construction ou aussi d'entretien.
Site	Le site, l'ouvrage, l'étage et le local définissent une structure spatiale typique pour les bâtiments. Ils sont utilisés pour subdiviser un ouvrage de manière hiérarchique en une structure spatiale.
Ouvrage	Voir ci-dessus
Étage	Voir ci-dessus
Local	Voir ci-dessus
Élément de construction	Élément physique ou aussi seulement logique utilisé dans la maquette numérique pour modéliser l'ouvrage. P.ex. : paroi, fenêtre, élément de façade, etc.

## **Annexe B Informations dans les médias et actions de communication**

### Articles dans des revues spécialisées

- Publication dans fmpro service 2020/4 : Das Potenzial von BIM für Fachthemen – am Beispiel Naturgefahren
- Swiss Engineering STZ 2021/3 : Optimierter Schutz vor Naturgefahren mit BIM
- Cadastre, 2021/4 : Le potentiel de la méthode BIM pour la prévention des dangers naturels

### Présentation du projet de recherche OGN à des manifestations

- Swissbau, 17.01.2020 : Présentation dans le cadre de la manifestation « La protection du bâtiment et la méthode BIM »
- Forum FAN, 28.02.2020 : Participation aux posters à l'occasion de la rencontre annuelle des spécialistes des dangers naturels.
- GeoSummit (prévu pour 2020, reporté à 2021) : Présentation du projet dans le bloc thématique GeoBIM.