



Stratégie «Dangers naturels» Suisse

Réalisation du plan d'action PLANAT 2005 - 2008

Projet A 1.1

Guide du concept de risque



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT
Plate-forme nationale «Dangers naturels»
Piattaforma nazionale «Pericoli naturali»
National Platform for Natural Hazards

Rapport final de la 2e phase
Version d'évaluation
Février 2009

Impressum

Mandant

Plate-forme nationale «Dangers naturels» PLANAT
c/o division Prévention des dangers
Office fédéral de l'environnement OFEV
3003 Berne

Téléphone: 031 324 17 81
Fax: 031 324 19 10
planat@bafu.admin.ch www.planat.ch

Gestion du projet (projet général)

Andreas Götz, OFEV, président de PLANAT (Direction)
Gian Reto Bezzola, OFEV, PLANAT
Pierre Ecoffey, ECAB, PLANAT
Willy Eyer, Amt für Wald, Wild und Fischerei Kanton Freiburg, PLANAT
Bruno Hostettler, OFPP, PLANAT
Hans Rudolf Keusen, Geotest AG, PLANAT

Encadrement du projet (projet général)

Thomas Egli, Egli Engineering AG (Direction)
Dörte Aller, Aller Risk Management
Christoph Werner, OFPP
Cornelia Winkler, Glenz, Walther & Winkler AG (encadrement du projet A 1.1)

Direction du projet A 1.1

Michael Bründl, SLF

Suivi externe du projet A 1.1

Monika Frehner, Forstingenieurbüro Sargans
Claudia Guggisberg, ARE
Hans Rudolf Keusen, Geotest AG
Arthur Sandri, OFEV
Christoph Werner, OFPP
Christian Wilhelm, Kanton GR
Cornelia Winkler, Glenz, Walther & Winkler AG

Mandataire du projet A 1.1

WSL Institut pour l'étude de la neige et
des avalanches SLF
Flüelastrasse 11
7260 Davos Dorf

Téléphone: 081 417 01 11
Fax: 081 417 01 10
www.slf.ch

Auteurs du projet A 1.1

Michael Bründl, SLF (Direction)
Dörte Aller, Aller Risk Management
Nicole Bischof, SLF
Blaise Duvernay, OFEV
Thomas Egli, Egli Engineering AG
Giuseppe Franciosi, Geotest AG
André Gauderon, Glenz, Walther & Winkler AG
Niels Holthausen, Ernst Basler und Partner AG
Bernhard Krummenacher, Geotest AG
Hans Merz, Ernst Basler und Partner AG
Hans Romang, SLF
Daniel Rüttimann, Egli Engineering AG
Maja Stucki, Egli Engineering AG
Daniel Tobler, Geotest AG
Cornelia Winkler, Glenz, Walther & Winkler AG
Yvonne Schaub, SLF (Mise en page et rédaction)

Citation (proposition)

Bründl Michael (Ed.) 2009: Guide du concept de risque. Plate-forme nationale « Dangers naturels »
PLANAT, Berne. 416 p.

Avertissement

Reproduction des textes et graphiques autorisée avec mention de la source et copie adressée à la Plate-forme nationale « Dangers naturels » PLANAT.

Table des matières

Introduction	1
Motif du projet	1
Place du présent guide dans la gestion intégrée des risques	1
Le guide dans le contexte d'autres applications	2
Structure du guide	3
Partie A : Présentation générale du concept de risque	
1 But et modèle de base du concept de risque	1
2 Notion de risque et paramètres le décrivant	3
2.1 Notion de risque	3
2.2 Formule du risque	5
2.3 Personnes et objets menacés	5
2.4 Paramètres de risque applicables aux victimes	6
2.4.1 Risque individuel	6
2.4.2 Risque collectif	6
2.4.2.1 Personnes	6
2.4.2.2 Biens matériels	7
3 Analyse des risques	9
3.1 Objectif visé, délimitation et travaux préparatoires	10
3.1.1 Objectif visé	10
3.1.2 Délimitation et description du périmètre d'évaluation	10
3.1.3 Travaux préparatoires	10
3.1.3.1 Acquisition et examen des données de base disponibles	10
3.1.3.2 Organisation du projet et compétences	11
3.2 Analyse des dangers	11
3.2.1 Analyse des événements	11
3.2.2 Analyse des effets	12
3.3 Analyse de l'exposition	13
3.3.1 Identification des objets fixes	14
3.3.2 Identification de personnes et d'objets variables	14
3.3.3 Différenciation de situations d'exposition	15
3.3.4 Evolution du potentiel de dommages	18
3.4 Analyse des conséquences	19

3.4.1	Facteurs de calcul dans l'analyse des conséquences	19
3.4.1.1	Vulnérabilité et fragilité	19
3.4.1.2	Protection des objets	20
3.4.1.3	Probabilité d'occurrence spatiale	20
3.4.1.4	Probabilité de présence	21
3.4.1.5	Combinaison des facteurs	21
3.4.2	Pondération de l'ampleur des dommages (aversion pour le risque)	21
3.4.3	Détermination de l'ampleur directe des dommages	21
3.4.3.1	Ampleur des dommages aux bâtiments	22
3.4.3.2	Ampleur des dommages aux personnes dans des bâtiments	22
3.4.3.3	Ampleur des dommages aux biens matériels fixes le long de routes	23
3.4.3.4	Ampleur des dommages aux personnes le long de routes et sur des remontées mécaniques	24
3.4.3.5	Ampleur des dommages sur des lignes ferroviaires	25
3.4.3.6	Ampleur des dommages à des personnes sur des lignes ferroviaires	30
3.4.3.7	Ampleur des dommages aux lignes et aux conduites	31
3.4.3.8	Ampleur des dommages à l'agriculture, à la forêt et aux espaces verts	32
3.4.3.9	Ampleur totale des dommages directs dans le scénario <i>j</i>	32
3.4.4	Détermination de l'ampleur indirecte des dommages	33
3.4.5	Ampleur totale des dommages pour le scénario <i>j</i>	34
3.5	Estimation et représentation des risques	34
3.5.1	Risques collectifs	34
3.5.2	Risques individuels	37
4	Appréciation des risques et objectifs de protection	39
4.1	Généralités	39
4.2	Objectifs de protection liés aux risques de dommages corporels	40
4.2.1	Approche méthodologique des critères définissant les objectifs de protection	40
4.2.2	Distinction entre catégories de risques	41
4.2.3	Proposition d'objectifs de protection applicables aux personnes	42
4.3	Objectifs de protection relatifs à d'autres genres de dommages	43
4.3.1	Biens matériels	43
4.3.2	Risques spéciaux	44
4.4	Aversion pour le risque	45
4.4.1	Les trois effets de l'aversion pour le risque	45
4.4.1.1	Augmentation qualitative et croissance disproportionnée d'effets négatifs indirects d'événements causant des dommages	45
4.4.1.2	Incertitude croissante dans le pronostic de dommages	46
4.4.1.3	Responsabilité en cas d'événements générant des dommages d'une ampleur extraordinaire	47
4.4.2	Proposition de facteurs d'aversion	47
5	Planification et appréciation des mesures	49
5.1	Objectif	49

5.2	Mesures de protection possibles	50
5.3	Evolution en fonction du temps	51
5.4	Démarche	52
5.5	Détermination de l'efficacité	54
5.6	Détermination des coûts	57
5.7	Combinaisons de mesures optimales	59
5.8	Conclusion	60

Teil B: Anwendung des Risikokonzpts: Prozess Lawine

1	Einleitung	1
1.1	Charakterisierung des Prozesses «Lawine»	1
1.2	Risikoanalyse beim Prozess Lawine	2
1.2.1	Gefahrenanalyse	2
1.2.1.1	Ereignisanalyse	2
1.2.1.2	Wirkungsanalyse	3
1.2.2	Expositionsanalyse	4
1.2.3	Konsequenzenanalyse	4
1.3	Risikobewertung	4
1.4	Massnahmenplanung und Massnahmenbewertung	4
1.4.1	Bestimmen der Wirksamkeit	5
1.4.2	Berechnen der Kosten	5
1.4.3	Ermitteln optimaler Massnahmenkombinationen	5
1.4.4	Bewertung von Massnahmen	6
1.4.5	Weitere Einflussfaktoren	6
2	Fallbeispiel Frauentobel, Landschaft Davos, Kanton Graubünden	9
2.1	Einleitung	9
2.2	Gefahrenanalyse	9
2.2.1	Ereignisanalyse	9
2.2.1.1	Grundlagen	9
2.2.1.2	Anrissgebiete	10
2.2.1.3	Sturzbahn	10
2.2.1.4	Auslaufgebiet	11
2.2.2	Wirkungsanalyse	12
2.2.2.1	Grundlagen	12
2.2.2.2	Bestimmung der Intensitätszonen	12
2.2.2.3	Interpretation der Ergebnisse	13
2.3	Expositionsanalyse	14
2.3.1	Ermittlung der exponierten fixen Objekte	14
2.3.2	Ermittlung der exponierten Personen	14
2.4	Konsequenzenanalyse	17
2.4.1	Darstellung mit Durchschnittswerten	17
2.4.2	Darstellung mit Expositionssituationen	18
2.5	Risikoermittlung	20
2.5.1	Kollektive Risiken	20

2.5.1.1	Darstellung mit Durchschnittswerten	20
2.5.1.2	Darstellung mit Expositionssituationen	20
2.5.2	Individuelle Risiken	22
2.6	Risikobewertung	22
2.6.1	Kollektive Risiken	22
2.6.2	Individuelle Risiken	23
2.7	Mögliche Schutzmassnahmen	23
2.7.1	Technische Massnahmen	24
2.7.1.1	Variante 1: Verbau Gebiete 305, 307, 308	24
2.7.1.2	Variante 2: Verbau Gebiet 308	24
2.7.1.3	Variante 3: Verbau Gebiet 305	24
2.7.2	Raumplanerische Massnahmen	24
2.7.3	Biologische Massnahmen - Schutzwald	25
2.7.4	Organisatorische Massnahmen	25
2.7.4.1	Variante 4: Sperrung und Evakuierung	25
2.7.4.2	Variante 5: Künstliche Lawinenauslösung	25
2.8	Wirksamkeit	25
2.8.1	Variante 2-3: Kombination Variante 2 und Variante 3	25
2.8.2	Variante 4: Sperrung und Evakuierung	26
2.8.3	Variante 5: Künstliche Lawinenauslösung	26
2.9	Kosten	27
2.10	Massnahmenbewertung	27
2.10.1	Bewertung nach Grenzkostenkriterium	27
2.10.2	Bewertung bezüglich Akzeptanz	28
2.11	Weitere Einflussfaktoren	28
2.12	Realisierte Massnahmen	29
3	Fazit	31
4	Richtwerte EconoMe	33

Teil B: Anwendung des Risikokonzepts: Prozess Hochwasser

1	Einleitung	1
1.1	Charakterisierung des Prozesses «Hochwasser»	1
1.2	Risikoanalyse beim Prozess Hochwasser	2
1.2.1	Gefahrenanalyse	3
1.2.1.1	Ereignisanalyse	3
1.2.1.2	Wirkungsanalyse	3
1.2.2	Expositionsanalyse	4
1.2.3	Konsequenzenanalyse	4
1.3	Risikobewertung beim Prozess Hochwasser	5
1.4	Massnahmenplanung und Massnahmenbewertung beim Prozess Hochwasser	5
1.4.1	Bestimmen der Wirksamkeit	6
1.4.2	Berechnen der Kosten	6
1.4.3	Ermitteln optimaler Massnahmenkombinationen	6

1.4.4	Bewertung von Massnahmen	7
1.4.5	Weitere Einflussfaktoren	7
2	Fallbeispiel Lonza, Gemeinden Gampel und Steg, Kanton Wallis	9
2.1	Einleitung	9
2.2	Gefahrenanalyse	10
2.2.1	Grundlagen	10
2.2.2	Ereignisanalyse	10
2.2.2.1	Situation vor jeglichen Massnahmen «VOR»	10
2.2.2.2	Aktuelle Situation «AKTUELL»	11
2.2.3	Wirkungsanalyse	11
2.2.3.1	Situation vor jeglichen Massnahmen «VOR»	11
2.2.3.2	Aktuelle Situation «AKTUELL»	11
2.3	Expositionsanalyse	13
2.3.1	Schadenpotential vor jeglichen Massnahmen «VOR»	14
2.3.2	Schadenpotential Aktuelle Situation «AKTUELL»	14
2.4	Konsequenzenanalyse	14
2.4.1	Situation vor jeglichen Massnahmen «VOR»	14
2.4.2	Aktuelle Situation «AKTUELL»	15
2.5	Risikoermittlung	15
2.6	Risikobewertung	17
2.6.1	Situation vor jeglichen Massnahmen	17
2.6.2	Aktuelle Situation «AKTUELL»	17
2.7	Mögliche Schutzmassnahmen	17
2.8	Wirksamkeit	18
2.9	Kosten	19
2.10	Massnahmenbewertung	20
2.11	Weitere Einflussfaktoren	21
3	Fazit	23
4	Richtwerte EconoMe	25

Teil B: Anwendung des Risikokonzepts: Prozess Murgang

1	Einleitung	1
1.1	Charakterisierung des Prozesses «Murgang»	1
1.2	Risikoanalyse beim Prozess Murgang	2
1.2.1	Gefahrenanalyse	2
1.2.1.1	Ereignisanalyse	2
1.2.1.2	Wirkungsanalyse	3
1.2.2	Expositionsanalyse	3
1.2.3	Konsequenzenanalyse	4
1.3	Risikobewertung beim Prozess Murgang	4
1.4	Massnahmenplanung und Massnahmenbewertung beim Prozess Murgang	4
1.4.1	Bestimmen der Wirksamkeit	4

1.4.2	Berechnen der Kosten	5
1.4.3	Ermitteln optimaler Massnahmenkombinationen	5
1.4.4	Bewertung von Massnahmen	6
1.4.5	Weitere Einflussfaktoren	6
2	Fallbeispiel Chummerbach, Landschaft Davos, Kanton Graubünden	7
2.1	Einleitung	7
2.2	Gefahrenanalyse	7
2.2.1	Ereignisanalyse	7
2.2.1.1	Topographie	7
2.2.1.2	Geologie - Geomorphologie - Vegetation	8
2.2.1.3	Niederschlag	9
2.2.1.4	Ereigniskataster	9
2.2.1.5	Abflussbestimmung	9
2.2.1.6	Feststoffpotential	9
2.2.1.7	Beurteilungsszenarien	10
2.2.2	Wirkungsanalyse	10
2.3	Expositionsanalyse	11
2.3.1	Ermittlung der exponierten fixen Objekte	11
2.3.2	Ermittlung der exponierten Personen in Gebäuden	12
2.3.3	Ermittlung der exponierten Personen auf Verkehrswegen	13
2.3.4	Schadenpotential im Beurteilungsperimeter	13
2.4	Konsequenzenanalyse	13
2.5	Risikoermittlung	14
2.5.1	Kollektive Risiken	14
2.5.2	Individuelle Risiken	14
2.6	Risikobewertung	15
2.6.1	Kollektive Risiken	15
2.6.2	Individuelle Risiken	16
2.7	Mögliche Schutzmassnahmen	16
2.7.1	Raumplanerische Massnahmen	16
2.7.2	Biologische Massnahmen	16
2.7.3	Organisatorische Massnahmen	17
2.7.4	Technische Massnahmen	17
2.7.4.1	Variante 1: Sperrenverbau im Mittellauf	17
2.7.4.2	Variante 2: Längsverbau im Mittellauf	18
2.7.4.3	Variante 3: Geschiebesammler	18
2.7.4.4	Variante 4: Objektschutz	19
2.7.4.5	Variante 5: Geschiebesammler maximal	20
2.8	Wirksamkeit	20
2.8.1	Variante 1: Sperrenverbau im Mittellauf	20
2.8.2	Variante 2: Längsverbau im Mittellauf	21
2.8.3	Variante 3: Geschiebesammler	22
2.8.4	Variante 4: Objektschutz	22
2.8.5	Variante 5: Geschiebesammler maximal	23
2.8.6	Variante 6: Kombination Geschiebesammler und Objektschutz	23

2.9	Kosten	24
2.9.1	Variante 1	24
2.9.2	Variante 2	25
2.9.3	Variante 3	25
2.9.4	Variante 4	26
2.9.5	Variante 5	26
2.9.6	Variante 6	26
2.10	Massnahmenbewertung	27
2.11	Realisierte Massnahmen	28
3	Fazit	29
4	Richtwerte EconoMe	31

Teil B: Anwendung des Risikokonzepts: Prozess Sturz

1	Einleitung	1
1.1	Charakterisierung von Sturzprozessen	1
1.2	Risikoanalyse bei Sturzprozessen	2
1.2.1	Gefahrenanalyse	3
1.2.1.1	Ereignisanalyse	3
1.2.1.2	Wirkungsanalyse	3
1.2.2	Expositionsanalyse	4
1.2.3	Konsequenzenanalyse	5
1.3	Risikobewertung	5
1.4	Massnahmenplanung und Massnahmenbewertung	5
1.4.1	Bestimmen der Wirksamkeit	6
1.4.2	Berechnen der Kosten	6
1.4.3	Ermitteln optimaler Massnahmenkombinationen	6
1.4.4	Bewertung von Massnahmen	7
1.4.5	Weitere Einflussfaktoren	7
2	Fallbeispiel Meiggerli, Gemeinde Saas-Balen, Kanton Wallis	9
2.1	Einleitung	9
2.2	Gefahrenanalyse	9
2.2.1	Ereignisanalyse	9
2.2.2	Wirkungsanalyse	10
2.3	Expositionsanalyse	11
2.3.1	Ermittlung der exponierten fixen Objekte	11
2.3.2	Ermittlung der exponierten Personen	11
2.4	Konsequenzenanalyse	12
2.5	Risikoermittlung	13
2.5.1	Kollektive Risiken	13
2.5.2	Individuelle Risiken	13
2.6	Risikobewertung	13
2.6.1	Kollektive Risiken	13

2.6.2	Individuelle Risiken	14
2.7	Mögliche Schutzmassnahmen	14
2.7.1	Raumplanerische Massnahmen	14
2.7.2	Technische Massnahmen	14
2.7.2.1	Variante A: Langer Schutzdamm	14
2.7.2.2	Variante B: Kurzer Schutzdamm	15
2.7.2.3	Variante C: Ufermauer mit Netz	15
2.7.3	Biologische Massnahmen	15
2.7.4	Organisatorische Massnahmen	16
2.8	Wirksamkeit	16
2.8.1	Variante A	16
2.8.2	Variante B	18
2.8.3	Variante C	19
2.8.4	Variante D	20
2.9	Kosten	21
2.10	Massnahmenbewertung	21
2.11	Weitere Einflussfaktoren	22
2.12	Realisierte Massnahmen	22
3	Fazit	25
4	Richtwerte EconoMe	27

Teil B: Anwendung des Risikokonzepts: Prozess spontane Rutschung

1	Einleitung	1
1.1	Charakterisierung von Rutschprozessen	1
1.1.1	Einteilung der Rutschungen im weiteren Sinne	2
1.1.2	Klassifikation nach der Form der Gleitfläche	3
1.2	Risikoanalyse beim Prozess der spontanen flachgründigen Rutschungen und Hangmuren	4
1.2.1	Gefahrenanalyse	4
1.2.1.1	Ereignisanalyse	4
1.2.1.2	Wirkungsanalyse	4
1.2.2	Expositionsanalyse	6
1.2.3	Konsequenzenanalyse	6
1.3	Risikobewertung	8
1.4	Massnahmenplanung und Massnahmenbewertung	8
1.4.1	Bestimmen der Wirksamkeit	9
1.4.2	Berechnen der Kosten	9
1.4.3	Ermitteln optimaler Massnahmenkombinationen	10
1.4.4	Bewertung von Massnahmen	11
1.4.5	Weitere Einflussfaktoren	11
2	Fallbeispiel Bantigental, Gemeinde Bolligen, Kanton Bern	13
2.1	Einleitung	13

2.2	Gefahrenanalyse	13
2.2.1	Ereignisanalyse	13
2.2.1.1	Grundlagen	13
2.2.1.2	Geländebefunde	13
2.2.1.3	Das Ereignis 2006	15
2.2.1.4	Ereignisszenarien	15
2.2.2	Wirkungsanalyse	15
2.2.2.1	Grundlagen	15
2.2.2.2	Intensitätskarten	15
2.3	Expositionsanalyse	16
2.3.1	Ermittlung der exponierten fixen Objekte	16
2.3.2	Ermittlung der exponierten Personen	17
2.4	Konsequenzenanalyse	17
2.5	Risikoermittlung	17
2.5.1	Kollektive Risiken	17
2.5.2	Individuelle Risiken	18
2.6	Risikobewertung	18
2.6.1	Kollektive Risiken	18
2.6.2	Individuelle Risiken	18
2.7	Mögliche Schutzmassnahmen	19
2.7.1	Raumplanerische Massnahmen	19
2.7.2	Biologische Massnahmen	19
2.7.3	Organisatorische Massnahmen	19
2.7.4	Technische Massnahmen	19
2.8	Wirksamkeit	20
2.8.1	Konsequenzenanalyse nach Massnahmen	20
2.8.2	Risikoermittlung nach Massnahmen	20
2.9	Kosten	21
2.10	Massnahmenbewertung	21
2.11	Realisierte Massnahmen	21
2.12	Weitere Einflussfaktoren	21
3	Fazit	23
4	Richtwerte EconoMe	25

Teil B: Anwendung des Risikokonzepts: Prozess permanente Rutschung

1	Einleitung	1
1.1	Charakterisierung der Prozesse der permanenten, tiefgründigen Rutschungen . . .	1
1.2	Risikoanalyse beim Prozess der permanenten, tiefgründigen Rutschungen	4
1.2.1	Gefahrenanalyse	4
1.2.1.1	Ereignisanalyse	4
1.2.1.2	Wirkungsanalyse	5
1.2.2	Expositionsanalyse	8
1.2.3	Konsequenzenanalyse	8

1.3	Risikobewertung	8
1.4	Massnahmenplanung und Massnahmenbewertung	9
1.4.1	Bestimmen der Wirksamkeit	10
1.4.2	Berechnen der Kosten	10
1.4.3	Ermitteln optimaler Massnahmenkombinationen	11
1.4.4	Bewertung von Massnahmen	11
1.4.5	Weitere Einflussfaktoren	12
2	Fallbeispiel Ollon-Villars, Gemeinde Villars, Kanton Waadt	13
2.1	Einleitung	13
2.2	Gefahrenanalyse	13
2.2.1	Grundlagen	13
2.2.2	Geländebefunde	14
2.2.3	Ereignisanalyse und -szenarien	15
2.2.4	Wirkungsanalyse	15
2.2.4.1	Grundlagen	15
2.2.4.2	Intensitätskarten	15
2.3	Expositionsanalyse	16
2.3.1	Ermittlung der exponierten fixen Objekte	16
2.3.2	Ermittlung der exponierten Personen	16
2.4	Konsequenzenanalyse	17
2.5	Risikoermittlung	17
2.5.1	Kollektive Risiken	17
2.5.2	Individuelle Risiken	17
2.6	Risikobewertung	17
2.6.1	Kollektive Risiken	17
2.6.2	Individuelle Risiken	18
2.7	Mögliche Schutzmassnahmen	18
2.8	Wirksamkeit	18
2.9	Kosten	19
2.10	Massnahmenbewertung	19
2.11	Weitere Einflussfaktoren	19
3	Fazit	21
4	Richtwerte EconoMe	23

Teil B: Anwendung des Risikokonzpts: Prozess Erdbeben

1	Einleitung	1
1.1	Charakterisierung des Prozesses Erdbeben	1
1.2	Risikoanalyse beim Prozess Erdbeben	6
1.2.1	Gefahrenanalyse	6
1.2.1.1	Ereignisanalyse	6
1.2.1.2	Wirkungsanalyse	7
1.2.2	Expositionsanalyse	14

1.2.3	Konsequenzenanalyse	14
1.2.4	Risikoermittlung	17
1.3	Risikobewertung	18
1.4	Massnahmenplanung und Massnahmenbewertung	18
1.4.1	Mögliche Schutzmassnahmen	18
1.4.1.1	Raumplanerische Massnahmen	18
1.4.1.2	Organisatorische Massnahmen	19
1.4.1.3	Technische Massnahmen	19
1.4.2	Bestimmen der Wirksamkeit	19
1.4.3	Berechnen der Kosten	20
1.4.4	Ermitteln optimaler Massnahmenkombinationen	20
1.4.5	Bewertung von Massnahmen	20
2	Risikobasierte Beurteilung von bestehenden Gebäuden gemäss Merkblatt SIA 2018	21
3	Anwendungsbeispiel des Merkblattes SIA 2018	27
3.1	Risikoermittlung und Risikobewertung	28
3.2	Massnahmenkonzept und Massnahmenbewertung	28
4	Fazit	31

Teil B: Anwendung des Risikokonzepts: Prozess Sturm

1	Einleitung	1
1.1	Charakterisierung des Prozesses Sturm	1
1.2	Risikoanalyse beim Prozess Sturm	2
1.2.1	Gefahrenanalyse	2
1.2.1.1	Ereignisanalyse	2
1.2.1.2	Wirkungsanalyse	4
1.2.2	Expositionsanalyse	8
1.2.3	Konsequenzenanalyse	9
1.3	Risikobewertung	11
1.4	Massnahmenplanung und Massnahmenbewertung	11
1.4.1	Mögliche Massnahmen	11
1.4.1.1	Verstärkungsmassnahmen	11
1.4.1.2	Abschirmungen	12
1.4.2	Bestimmen der Wirksamkeit	12
1.4.3	Berechnen der Kosten	12
1.4.4	Ermitteln optimaler Massnahmenkombinationen	12
1.4.5	Bewertung von Massnahmen	13
2	Fallbeispiel Sturmauswirkungen auf Industriebetrieb im Mittelland	15
2.1	Einleitung	15
2.2	Gefahrenanalyse	15
2.2.1	Ereignisanalyse	15
2.2.2	Wirkungsanalyse	15

2.3	Expositionsanalyse	16
2.3.1	Ermittlung der exponierten fixen Objekte	16
2.3.2	Ermittlung der exponierten Personen	16
2.4	Konsequenzenanalyse	16
2.5	Risikoermittlung	17
2.5.1	Kollektive Risiken	17
2.5.2	Individuelle Risiken	17
2.6	Risikobewertung	18
2.6.1	Kollektive Risiken	18
2.6.2	Individuelle Risiken	18
2.7	Mögliche Schutzmassnahmen	18
2.8	Wirksamkeit	18
2.9	Kosten	18
2.10	Massnahmenbewertung	19
3	Fazit	21

Teil B: Anwendung des Risikokonzepts: Prozess Hagel

1	Einleitung	1
1.1	Charakterisierung des Prozesses Hagel	1
1.2	Risikoanalyse beim Prozess Hagel	2
1.2.1	Einleitung	2
1.2.2	Gefahrenanalyse	2
1.2.2.1	Ereignisanalyse	2
1.2.2.2	Wirkungsanalyse	3
1.2.3	Expositionsanalyse	6
1.2.4	Konsequenzenanalyse	6
1.2.4.1	Grundlagen für die Empfindlichkeit von Gebäudehüllen	7
1.2.4.2	Schadenausmass von Gebäudehüllen	7
1.2.4.3	Schadenausmass für Sachwerte auf Parkplätzen und Verkehrsachsen (Autos)	7
1.2.4.4	Schadenausmass Landwirtschaft	8
1.3	Risikoermittlung	9
1.4	Risikobewertung	9
1.5	Massnahmenplanung und Massnahmenbewertung	9
1.5.1	Mögliche Schutzmassnahmen bei Gebäuden	9
1.5.1.1	Verstärkung	9
1.5.1.2	Abschirmung	10
1.5.1.3	Organisatorische Massnahmen (Wegstellen)	10
1.5.2	Mögliche Schutzmassnahmen in der Landwirtschaft	10
1.5.2.1	Abschirmung	10
1.5.2.2	Hagelabwehr	10
1.5.3	Mögliche Schutzmassnahmen bei Autos	10
1.5.3.1	Abschirmung	10
1.5.3.2	Organisatorische Massnahme	11

1.5.4	Bestimmen der Wirksamkeit	11
1.5.5	Berechnen der Kosten	11
1.5.6	Ermitteln optimaler Massnahmenkombinationen	11
1.5.7	Bewertung von Massnahmen	12
2	Fallbeispiel Hagelgefährdung eines Sportzentrums in Luzern	13
2.1	Einleitung	13
2.2	Gefahrenanalyse	13
2.2.1	Ereignisanalyse	13
2.2.2	Wirkungsanalyse	13
2.3	Expositionsanalyse	14
2.4	Konsequenzenanalyse	14
2.4.1	Dachflächen Faserzement	14
2.4.2	Fassade gewellter GFK-UP	14
2.4.3	Fassade Glasfenster	15
2.5	Risikoermittlung	15
2.6	Risikobewertung	15
2.7	Mögliche Schutzmassnahmen	16
2.8	Wirksamkeit	16
2.9	Kosten	16
2.10	Massnahmenbewertung	17
3	Fazit	19

Teil B: Anwendung des Risikokonzepts: Hitzewelle

1	Einleitung	1
1.1	Charakterisierung des Prozesses Hitzewelle	1
1.2	Risikoanalyse beim Prozess Hitzewelle	2
1.2.1	Einleitung	2
1.2.2	Gefahrenanalyse	2
1.2.2.1	Ereignisanalyse	3
1.2.2.2	Wirkungsanalyse	3
1.2.3	Expositionsanalyse	6
1.2.4	Konsequenzenanalyse	8
1.2.5	Risikoermittlung	8
1.3	Risikobewertung	8
1.3.1	Individuelle Risiken	8
1.3.2	Kollektive Risiken	8
1.4	Massnahmenplanung und Massnahmenbewertung	9
1.4.1	Mögliche Schutzmassnahmen	9
1.4.1.1	Verhalten / Organisation	9
1.4.1.2	Bauliche Massnahmen an Gebäuden und Nutzungsverhalten in Gebäuden	9
1.4.2	Bestimmen der Wirksamkeit	10
1.4.3	Berechnen der Kosten	11

1.4.4	Ermitteln optimaler Massnahmenkombinationen	11
1.4.5	Bewertung von Massnahmen	11
2	Fallbeispiel Altersheim Bern	13
2.1	Einleitung	13
2.2	Gefahrenanalyse	13
2.2.1	Ereignisanalyse	13
2.2.2	Wirkungsanalyse	14
2.3	Expositionsanalyse	14
2.3.1	Ermittlung der fixen Objekte	14
2.3.2	Ermittlung der exponierten Personen	14
2.4	Konsequenzenanalyse	15
2.5	Risikoermittlung	16
2.5.1	Kollektive Risiken	16
2.5.2	Individuelle Risiken	16
2.6	Risikobewertung	16
2.6.1	Kollektive Risiken	16
2.6.2	Individuelle Risiken	17
2.7	Mögliche Schutzmassnahmen	17
2.7.1	Raumplanerische Massnahmen	17
2.7.2	Biologische Massnahmen	17
2.7.3	Organisatorische Massnahmen	17
2.7.4	Technische Massnahmen	17
2.7.4.1	Massnahme 1: Einbau von Klappenöffnungen für die Nachtauskühlung	18
2.7.4.2	Massnahme 2: Dach- und Wandisolation des Gebäudes	18
2.8	Wirksamkeit	18
2.8.1	Wirksamkeit Massnahme 1	18
2.8.2	Wirksamkeit Massnahme 2	19
2.9	Kosten	19
2.10	Massnahmenbewertung	20
2.11	Realisierte Massnahmen	21
3	Fazit	23

Literaturverzeichnis

Glossar

Avant-propos

Suite à la motion Danioth (1999), le Conseil fédéral a chargé la Plate-forme nationale «Dangers naturels» PLANAT d'élaborer une stratégie globale et interdisciplinaire en vue d'améliorer la sécurité contre les événements naturels. Le Conseil fédéral a insisté sur le fait que la protection contre les dangers naturels devait être assurée, non seulement pour les populations de l'espace alpin, mais également pour celles de l'ensemble de la Suisse. De plus, il a émis la volonté de mettre en place un standard de sécurité comparable dans l'ensemble du pays, dans l'optique d'une gestion globale des risques. Le but est ici de protéger l'être humain et son milieu de vie naturel, ainsi que les biens matériels importants.

Jusqu'à présent, dans une première étape, PLANAT a élaboré une stratégie générale et interdisciplinaire axée sur la sécurité contre les dangers naturels¹. Cette stratégie répond à la politique de développement durable poursuivie par le Conseil fédéral et aux principes de l'uniformisation de la philosophie de sécurité inscrits dans la stratégie du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC). Dans une deuxième étape, PLANAT a analysé la situation actuelle des dangers naturels² et proposé un plan d'action réunissant des mesures, dont la mise en application, entre 2005 et 2008, constitue une troisième étape.

Le présent rapport rend compte des résultats du projet A1.1 «Concept de risque appliqué aux dangers naturels» réalisé dans le cadre du plan d'action 2005 - 2008.

Andreas Götz
Président de PLANAT

Ittigen, février 2009

¹ PLANAT (2004) : Sicherheit vor Naturgefahren - Vision und Strategie.

² PLANAT (2005) : Stratégie «Dangers naturels en Suisse» (2005). Rapport de synthèse.

Résumé

Le présent guide expose et commente l'application du concept de risque aux processus naturels survenant en Suisse. Il sera amené à servir d'ouvrage de référence dans les procédures de planification et d'évaluation des mesures fondées sur les risques dans le contexte de la gestion intégrée de ces derniers. Ce rapport est composé d'une partie introductive, suivie d'une partie A et d'une partie B. La partie A présente le concept de risque dans son acception générale, tous processus confondus. La partie B commente l'application du concept aux différents processus – avalanches, crues, laves torrentielles, éboulements, glissements de terrain spontanés et permanents, séismes, tempêtes, grêle et canicules – à l'aide d'un exemple concret pour chaque cas de figure.

Le rapport de synthèse PLANAT publié en 2005 constitue le socle de la présentation générale du concept de risque dans la partie A. C'est sur en vertu des principes formulés dans ce rapport de synthèse que sont expliquées et exposées l'analyse et l'évaluation des risques ainsi que la planification intégrée des mesures et l'évaluation de celles-ci. La connaissance et la compréhension des éléments fondamentaux présentés dans la partie A sont nécessaires pour pouvoir retracer leur application dans les cas de figure. Les renvois croisés entre les textes correspondants des parties A et B, ainsi qu'une structure quasiment similaire de ces deux parties facilitent la compréhension.

Un objectif essentiel du guide consistait à montrer si le concept de risque formulé dans la stratégie PLANAT admettait une application pratique. En résumé, on peut répondre par un «oui» de principe à cette question, même s'il demeure parfois des différences notables d'un processus à l'autre. Déterminer les risques consécutifs à des événements naturels nécessite la formulation d'un nombre non négligeable d'hypothèses, qui, dans la plupart des cas, reposent sur des bases relativement floues. Les formules mathématiques proposées dans ce guide élaboré à partir des connaissances actuelles permettent toutefois d'ébaucher un mode opératoire uniforme en dépit des incertitudes existantes.

Composer avec des incertitudes fait partie intégrante du concept de risque. Mais celui-ci est avant tout un moyen de faire une évaluation quantitative de ces incertitudes et d'en faire une présentation transparente. Les résultats d'une analyse de risque ne doivent donc jamais être interprétés comme «justes» ou «faux»; ils sont plutôt le reflet d'une estimation des dommages probables compte tenu des hypothèses considérées. Il est capital d'avoir une excellente connaissance d'un processus pour pouvoir en apprécier les incertitudes. Réduire ces dernières à un minimum dans l'analyse des risques exigera, ces prochaines années, de poursuivre les efforts afin de mieux fonder l'élaboration de scénarios et les paramètres initiaux de l'équation des risques. En outre, il faudra entreprendre de nouveaux travaux, en particulier en ce qui concerne les tempêtes, la grêle et les canicules.

L'appréciation des risques reflète indirectement l'échelle des valeurs que la société leur attribue. Le présent guide reprend les propositions tirées de la stratégie PLANAT, et les complète compte tenu des travaux en cours et des connaissances récemment acquises ; cela en parfaite connaissance du fait que les objectifs de protection formulés pour l'individu et la société sont une photographie. Les valeurs exprimées, qui en sont à la base, doivent donc être périodiquement examinées et, le cas échéant, pourront nécessiter d'adapter ultérieurement les critères décisionnels inhérents au concept de risque.

La planification des mesures dans une vision intégrée et l'appréciation économique de combinaisons de mesures sont un grand défi pour les artisans de leur réalisation pratique. D'une part, il est très délicat d'évaluer l'efficacité de mesures isolées dans l'optique d'une réduction des risques ; d'autre part, une planification intégrée des mesures (toutes les mesures disponibles et judicieuses peuvent être combinées entre elles) quitte le modèle de pensée rodé durant les années et les décennies passées. Dans la pratique, il est usuel de ficeler des paquets de mesures complets et d'en évaluer l'efficacité (des coûts) dans leur globalité plutôt que dans le détail. L'évaluation de l'efficacité des coûts de paquets de mesures débouche souvent sur une solution économiquement non optimale, et ne tient pas compte de l'optimisation de l'allocation des moyens financiers demandée par la stratégie PLANAT. Dans les différents cas de figure, on a tenté d'apprécier les mesures à l'aide du critère des coûts marginaux. Force est cependant de constater que ce mode de faire nécessite encore de rassembler quelques expériences.

Enfin, quelques remarques s'imposent quant aux coûts. Une planification des mesures détaillée, axée sur les risques, telle qu'elle est exposée dans ce guide, peut générer pour bien des objets des coûts à ne pas sous-estimer. Quel travail faut-il mettre en action pour quel problème de sécurité ? Cette question doit toujours être débattue, et seule l'entente avec les mandants considérés peut y répondre. Etant donné que l'établissement de cartes d'intensité intégrant chacune des mesures ou des combinaisons de mesures considérées est un travail très conséquent, il faut obligatoirement fixer avec les mandants, dans le contexte d'une planification intégrée des mesures, les options qui devront être prises en compte dans les analyses. Dans de nombreux cas, le travail supplémentaire nécessité par une étude approfondie de variantes et par le choix d'une solution économiquement optimale selon le critère des coûts marginaux devrait mettre en évidence, en quelques années, la plus-value que représente une «meilleure solution» par rapport à une «moins bonne solution».

Il n'a pas été possible, dans le cadre de ce projet, d'apporter la preuve entière et absolue qu'il faille renforcer la planification. En revanche, ce guide constitue la base à partir de laquelle il sera possible de glaner de nouvelles expériences ces prochaines années.

Introduction

Motif du projet

Le présent guide est le résultat du projet A1.1 «Guide du concept de risque» réalisé dans le cadre du plan d'action PLANAT «Dangers naturels» Suisse dans les années 2006 à 2008³. Le plan d'action PLANAT 2005-2008 a poursuivi les efforts visant à développer une stratégie d'approche des dangers naturels qui avait été initiée par la motion Danioth dans le sillage des catastrophes naturelles de 1999. Ce projet et d'autres projets du plan d'action tentaient de combler les lacunes identifiées dans la stratégie.

Le présent guide est d'abord axé sur l'évaluation de l'aspect sécurité. D'autres aspects prépondérants, telles la réceptivité sociale, la faisabilité politique ou la compatibilité écologique, peuvent entrer plus ou moins fortement en ligne de compte dans la planification des mesures. La transparence de leur prise en considération requiert de faire appel à des méthodes et à des critères d'évaluation spécifiquement liés à ces autres aspects (p. ex. la protection de la nature).

L'objectif d'une appréciation uniforme des risques naturels réside plus particulièrement dans la volonté d'assurer la possibilité de comparer différentes évaluations. En l'état actuel des connaissances, les hypothèses nécessaires peuvent diverger d'un expert à l'autre. Ainsi, des bases d'évaluation telles que le présent guide servent aussi à harmoniser l'approche des incertitudes.

Place du présent guide dans la gestion intégrée des risques

La stratégie PLANAT et le concept de risque à la base du guide reposent sur l'idée de la gestion intégrée des risques. Celle-ci englobe un concept de gestion systématique des risques, lesquels doivent être identifiés, évalués à l'aide de critères reconnus et éprouvés, puis réduits à l'aide d'une combinaison optimale de mesures techniques, biologiques, organisationnelles et relevant de l'aménagement. La gestion intégrée des risques vise à mettre sur un pied d'égalité la prévention, l'intervention et la remise en état.

L'aménagement du territoire, en tant qu'élément de la gestion intégrée des risques, joue un rôle capital dans ce contexte. Par l'intermédiaire des plans directeurs, des plans d'affectation et des procédures d'autorisation de construire, il vise à assurer une utilisation appropriée du sol, qui tienne compte des zones dangereuses. Il ainsi contribue à réduire les risques existants et à en éviter de nouveaux [1]. L'aménagement du territoire constitue donc une mesure importante dans

³Nous remercions Walter Ammann et Thomas Schneider pour les discussions constructives d'avant-projet.

l'approche des dangers naturels, à la base de toutes les autres mesures, ce que prescrivent au demeurant la loi et l'ordonnance sur les forêts, de même que la loi sur l'aménagement des cours d'eau et son ordonnance.

A priori, le présent guide peut être utilisé pour tous les problèmes de sécurité liés aux dangers naturels. Cependant, ses premières applications devraient se situer là où l'on soupçonne des risques élevés en dépit de mesures d'aménagement du territoire, et lorsqu'il y a lieu d'analyser si ces risques peuvent être réduits grâce à l'engagement opportun de moyens financiers. Le guide cible surtout les situations dans lesquelles la protection actuelle est lacunaire. Cela signifie que les mesures prioritaires de réduction des risques sont d'ordre organisationnel, biologique et technique, et qu'elles doivent pouvoir être mises en œuvre de manière proactive et dans des délais relativement courts. Les mesures relevant de l'aménagement du territoire ont surtout une place importante dans l'optique des changements d'affectation ou des déplacements de personnes.

En plus de ce guide, d'autres instruments ont été élaborés ces dernières années en vue de structurer l'approche des risques liés aux dangers naturels. Afin de mieux comprendre ce que doit être ce guide et l'objectif qu'il poursuit, le chapitre ci-après propose un tour d'horizon des autres instruments décisionnels.

Le guide dans le contexte d'autres applications

Selon le but poursuivi, différentes approches permettent d'apprécier les risques, et cela, à divers degrés de précision. Hormis les données initiales disponibles en quantités et qualités variables, l'expérience et les connaissances de celui qui les réalise et l'utilisation des résultats de l'analyse jouent un rôle important. Enfin, la sensibilisation des autorités, des experts et de la population aux possibilités et aux limites de l'application du concept de risque revêt une importance à ne pas sous-estimer.

C'est dans ce contexte, composé de différents objectifs et de différentes attentes, que plusieurs instruments d'analyse et d'évaluation des risques mais aussi de planification et d'appréciation de mesures ont été développés ces dernières années.

RiskPlan2 : RiskPlan 2 online est le successeur du logiciel RiskPlan, un outil de calcul et de gestion servant à évaluer des risques dans des zones d'impact définies, et à déterminer l'efficacité des coûts de mesures de protection. RiskPlan 2 permet d'étudier plusieurs objets surfaciques et plusieurs phénomènes dangereux afin d'obtenir une vue d'ensemble régionale des risques en présence. La base de données destinée à déterminer l'ampleur des dommages repose sur des estimations. De ce fait, RiskPlan 2 a plutôt un caractère général, et il n'est pas prévu de l'utiliser pour des analyses de risques fouillées. Outre les risques liés aux dangers naturels, cet instrument convient aussi à l'étude de risques techniques et sociétaux. On peut accéder à RiskPlan 2 via le lien www.riskplan.admin.ch.

EconoMe : EconoMe est un outil de calcul en ligne conçu pour déterminer l'efficacité des coûts de projets isolés. Il soutient en premier lieu l'évaluation de projets et l'attribution de moyens financiers par les autorités de subventionnement. EconoMe permet d'effectuer une analyse des risques basée sur des valeurs moyennes et des hypothèses simplifiées, ainsi qu'une

évaluation du rapport coût-utilité. On peut accéder à EconoMe par le lien www.econome.admin.ch.

RIKO : Le concept présenté dans RIKO est la documentation et la base méthodologique des deux outils informatiques évoqués ci-dessus. Le présent guide tente de mettre en place les bases nécessaires à une planification des mesures axée sur les risques et comportant plusieurs étapes – à savoir l’analyse des risques, l’appréciation des risques et la planification des mesures – qui soient les plus détaillées possible dans l’optique des dangers naturels usuels en Suisse. Le niveau le plus détaillé exige que les objets soient évalués individuellement. Néanmoins, en l’absence de données de base, les hypothèses simplifiées formulées dans EconoMe quant à la vulnérabilité, à la létalité de personnes et à la probabilité d’occurrence spatiale peuvent être utilisées dans le présent guide en première approximation.

L’application est présentée en priorité pour les crues, les avalanches, les laves torrentielles, les glissements de terrain spontanés et permanents ainsi que les éboulements. En second lieu des considérations sont faites à propos de la manière dont le concept de risque peut aussi être appliqué à d’autres processus tels que tremblements de terre, tempêtes, grêle ou canicules. Le guide s’adresse aux spécialistes des dangers naturels opérant dans l’économie privée ainsi qu’aux organes décisionnels aux échelons communal, cantonal et fédéral. Son application présuppose une connaissance technique solide dans le domaine des dangers naturels.

Le guide «Concept de risque» a des interfaces avec plusieurs autres projets inscrits dans le plan d’action PLANAT 2005 - 2008. La figure 1 en donne un aperçu.

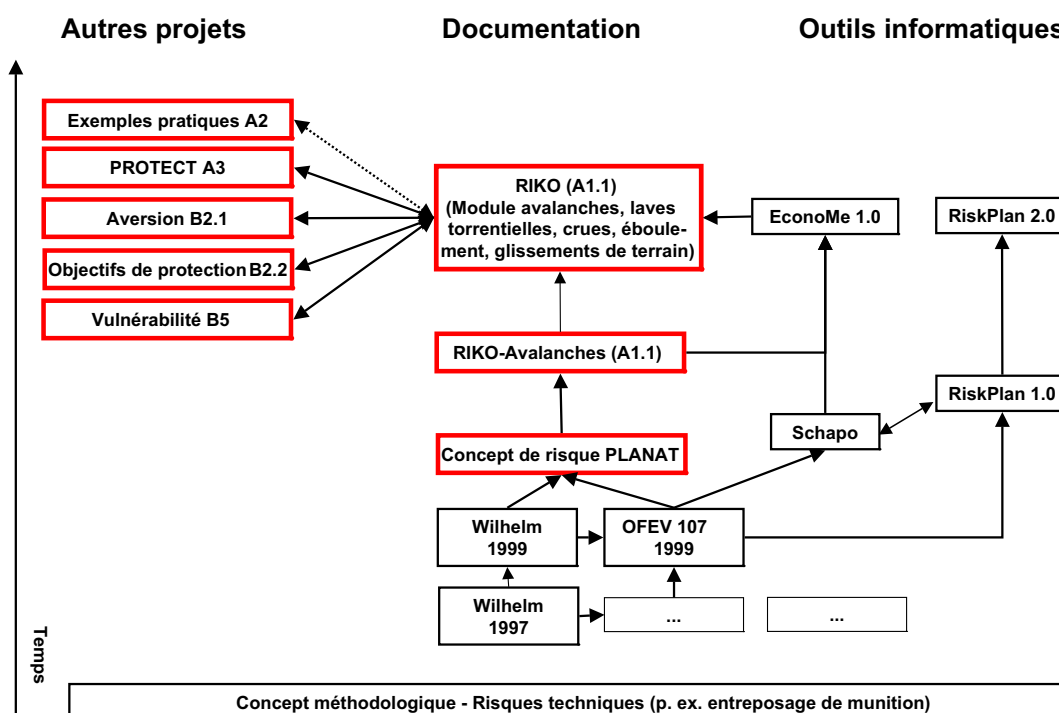


FIG. 1: Projets achevés et en cours ayant une interface avec le guide «Concept de risque»

Structure du guide

Le présent guide est construit en deux parties :

Partie A. La partie A expose les idées fondamentales du concept de risque, en vertu desquelles tous les dangers naturels doivent être évalués. Pour tous les processus, la démarche est subdivisée en une analyse des risques et une appréciation des risques ; les conditions préliminaires et la démarche sont décrites tant pour la planification des mesures que pour leur évaluation. Cette partie forme ainsi le socle indispensable pour comprendre l'application concrète du concept de risque.

Partie B. La partie B explique, à l'aide de cas de figure spécifiques aux différents processus (avalanches, crues, laves torrentielles, éboulements et glissements de terrain), comment le concept de risque doit être appliqué. Par ailleurs, cette partie montre également comment appliquer ce concept aux tempêtes, à la grêle, aux températures extrêmes et aux tremblements de terre. Les chapitres correspondants de la partie B sont des entités en soi, mais présupposent néanmoins la connaissance et la compréhension des considérations de la partie A. Les hypothèses et les paramètres nécessaires à une analyse des risques et à une planification des mesures sont toujours exposés dans les différents chapitres décrivant les processus correspondants de la partie B.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

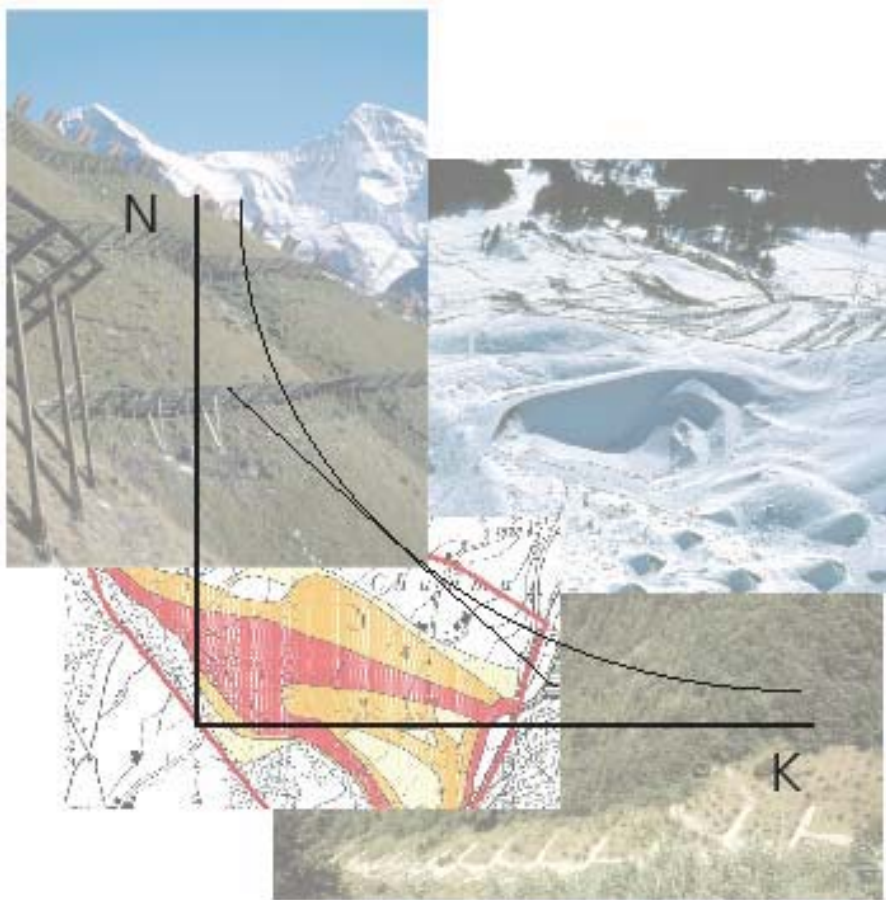
Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT
Plate-forme nationale «Dangers naturels»
Piattaforma nazionale «Pericoli naturali»
National Platform for Natural Hazards

Guide du concept de risque

PARTIE A:

PRESENTATION GENERALE DU CONCEPT DE RISQUE

Michael Bründl, Hans Romang, Niels Holthausen, Hans Merz, Nicole Bischof



Ce rapport partiel fait partie intégrante du rapport global, composé de :

Partie A: Présentation générale du concept de risque

Partie B: Application du concept de risque

Processus avalanche

Processus crue

Processus lave torrentielle

Processus éboulement

Processus glissement de terrain spontané

Processus glissement de terrain permanent

Processus tremblement de terre

Processus tempête

Processus grêle

Processus vague de chaleur

Chapitre 1

But et modèle de base du concept de risque

Le concept de risque est un modèle destiné à analyser et à évaluer des problèmes de sécurité complexes et à planifier en détail les mesures qui en résultent. Comme tous les modèles, il ne reflète que partiellement la réalité. En ce sens, il représente une convention permettant une approche uniforme et, partant, comparable des problèmes de sécurité, au sens d'une culture du risque enracinée dans le vécu.

Par concept de risque, on entend une approche méthodologique de portée universelle, qui structure les procédures dans l'appréciation des problèmes de sécurité. Cette procédure de planification de la sécurité axée sur les risques comporte plusieurs étapes : analyse et appréciation des risques, ainsi que planification et appréciation des mesures.

Le concept de risque trouve son origine dans le domaine technique. Dans les années 60, on a commencé à devoir de plus en plus fréquemment évaluer la sécurité de systèmes techniques très complexes. Le concept de risque servait surtout à cerner qualitativement et, dans la mesure du possible, quantitativement les interactions complexes au stade de la planification de tels systèmes. A partir de là, on a tiré des indications sur la sécurité de tels systèmes, respectivement sur l'acceptabilité des risques qui en découlaient, et démontré l'opportunité et la fiabilité des concepts de sécurité. Dans cette mouvance, on a aussi utilisé de plus en plus souvent ce concept de risque pour apprécier l'effectivité et l'efficacité de tels concepts.

Aujourd'hui, le concept de risque est un instrument qui permet de faire une présentation transparente de procédures au sein d'un réseau complexe de spécialistes, d'institutions et de partenaires, et de justifier de manière tout à fait claire les dépenses de sécurité.

Le concept de gestion des risques liés aux dangers naturels forme une grille générale de discernement applicable à l'évaluation de la sécurité dans les champs d'application les plus divers. Il permet donc aussi des échanges d'expériences et, dans une certaine mesure, de comparer les risques dus aux dangers naturels et les risques spécifiques à d'autres domaines.

L'idée fondamentale du concept de risque comporte trois volets qui résultent de trois questions : «Que peut-il se passer?», «Que peut-on accepter?» et «Que faut-il faire?». Répondre à ces questions implique d'accomplir les étapes suivantes :

Analyse des risques : l'analyse des risques comporte l'analyse des dangers, l'analyse de l'exposition, l'analyse des conséquences et la détermination proprement dite des risques. A l'aide de scénarios bien définis, elle détermine les facteurs et les circonstances qui contribuent au risque global. Si elle tient compte des mesures de sécurité déjà en place, alors l'analyse des risques sert aussi à évaluer leur efficacité.

Appréciation des risques : l'appréciation des risques sert à savoir si les risques identifiés se situent au-dessus ou au-dessous de critères d'appréciation définis (objectifs de protection), et si la protection présente des lacunes. L'examen des objectifs de protection fixés pour des risques collectifs ne peut se faire qu'après une planification des mesures.

Planification intégrée des mesures : la planification intégrée des mesures intervient lorsque les risques sont trop élevés. Elle précise les mesures et les moyens qui permettent de réduire les risques et le train de mesures optimal pour atteindre les objectifs de protection.

La systématique du processus d'analyse des risques est présentée à la figure 1.1. Les notions et les termes utilisés dans les pages qui suivent sont expliqués dans le glossaire.

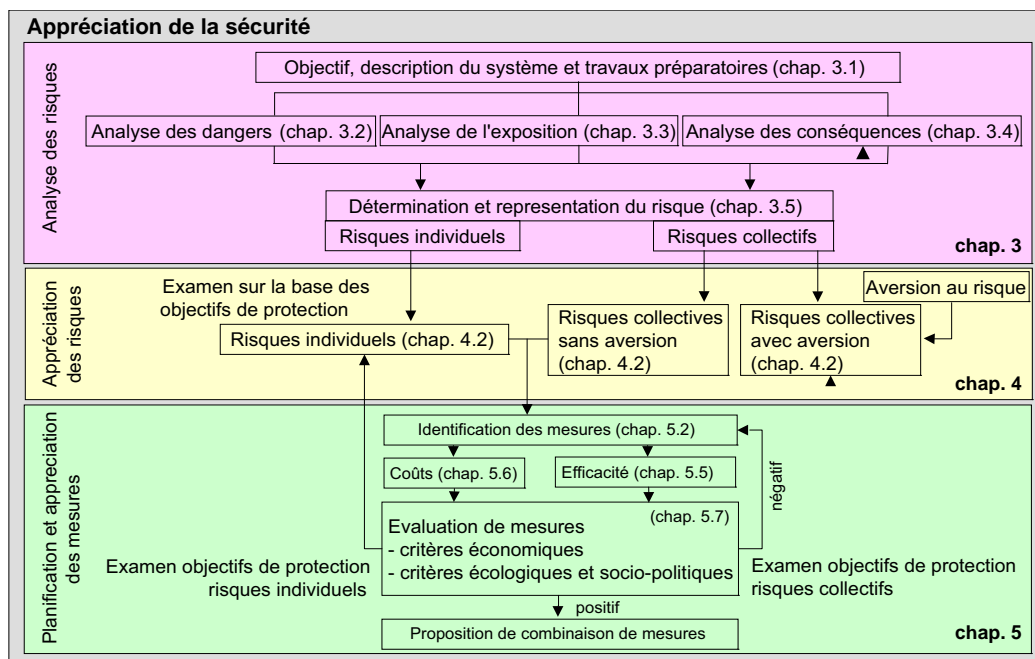


FIG. 1.1: Eléments d'une planification de mesures de sécurité axée sur les risques

Chapitre 2

Notion de risque et paramètres le décrivant

2.1 Notion de risque

Sur un plan général, le risque caractérise la possibilité qu'une conséquence indésirable, autrement dit, dans le domaine technique et celui des sciences naturelles, un dommage, se produise. Le risque peut donc être défini comme la mesure de l'importance accordée à la sécurité. Cette importance est déterminée et évaluée en fonction de paramètres spécifiques. Le risque se caractérise par :

- **la fréquence** ou **la récurrence** d'un événement dangereux, et
- **l'ampleur des dommages**, déterminée par le nombre de personnes et les valeurs matérielles qui sont exposés à un événement dangereux au moment où celui-ci se produit effectivement, et par la vulnérabilité des personnes et des biens considérés. En l'occurrence, ces biens peuvent avoir des dimensions économiques, écologiques ou sociales.

Entre les notions de fréquence et de récurrence, il existe une relation, présentée à la figure 2.1, et qui se déduit de la fonction de densité de probabilité de l'ampleur d'un événement [13]. Cette fonction peut être déduite de séries de données établies au cours de nombreuses années. La récurrence caractérise un intervalle de temps pendant lequel une valeur déterminée (p. ex. hauteur de la fracture dans le cas d'avalanches, niveau d'eau atteint lors de crues, taille des blocs dans le cas d'une chute de pierres) occasionnant un dommage est atteinte ou dépassée. La figure 2.1 (a) montre qu'un niveau d'une récurrence donnée est atteint ou dépassé toutes les T^* années.

La figure 2.1 (b) présente la fréquence d'un événement. Dans la fonction de densité de probabilité, des événements présentant un niveau T^* ou supérieur peuvent être ventilés dans différents scénarios : un scénario présentant des niveaux entre T^* et T^1 , un autre avec des niveaux entre T^1 et T^2 ainsi qu'un troisième présentant des niveaux entre T^2 et T^{max} . Les fréquences de ces trois scénarios correspondent aux surfaces diversement hachurées dans la fonction de densité de probabilité. En première approximation, la fréquence peut donc être définie comme la différence entre les récurrences adjacentes. Si, dans la figure 2.1 (b) $T^* = 30$ ans ($p_{30} = 0,033$) et $T^1 = 100$ ans ($p_{100} = 0,01$), alors la fréquence du scénario entre $T = 30$ ans et $T = 100$ ans est de $p_{30} - p_{100} = 0,023$.

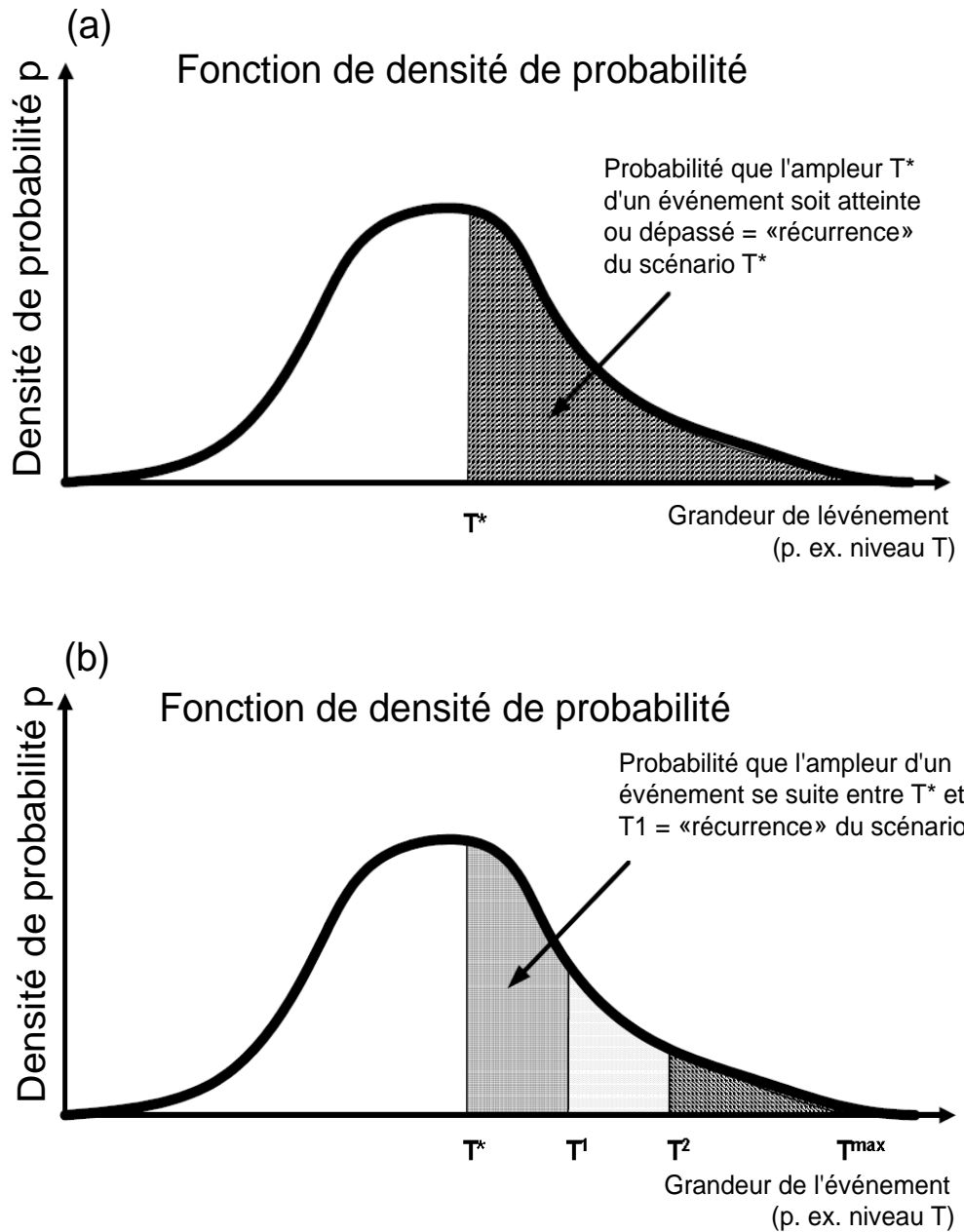


FIG. 2.1: Représentation de la récurrence (a) et de la fréquence (b) dans une fonction de densité de probabilité (selon [13])

Les risques consécutifs à des dangers naturels sont définis comme la **valeur des dommages attendus**. Le risque peut être exprimé en valeur des dommages attendus par unité de temps (p. ex. francs par an) ou par événement.

2.2 Formule du risque

Un risque ou un dommage ne survient que lorsqu'un objet est exposé à des actions dangereuses, et qu'il peut subir des dommages en raison de sa vulnérabilité. La formule du risque qui synthétise ces interactions peut être exprimée par l'équation suivante :

$$R_{i,j} = p_j \cdot p_{i,j} \cdot A_i \cdot v_{i,j} \quad (2.1)$$

$$R_j = \sum_i R_{i,j} \quad (2.2)$$

$$R = \sum_j R_j \quad [\text{NV/an ou francs/an}] \quad (2.3)$$

- R = risque collectif, somme de tous les scénarios j et objets i [francs/an ou NV/an]
- p_j = probabilité du scénario j [-]
- $p_{i,j}$ = probabilité que l'objet i soit exposé au scénario j [-]
- A_i = valeur de l'objet i [francs]
- $v_{i,j}$ = vulnérabilité de l'objet i en fonction du scénario j [-]

Les formules montrent qu'à dangerosité égale, il peut résulter des risques différents du fait de vulnérabilités différentes. Même si ces grandeurs ne sont pas quantifiées dans l'application du concept de risque, ou qu'elles ne le sont que partiellement en fonction du degré de détail nécessaire, il faut toujours être conscient de ces différents facteurs et relations lorsqu'on évalue des risques.

2.3 Personnes et objets menacés

En principe, dans une analyse des risques, on considère les objets qui entrent de manière significative dans la décision concrète relative aux mesures de sécurité nécessaires. Un événement peut concerner soit des personnes, soit des objets, soit les deux. La stratégie PLANAT «Dangers naturels» Suisse [56] donne la priorité à la vie humaine ; la protection des biens matériels vient en second lieu. Elle aborde cependant aussi les impératifs de sécurité des infrastructures, des biens culturels, des collectivités politiques et des systèmes socio-économiques.

Les personnes susceptibles d'être blessées ou tuées lors d'un événement naturel ont donc une importance particulière. Il y a lieu de traiter spécialement les personnes blessées et les coûts subséquents, lesquels peuvent être considérables dans certaines circonstances. A priori, on ne peut pas attribuer de valeur pécuniaire aux dommages corporels subis par des personnes. Cependant, pour pouvoir déterminer un risque global comportant aussi des valeurs matérielles, on attribue aux dommages subis par les personnes une valeur pécuniaire qui se calcule sur la base des dépenses que la société est prête à consentir pour éviter des décès (voir aussi chap. 4.2.3).

Les objets menacés peuvent être rassemblés dans différentes catégories, tels que bâtiments (p. ex. maisons d'habitation, bâtiments commerciaux et industriels, édifices publics, etc.), objets spéciaux (p. ex. centrales de production d'énergie, décharges, réservoirs d'eau, etc.), infrastructure routière et ferroviaire, remontées mécaniques, conduites ainsi qu'agriculture, espaces verts et forêts. Le

dommage à des objets peut généralement être directement chiffré en valeurs pécuniaires. Il correspond au montant qu'il faudrait dépenser pour remettre l'objet dans son état initial. Ce dommage est aussi appelé dommage direct.

Mais dans un événement naturel surviennent aussi des coûts indirects appelés coûts subséquents. Ces coûts sont en particulier inhérents aux interruptions d'exploitation ou aux pertes de gain. Il peut être très complexe, voire impossible, de les chiffrer. La délimitation entre les dommages micro-économiques et macro-économiques peut aussi être problématique. Pour les raisons invoquées, les coûts indirects ne sont pas suffisamment, voire pas du tout, pris en considération dans les analyses de risques.

Outre ces dommages, auxquels on peut plus ou moins attribuer une valeur, il est possible que soient touchés des objets auxquels il n'est pas possible d'accorder sans autres une valeur économique. Il s'agit souvent d'objets culturels ne pouvant pas être remplacés intégralement ou partiellement en cas de dommage.

2.4 Paramètres de risque applicables aux victimes

2.4.1 Risque individuel

Le risque individuel caractérise le risque auquel est exposé un individu ; il indique la probabilité annuelle de décéder dans une situation de risque donnée. Le risque individuel exprime donc une probabilité complémentaire à la probabilité de mort naturelle. Présenté dans la matrice des risques (tableau 3.5), le risque individuel r_i encouru par une personne est la somme des risques considérés dans tous les scénarios possibles dans lesquels cette personne peut se trouver. L'unité du risque individuel est généralement la probabilité de décès par année ou par unité d'une activité donnée (p. ex. par km de trajet parcouru en voiture).

2.4.2 Risque collectif

2.4.2.1 Personnes

Le risque collectif (de personnes) caractérise le risque auquel est exposé un groupe donné de personnes ou une communauté donnée. Reporté dans la matrice des risques (tableau 3.5), il correspond au risque R , produit de la fréquence d'un scénario et de l'ampleur probable du dommage résultant (dommages corporels et / ou dégâts matériels).

La figure 2.2 illustre la différence entre risque individuel et risque collectif. Dans les deux cas, le risque collectif R est identique, c'est-à-dire que le nombre escompté de victimes est identique. Dans le cas (a), trois personnes contribuent au risque global R (p. ex. personnes se trouvant dans une maison d'habitation particulièrement exposée) avec un grand, voire même un très grand risque individuel (mais identique dans ce cas). Dans le cas (b), en revanche, c'est un grand nombre de personnes qui sont exposées à un faible risque individuel (p. ex. route). De plus, dans le cas (a), les victimes potentielles sont généralement connues, alors que dans le cas (b), il s'agit de victimes aléatoires parmi un grand nombre de personnes potentiellement exposées. La situation de risque est donc toujours caractérisée par deux paramètres, à savoir l'ampleur (risque collectif R) et la

répartition des risques individuels, respectivement la forme de la surface de risque résultante. Cette distinction est capitale dans l'évaluation des risques. Ceux-ci doivent donc toujours être déterminés et appréciés sous ces deux angles de vue.

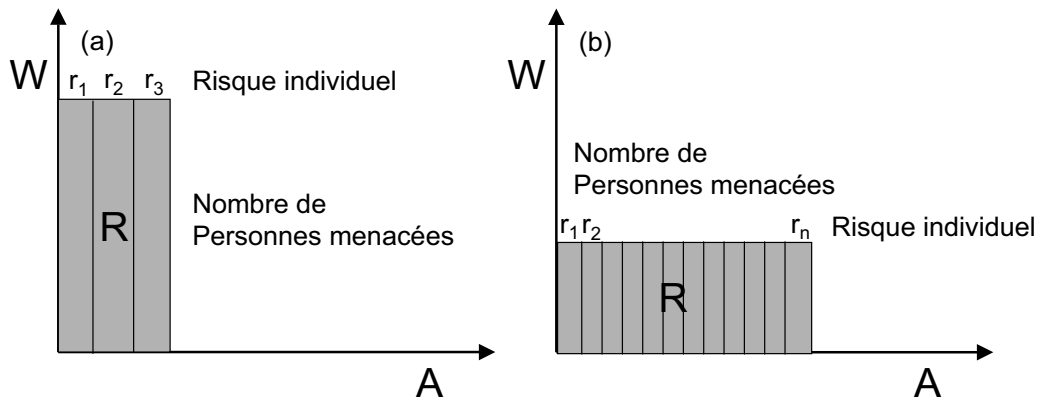


FIG. 2.2: Ampleur différente de risques individuels pour un même risque global R

2.4.2.2 Biens matériels

Selon le processus, ce ne sont pas des personnes, mais des biens matériels qui ont une incidence déterminante sur le risque (p. ex. dans le cas des crues). Le risque collectif se rapportant aux biens matériels résulte de l'ampleur cumulée des dommages subis par chaque objet situé dans le périmètre d'évaluation couplé à la fréquence du scénario considéré. Dans la matrice des risques, l'ampleur des dommages peut être présentée en principe pour chaque objet. Suivant la situation, il peut être judicieux, pour des objets donnés particulièrement importants, de présenter séparément le risque menaçant ces objets. Le risque touchant les biens matériels, traduit en valeur des dommages attendus, est exprimé en unités pécuniaires par année (francs par an).

Chapitre 3

Analyse des risques

L'analyse des risques vise à calculer le plus objectivement possible les paramètres de risques liés à un événement donné, à un objet spécifique ou à une zone donnée. Il s'agit en l'occurrence d'évaluer aussi bien la situation initiale, c'est-à-dire en l'absence de mesures, que l'impact des mesures déjà mises en œuvre, point particulièrement important pour l'appréciation des mesures (voir chap. 5).

Une analyse des risques comporte les étapes suivantes :

- **Objectif visé, délimitation et travaux préparatoires** : définition des objectifs d'une analyse des risques, délimitation de la zone à évaluer, et autres travaux préparatoires ;
- **Analyse des dangers** : analyse des événements (en vue de déterminer les scénarios déterminants et leur probabilité d'occurrence) et analyse des effets (afin de déterminer les intensités et l'ampleur de la menace) ;
- **Analyse de l'exposition** : identification de la nature et de l'emplacement des objets menacés (personnes, biens matériels) ainsi que de leur présence en terme de durée et de lieu (situations d'exposition) ;
- **Analyse des conséquences** : détermination de l'ampleur des dommages pour les différents objets par couplage du nombre et de la valeur des objets, de la vulnérabilité (léthalité), de la probabilité d'occurrence spatiale du processus, de la probabilité de présence de personnes et d'objets ainsi que de la protection des objets ; détermination et présentation de l'ampleur des dommages pondérés et non pondérés (avec aversion pour le risque) ;
- **Détermination et description des risques** : définition des paramètres déterminants (risque individuel et collectif) et description.

L'élaboration concrète d'une analyse des risques, en particulier son degré de détail et de quantification, dépend dans une large mesure de la nature et de la situation des dangers, mais aussi de l'objectif poursuivi et des exigences posées à cette analyse, ainsi que du niveau de connaissance de l'analyste et de la qualité des données disponibles. Indépendamment des exigences posées à une analyse des risques, il faut toujours suivre la systématique décrite.

3.1 Objectif visé, délimitation et travaux préparatoires

Avant de pouvoir procéder à une analyse des risques, il faut délimiter le périmètre d'évaluation, quant à son contenu et à sa géographie, et définir le but de l'analyse. Par conséquent, il s'agit de réunir les données appropriées pour les différentes étapes de l'analyse.

Avant le début de l'appréciation de la sécurité proprement dite, il importe de fixer avec l'organisme responsable (mandant) l'objectif poursuivi (y compris le degré de détail) et les limites du périmètre d'évaluation. D'autres travaux préparatoires concernent la description du périmètre d'évaluation, ainsi que l'acquisition et la vérification des données de base disponibles. Il s'agit enfin de déterminer l'organisation du projet (partenaires, compétences, collaboration).

3.1.1 Objectif visé

Le but de l'appréciation dépend de la situation concrète du problème et des résultats attendus. Où se situe le problème dans le processus de prise de décision ? Quelle est la criticité de la situation ? S'agit-il, dans un premier temps, uniquement d'une appréciation sommaire appelée à servir de base décisionnelle en vue d'évaluer la nécessité d'agir et la démarche ultérieure, ou s'agit-il déjà d'une planification et d'une appréciation aussi détaillées que possible des mesures ? Quels facteurs influencent-ils le processus décisionnel ? C'est sur la base de ces questions qu'il faut préciser l'objectif de l'appréciation.

Une fois l'objectif défini et la situation analysée, il faut fixer le degré de détail nécessaire et justifié, ainsi que l'étendue de l'appréciation. Il incombe en particulier d'examiner si une appréciation minutieuse en vertu du présent guide justifie l'optimisation des coûts des mesures qu'elle permet. Le degré de détail opportun, ou la précision nécessaire de l'analyse et de l'appréciation dépendent aussi du cadre juridique (devoir de diligence).

3.1.2 Délimitation et description du périmètre d'évaluation

La délimitation et la description du périmètre d'évaluation sont également intrinsèquement liées à l'analyse de la situation et de l'objectif visé par l'appréciation. Elles doivent être effectuées :

- sur le plan géographique (espace couvert par le périmètre d'évaluation) et
- sur le plan du contenu (sources de dangers, objets, genres de dommages, effets secondaires).

3.1.3 Travaux préparatoires

3.1.3.1 Acquisition et examen des données de base disponibles

L'acquisition de données en vue de l'appréciation de la sécurité englobe le matériel cartographique disponible, les vues aériennes, le cadastre des événements, les rapports et expertises techniques (concernant aussi des situations analogues), les articles de presse, mais aussi les rapports verbaux d'expériences, etc. En font également partie les données décrivant les activités humaines dans le

périmètre d'évaluation, y compris leur évolution future possible, ainsi que les données relatives aux spécificités naturelles, y compris la végétation et la météorologie, etc.

3.1.3.2 Organisation du projet et compétences

Toute appréciation de la sécurité s'inscrit dans un contexte qui englobe différents partenaires, mais aussi différentes personnes touchées. L'approche organisationnelle mais aussi le contexte de l'appréciation font également partie des études préliminaires.

Il faut en particulier clarifier la question de savoir qui est responsable des décisions nécessaires en ce qui concerne l'appréciation et la démarche générale. Le plus souvent, c'est le mandant. Par ailleurs, il faut définir, d'une part, les autres organes et personnes auxquels il faudra faire appel et de quelle manière et, d'autre part, les adresses auxquelles les informations peuvent et doivent être transmises.

3.2 Analyse des dangers

Les paramètres calculés ou définis dans l'analyse des dangers sont la base du calcul des risques. L'analyse des dangers se subdivise en une analyse des événements et une analyse de leurs effets ou impacts. L'analyse des événements identifie les dangers à prendre en compte et précise les scénarios significatifs. L'analyse des effets détermine la nature, l'amplitude et l'intensité des effets dangereux. Le résultat de ces deux volets, et donc de l'analyse des dangers, sont des cartes d'intensité pour chacun des scénarios déterminants (description des effets par scénario).

3.2.1 Analyse des événements

Dans l'**analyse des événements**, on identifie tout d'abord les dangers significatifs à l'aide de diverses sources de données (p. ex. cadastre des événements, analyse des photos aériennes et du terrain). Associée à d'autres informations et compte tenu de l'état actuel des connaissances, l'évaluation de ces données de base permet de définir les scénarios catastrophes déterminants comme résultat de l'analyse des événements. En principe, on part de la situation actuelle réelle, dans laquelle on peut intégrer des processus modifiés, mais à condition de les désigner comme tels. Par ailleurs, il faut accorder une certaine attention aux interactions avec les infrastructures humaines (p. ex. obstruction). L'élaboration de scénarios peut s'effectuer de différentes façons (figure 3.1) :

- A partir de données cadastrales, on peut déterminer la probabilité d'un scénario ($p = 0,083$) via la récurrence T d'un processus (p. ex. nombre d'avalanches observées par unité de temps sur un secteur routier donné, p. ex. $T = 5,5$ ans) (figure 3.1 (a)).
- Les amplitudes possibles des événements sont catégorisées à l'aide de scénarios de récurrence donnée. Par souci de pouvoir établir des comparaisons, on a défini en Suisse des classes de récurrence de 0 à 30 ans, de 30 à 100 ans, de 100 à 300 ans et de 300 ans. Pour ce qui est des crues, on admet aussi un événement EHQ qui représente le cas extrême. La récurrence du débit extrême (EHQ) se situe à peu près dans le domaine de 500 à 1000 ans (figure 3.1 (b)).

- La conjonction complexe de différents déroulements de processus dangereux est modélisée à l'aide d'un arbre des événements (figure 3.1 (c)).
- Les scénarios sont définis sur la base d'avis d'experts.

Cette dernière possibilité est surtout significative dans une approche pragmatique, mais elle s'applique aussi à l'examen de scénarios modélisés. L'approche pragmatique de dangers naturels caractérise une procédure dans laquelle, à la faveur de workshops réunissant des experts et des représentants de différents domaines, sont entreprises des estimations sommaires de la répartition des risques dans une région [13, 4].

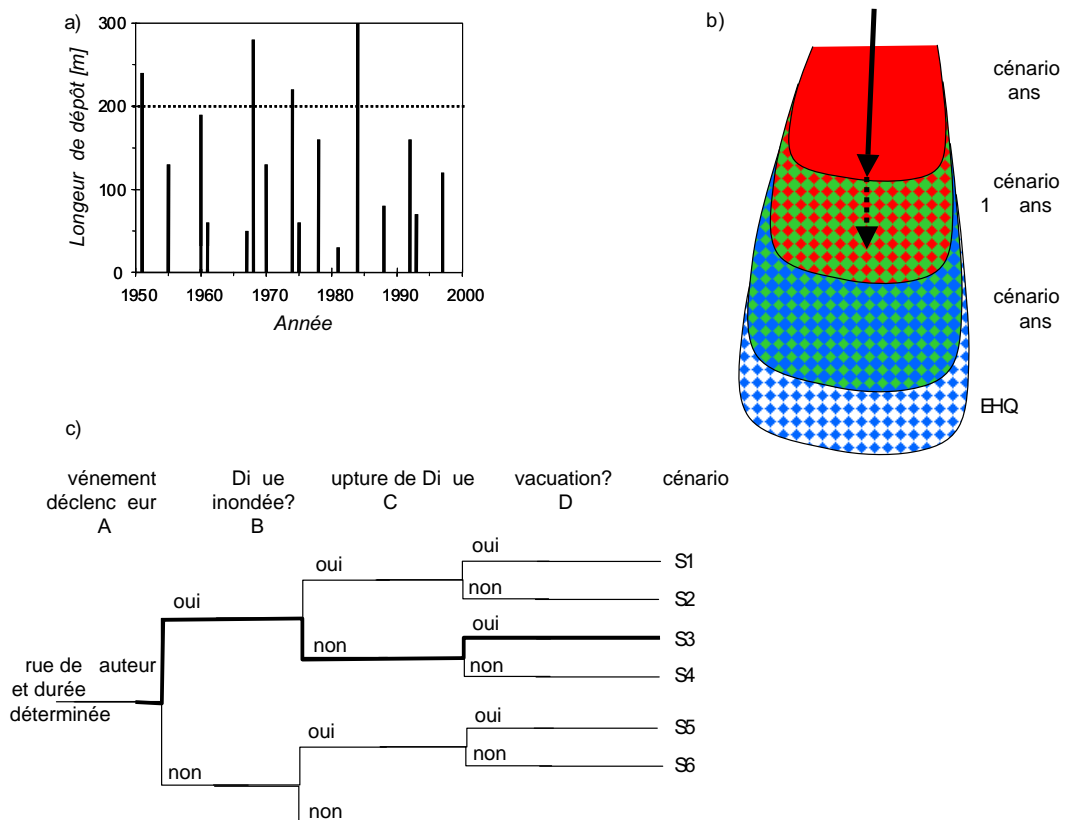


FIG. 3.1: Possibilités de constitution d'un scénario. Dans le cas (a), la récurrence d'un processus peut être calculée à partir d'une période d'observation. Par exemple, dans une période de 48 ans, diverses avalanches ont été observées le long d'un axe de communication quelconque. Quatre avalanches d'une longueur de dépôt de 200 m ont été observées ; au total, 16 avalanches ont été observées pendant la période considérée. A partir de là, on calcule une récurrence de 12 ans (selon [83]). Dans le cas (b), trois scénarios avec une récurrence $T = 30$ ans, $T = 100$ ans et $T = 300$ ans ont été constitués. L'espace au-delà de l'événement de 300 ans de récurrence n'est plus pris en compte. Dans le cas (c), les scénarios sont établis à l'aide d'une arborescence des événements.

3.2.2 Analyse des effets

L'analyse des effets sert à déterminer la nature, l'ampleur et l'intensité de la menace induite par les scénarios définis. L'intensité correspond à l'impact physique, qui varie suivant le type de processus

(p. ex. la hauteur de l'inondation ou le produit de la hauteur inondée et de la vitesse de l'écoulement lors d'une crue).

Dans les scénarios, les intensités sont estimées sur la base des données cadastrales, mais aussi à l'aide de modèles mathématiques et de simulations, ce qui permet d'élaborer une image simplifiée du système naturel. Le résultat se présente sous la forme de cartes d'intensités. Ces cartes sont une condition nécessaire pour des analyses de risques détaillées. Elles ne peuvent être remplacées par des cartes de dangers que dans certaines conditions, car ces dernières ne dissocient pas l'intensité d'un danger et sa fréquence. Or, dans une analyse de risques, il est nécessaire de savoir quelle est l'intensité escomptée d'un danger, où celui-ci se situe et quelle est sa fréquence.

Par souci de simplification, il sera judicieux, dans la plupart des cas, d'ordonner par classes les intensités estimées ou calculées. Une possibilité de délimiter ces classes d'intensité découle des conventions inscrites dans la littérature spécialisée dans les dangers naturels (intensité faible, moyenne et forte). Ce qui est important dans ce contexte, c'est de travailler avec des classes uniformes afin de garantir que les résultats soient comparables. Dans le cas des avalanches, des crues, des laves torrentielles, des éboulements et des glissements de terrain, des critères de délimitation ont été fixés pour les classes d'intensité dans des directives et des recommandations de la Confédération [9, 46, 44].

S'agissant des processus non gravitationnels, dans le cas du vent, c'est la vitesse de celui-ci et sa durée qui sont importantes ; dans le cas de la grêle, c'est la taille des grêlons. Quant aux processus liés à la température (chaleur et froid), c'est le nombre de jours au-dessus ou au-dessous d'une température journalière moyenne donnée qui est un critère de délimitation déterminant pour l'intensité.

3.3 Analyse de l'exposition

L'analyse de l'exposition identifie les objets potentiellement menacés dans le périmètre d'évaluation, et fait un descriptif qualitatif et quantitatif de leur situation, de leur nombre, de leur nature, de leur affectation et de leur valeur. En principe, une analyse des risques part de l'état réel, c'est-à-dire qu'elle ne considère que les objets existant effectivement au moment de l'évaluation. Or le danger potentiel n'est pas constant sur l'axe du temps ; il fluctue. Les régions inscrites dans la zone bleue, délimitées comme zones à bâtir, peuvent par exemple être construites cinq à dix ans après une évaluation. Il s'ensuivra une augmentation sensible des dommages potentiels, ce qui, à son tour, va influencer le risque. Dans chaque cas de figure, il faut donc intégrer ces zones dans la planification séparément de l'état réel afin de pouvoir apprécier l'évolution future du risque et son incidence sur la planification des mesures et, le cas échéant, de pouvoir en tenir compte. Toutefois, dans chaque cas, il importe que l'évolution future possible soit clairement définie comme telle.

Les objets et les zones à évaluer peuvent être subdivisés en plusieurs groupes, à savoir :

- objets dont le nombre et l'emplacement ne changent pas au fil du temps (objets fixes, liés à un lieu) ;
- objets variables dans le temps et le lieu (véhicules, équipements mobiles) et devant être considérés comme donnés au moment de l'évaluation :

- personnes séjournant soit dans des objets fixes, soit dans des objets variables, pris en considération au moment de l'évaluation ;
- évolution future (croissance ou décroissance) d'objets et de personnes fixes, comme données initiales distinctes pour l'appréciation de l'évolution d'un risque.

3.3.1 Identification des objets fixes

Ce sont les données indiquées dans le tableau 3.1 qui doivent être relevées pour les objets fixes potentiellement menacés. Ces données sont la base du calcul de l'ampleur des dommages, qui sera abordé au chapitre 3.4. Les dommages ainsi déterminés correspondent au dommage direct probable suite aux scénarios pris en compte.

TAB. 3.1: Paramètres et indications directs relatifs aux objets potentiellement menacés

Type d'objet	Paramètres directs
Bâtiment, objets spéciaux	Situation, nombre de bâtiments, nombre de personnes par bâtiment, valeur pécuniaire
Infrastructures	Situation, affectation, genre de construction, protection des ouvrages, valeur pécuniaire
Route, rail	Situation, longueur, degré de fréquentation
Moyens de remontée mécanique	véhicules, valeur pécuniaire, protection
Conduites, distribution	Situation, longueur, valeur pécuniaire, protection
Agriculture	Situation, surface, valeur pécuniaire
Forêt	Situation, surface, valeur pécuniaire
Zones de détente	Situation, surface, valeur pécuniaire

Outre les dommages directs, presque tous les événements naturels ont des conséquences indirectes. Celles-ci résultent de limitations dans la fonction objets (p. ex. voies de communication endommagées ou obstruées, exploitation commerciale ou industrielle perturbée) pour leurs propriétaires ou leurs exploitants. Pour certains objets, les conséquences indirectes peuvent être plus graves que les dommages directs. Les chemins de fer exploités selon un horaire inscrit dans la loi en sont un exemple puisque leur interruption nécessite la mise en place d'un service de remplacement extrêmement coûteux. Comparativement, les dommages directs, par exemple les dégâts légers causés aux voies par une avalanche et les frais de déblaiement, sont négligeables. Toutefois, comme les conséquences indirectes sont souvent difficiles à calculer, il faut être attentif à étayer les hypothèses formulées et à garantir une très bonne transparence. Le tableau 3.2 propose quelques exemples de conséquences indirectes.

3.3.2 Identification de personnes et d'objets variables

S'agissant des biens matériels mobiles tels que véhicules, tentes, infrastructures de manifestations, etc., il faut déterminer s'il s'en trouve effectivement dans la zone menacée au moment où un processus dangereux peut se produire. Si c'est le cas, et s'il y a lieu de prévoir un dommage considérable, il faut les intégrer dans l'analyse des risques.

TAB. 3.2: Paramètres et données indirects relatifs aux objets potentiellement menacés

Type d'objet	Paramètres indirects
Bâtiments, objets spéciaux, commerces, industrie	Coûts, interruption d'exploitation
Infrastructures	Coûts de l'interruption
Route, rail, moyens de remontées mécaniques	Coûts de l'interruption (p. ex. coûts des blocages)
Conduites, distribution	Coûts de l'interruption
Agriculture	Perte d'exploitation
Forêt	Manque de protection contre les dangers naturels
Zones de détente	Perte d'exploitation

Lorsqu'il s'agit de traiter le cas de personnes, il faut d'abord déterminer si elles sont un aspect prioritaire dans le processus analysé. Il faut ensuite décider si l'hypothèse avancée à propos de l'occupation moyenne des objets est suffisamment précise et si le nombre des personnes présentes est très variable en fonction du moment.

Si l'on part de valeurs moyennes, il faut alors déterminer, outre l'occupation moyenne des objets considérés par des personnes $N(P)$, la probabilité de présence ($p(pr)$) de personnes dans ces objets. On entend par là la probabilité que des personnes se trouvent dans des objets menacés pendant un processus dangereux. L'occupation effective des objets par des personnes est alors le produit de l'occupation des bâtiments $N(P)$ par la probabilité de présence ($p(pr)$). Si on admet, par exemple, qu'il y a en moyenne 2,24 personnes par logement ($N(P) = 2,24$), que celles-ci y séjournent en moyenne pendant 12 heures par jour, et que le processus peut se produire pendant toute l'année, alors, la probabilité de présence $p(pr) = 0,5$ et, par conséquent, le nombre de personnes effectivement présentes par logement est de 1,12 ($N(P) \cdot p(pr) = 1,12$).

3.3.3 Différenciation de situations d'exposition

Si le nombre de personnes potentiellement exposées pendant un laps de temps donné subit de fortes fluctuations et si le risque menaçant des personnes vient au premier plan des considérations (p. ex. dans le cas des avalanches, des laves torrentielles, des éboulements), on peut alors modéliser ce nombre variable de personnes à l'aide de ce qu'on appelle des situations d'exposition. Dans tous les autres cas, on peut admettre un nombre moyen de personnes dans les objets.

Par situation d'exposition, on entend une répartition immuable de personnes dans la zone dangereuse pendant une certaine durée¹. Elle se caractérise par une durée donnée et par le nombre effectif de personnes ($N(Peff)$) près d'un objet ou à l'intérieur de celui-ci. Typiquement, des situations d'exposition sont subdivisées en une **situation de base** et une ou plusieurs **situations spéciales**.

¹ On peut se représenter une situation d'exposition comme une photographie, le temps d'exposition correspondant à sa durée.

La **situation de base** définit un nombre constant de personnes sur une période prolongée, par exemple dans des maisons d'habitation. Elle couvre une partie relativement importante du temps, par exemple 75 %.

Les **situations spéciales** décrivent des cas dans lesquels de grands groupes de personnes sont exposés à un risque pendant une durée relativement brève. A titre d'exemple, on peut citer le passage d'un train ou d'un autocar entièrement occupé, la circulation routière congestionnée, une longue file de randonneurs, une manifestation en plein air réunissant des centaines, voire des milliers de personnes, un bâtiment d'école entièrement occupé, un centre de vacances ou un hôtel, un mariage dans une église, etc. Lorsqu'un événement coïncide en temps et en lieu avec une situation spéciale, il est probable, dans certaines circonstances qu'il faille envisager un grand nombre de victimes. Dans ce genre de situation, la valeur des dommages attendus ne suffit pas à elle seule à exprimer l'ampleur des dommages qui en résultent, car de tels événements sont des catastrophes disproportionnées pour l'institution ou la collectivité responsable.

Considérer de telles situations en prenant pour référence un nombre moyen de personnes présentes entraînerait donc des résultats erronés. De plus, la contribution des risques liés à des situations d'exposition livre des indications importantes pour la planification des mesures. Si, par exemple, une situation d'exposition contribue pour une part considérable au risque global, il faut alors accorder une attention accrue aux possibilités de réduire les risques induits par cette situation précise.

La superposition de différentes situations spéciales à des situations de base amène la délimitation de diverses situations d'exposition caractérisées par leur durée et par le nombre des personnes présentes. La durée des situations d'exposition se calcule à partir de la combinaison des situations spéciales et des situations de base.

Graphiquement, les situations d'exposition peuvent être représentées par un histogramme (figure 3.2). Les durées relatives respectives des diverses situations d'exposition par rapport au temps total peuvent être déterminées et représentées au moyen d'un arbre des événements (figure 3.2).

La figure 3.2 montre, à l'aide d'un exemple fictif, les différentes combinaisons résultantes, qui se distinguent les unes des autres par le nombre des personnes présentes dans les différents objets pendant les différentes périodes, et par la durée de ces dernières. Cet exemple montre aussi que le fait d'admettre plusieurs situations spéciales peut rapidement générer un très grand nombre de situations d'exposition. Dans la plupart des cas, il est donc judicieux de reproduire la réalité au moyen d'une situation de base et d'un petit nombre de situations spéciales, en général compris entre un et trois. Cela devrait suffire pour cerner la réalité à des coûts relativement corrects². Le choix du nombre de situations spéciales à considérer doit être effectué dans chaque cas de figure. Dans la plupart des cas, il faudrait considérer les situations suivantes :

1. Occupation normale des maisons par la population résidente, fréquence normale du trafic, peu de personnes dehors (durée relative élevée, p. ex. $SD_k = 0,75$, c'est-à-dire que cette situation prévaut pendant 75 jours sur 100).
2. Présence accrue de personnes dans des maisons, sur la route (DTV plus élevé) et dehors pendant les week-ends, la nuit ou durant les vacances dans des régions touristiques (durée

² L'assistance appropriée d'un logiciel peut simplifier l'application de plusieurs situations d'exposition. Il existe des exemples dans ce sens dans le domaine du stockage de la munition (logiciel RIMANA version 4).

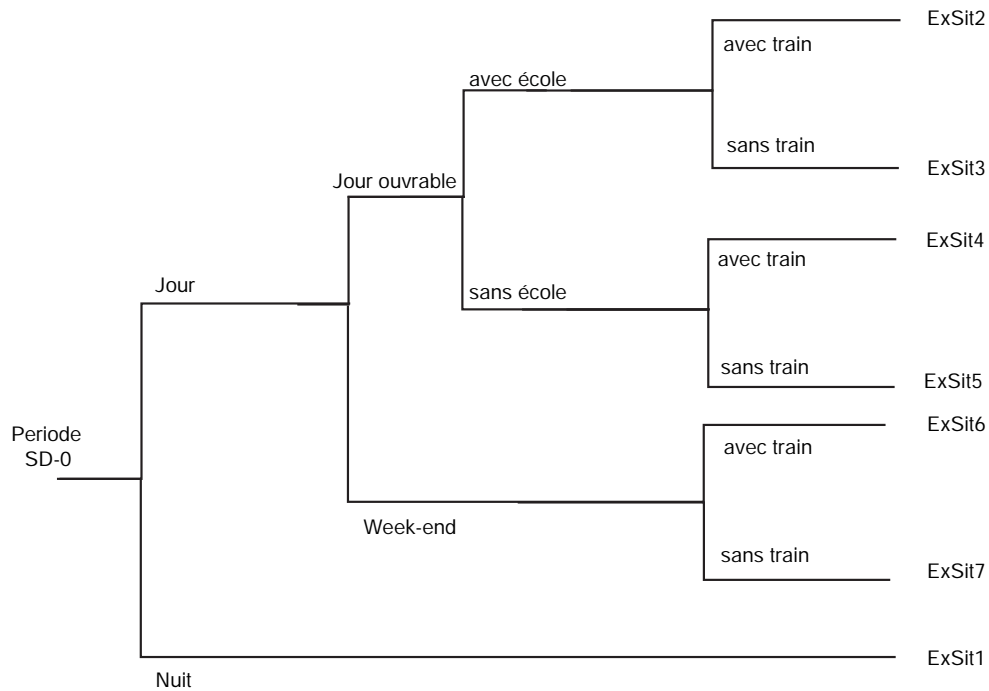


FIG. 3.2: Présentation de situations d'exposition sous la forme d'un histogramme

relative moyenne à faible, p. ex. $SD_k = 0,23$, c'est-à-dire que cette situation prévaut 23 jours sur 100).

3. Situation spéciale. Exemple : passage de trains, d'autobus de ligne ou d'autocars très fréquentés dans la zone dangereuse. Un train ou un bus ne se trouve que relativement peu de temps dans la zone menacée, mais, parallèlement, il peut y générer un fort afflux de personnes. Il s'ensuit une pointe de risque. Parmi les autres situations spéciales envisageables, on peut citer un embouteillage sur la route ou une manifestation en plein air rassemblant de nombreux spectateurs pendant quelques heures (très faible durée relative, p. ex. $SD_k = 0,02$, c'est-à-dire que cette situation prévaut 2 jours sur 100).

Une fois les diverses situations définies, il s'agit de calculer leurs valeurs caractéristiques pour les objets qui entrent en ligne de compte :

Bâtiments : nombre de personnes effectivement présentes dans les diverses situations $N(Peff)$.

Route : fréquence du trafic DTV_k , taux d'occupation des véhicules β_k , vitesse des véhicules v sur le tronçon routier menacé dans les diverses situations.

Train : fréquence des trains Fz_k , longueur des convois $l(z)$, taux d'occupation β_k , et vitesse du train v sur le tronçon routier menacé dans les diverses situations.

Personnes en plein air ou dans d'autres infrastructures : nombre de personnes effectivement présentes dans les diverses situations $N(Peff)$.

Comme le montre la figure 3.2, la combinaison de ces situations génère diverses situations d'exposition. La durée de l'ensemble des situations d'exposition est égale au temps total, c'est-à-dire

que la somme des durées relatives des différentes situations d'exposition donne la valeur 1 ou 100 %.

La durée relative de situations d'exposition (SD_k) pour des personnes se trouvant dans des objets non en mouvement (bâtiments, lieux de séjour fixes à l'extérieur) est le rapport entre les heures, jours ou semaines considérés et l'ensemble de la période déterminée (p. ex. semestre d'été). Elle se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$SD_k = \frac{t(pr)_k}{t(ha)} \quad [-] \quad (3.1)$$

SD_k = durée relative de la situation d'exposition k

$t(pr)_k$ = séjour en heures, journées ou semaines pendant la situation d'exposition k .

$t(ha)$ = nombre de heures, journées ou semaines pendant lesquelles un processus dangereux peut se produire.

La période potentiellement dangereuse varie d'un processus à l'autre. Dans le cas des avalanches, par exemple, on peut considérer uniquement la saison d'hiver par simplification, tandis qu'on prendra surtout les mois d'été pour les laves torrentielles.

Dans les situations dans lesquelles des personnes se trouvent dans des objets mobiles, la durée d'une situation se détermine par la fréquence de la traversée du secteur dangereux, par la longueur de ce dernier et par la vitesse du mouvement. S'agissant de la situation spéciale «passage d'un train», la durée de la situation spéciale se calcule selon la formule suivante :

$$SD(B)_k = \frac{Fz_k \cdot (g + l(z))}{v} \cdot \frac{t(pr)_k}{t(ha)} \quad [-] \quad (3.2)$$

$SD(B)_k$ = durée relative de la situation spéciale «passage d'un train» pendant une situation d'exposition k

Fz_k = fréquence des trains pendant une journée

g = longueur du tronçon menacé [m]

$l(z)$ = longueur du train [m]

v = vitesse moyenne du train [km/h]

$t(pr)_k$ = séjour en heures, journées ou semaines pendant la situation d'exposition k

$t(ha)$ = nombre de heures, journées ou semaines pendant lesquelles un processus dangereux peut se produire

Pour les voitures ou les autocars, on peut, par souci de simplification, admettre que ce sont des objets ponctuels, raison pour laquelle il n'y a pas lieu de tenir compte de la longueur des trains $l(z)$. On peut donc admettre $l(z) = 0$ dans la formule (3.2). La détermination de la durée relative SD_k s'effectue toutefois selon le même principe.

3.3.4 Evolution du potentiel de dommages

Comme on l'a déjà vu au début de ce chapitre, le potentiel de dommages n'est pas une grandeur statique ; il varie avec le temps. Pour intégrer dans la planification des mesures l'évolution du

risque dans une zone, il peut être judicieux, suivant le projet, de faire en plus du relevé de l'état actuel réel des hypothèses quant à l'évolution du potentiel de dommages. Il faudrait alors prendre en considération les variables suivantes :

- modification du nombre de bâtiments et d'objets spéciaux ;
- modification de l'infrastructure ;
- modification du nombre et de la longueur des voies de communication (rail et route) ;
- modification de conduites et de lignes de distribution d'énergie, télécommunication, eau et eaux usées ;
- modification de la fréquence des véhicules sur la route et sur le rail ;
- modification du nombre moyen des personnes séjournant dans des bâtiments et présentes sur les voies de communication ;
- période à laquelle la croissance est probable.

3.4 Analyse des conséquences

L'analyse des conséquences sert à déterminer l'ampleur des dommages en cas de sinistre pour chaque objet, y compris pour les personnes présentes, et cela, pour tous les scénarios et les situations d'exposition considérés. Elle procède par superposition des cartes d'intensités et des objets potentiellement menacés, compte tenu de leur vulnérabilité (dans le cas des personnes compte également tenu de la létalité), de la probabilité d'occurrence spatiale et de la probabilité de présence.

3.4.1 Facteurs de calcul dans l'analyse des conséquences

3.4.1.1 Vulnérabilité et fragilité

Dans le présent guide, on utilise la notion de **vulnérabilité** pour caractériser l'ampleur d'une atteinte subie par un objet (p. ex. un bâtiment ou une infrastructure) sous l'action d'un processus donné. La vulnérabilité varie en fonction du type de processus et de son intensité, et est chiffrée par une valeur comprise entre 0 (pas d'atteinte) et 1 (atteinte maximale = dommage total). L'expression «vulnérabilité» est souvent utilisée comme synonyme de «fragilité».

Le terme vulnérabilité a toutefois une acception plus large et englobe, non seulement l'atteinte négative subie par des objets, mais encore les atteintes subies par des systèmes techniques ou sociétaux [37]. La vulnérabilité peut donc être subdivisée en une composante «technique» et une composante «sociétale» [47]. La notion de «fragilité technique» est surtout utilisée pour les atteintes subies par des systèmes techniques.

La fragilité de systèmes techniques décrit généralement les dommages pouvant être subis par des systèmes tels que des alarmes, une alimentation électrique, un réseau de distribution d'eau, des réseaux de communication ou encore des réseaux de transport. Le dommage peut également être décrit proportionnellement au système en état de fonctionner. Cela requiert la prise en compte d'une composante temporelle, qui exprime la rapidité avec laquelle le système peut être remis en parfait état de marche (résilience du système).

Enfin, par fragilité de systèmes sociétaux, on entend la perturbation subie par une collectivité ou une partie de celle-ci (p. ex. habitants d'une région, d'une vallée ou d'une commune). La fragilité détermine ici l'écart par rapport à un état normal défini. La perturbation peut résider, par exemple, dans le fait que des catastrophes naturelles répétées peuvent fortement déprécier l'image d'une région, lui faire perdre son pouvoir d'attraction, et provoquer, par voie de conséquence, l'exode de ses habitants. La résilience d'une collectivité (p. ex. dans une vallée) joue un rôle important dans son degré de fragilité.

Dans le cas idéal, il existe pour tous les objets ou les systèmes potentiellement concernés des conventions qui permettent d'attribuer des indices ou des fonctions de fragilité en relation avec l'intensité probable des événements potentiels. Dans la pratique actuelle des dangers naturels, cela n'est malheureusement pas possible, hormis dans une mesure très restreinte. Dans la plupart des cas, on en est donc réduit à formuler des hypothèses, lesquelles doivent cependant être clairement définies, afin de garantir toute la transparence requise. Dans le cadre du projet EconoMe [7], des valeurs ont été définies pour la vulnérabilité d'objets sur la base des connaissances actuelles. Les annexes consacrées aux différents projets définissent ces valeurs (voir partie B).

La notion de **léthalité** désigne la probabilité de décès d'une personne suite à l'action d'un processus d'une intensité donnée. La léthalité dépend de l'exposition de la personne (en plein air, dans un bâtiment, dans un véhicule, etc.). Si une personne se trouve dans un objet au moment d'un événement, la probabilité de son décès est égale au produit de la vulnérabilité de l'objet considéré et de la léthalité. La léthalité est exprimée par des valeurs comprises entre 0 et 1.

3.4.1.2 Protection des objets

La vulnérabilité d'un objet est influencée de manière déterminante par les mesures techniques de construction mises en œuvre directement sur cet objet en vue d'en minimiser les dégâts lorsqu'un événement se produit. L'effet de ces mesures est pris en compte dans le calcul de l'ampleur des dommages par un facteur appelé coefficient de protection d'objet (ε). Si ε a la valeur 0, cela signifie qu'aucune protection n'existe ; si $\varepsilon = 1$, la protection est totale.

3.4.1.3 Probabilité d'occurrence spatiale

Il s'agit de la probabilité qu'un point donné dans le périmètre d'évaluation soit atteint lorsque survient un processus dangereux. La prise en considération d'une probabilité d'occurrence spatiale tient compte du fait objectif que, souvent, un tel processus ne porte pas atteinte à la totalité de la surface délimitée. On peut estimer cette probabilité de différentes façons :

1. En fixant un facteur $p(rA)$ entre 0 et 1, qui détermine en moyenne la part touchée d'une zone. Ce facteur varie d'un processus et d'un scénario à l'autre.
2. A l'aide d'un arbre des événements. Cela permet de prendre en compte dans l'analyse les propriétés locales spécifiques du terrain et la position d'un objet.

3.4.1.4 Probabilité de présence

Comme on l'a vu au chapitre 3.3.3, la probabilité de présence $p(pr)$ se calcule à partir de la durée moyenne de la présence d'une personne ou d'un objet dans la zone dangereuse. Etant donné que des personnes ne se trouvent pas dans une zone pendant toute la durée considérée, ou alors que très brièvement (p. ex. passage en voiture ou en train), la probabilité de présence a un effet réducteur sur la probabilité d'occurrence d'un dommage.

Lorsqu'on distingue diverses situations d'exposition, il faut tenir compte de leurs durées respectives SD_k dans la détermination de l'ampleur des dommages. Comme la différenciation de situations d'exposition peut aboutir à des dommages de grande ampleur, la durée relative a un effet fortement réducteur sur la probabilité d'occurrence d'un dommage.

3.4.1.5 Combinaison des facteurs

Pour déterminer l'ampleur des dommages, il faut combiner les facteurs ci-dessus avec les objets exposés. Pour chaque situation d'exposition, on examinera :

- si l'objet considéré est touché (probabilité d'occurrence spatiale ($p(rA)$)) et
- dans quelle zone d'intensité il se situe.

Sur la base de ces données, on calcule pour chaque objet, à l'aide des formules indiquées plus bas, d'une part, l'ampleur des dommages, et d'autre part l'ampleur des dommages attendus (voir les définitions au chap. 3.4.3). Les résultats du calcul peuvent ensuite être reportés dans une matrice ad hoc (tableau 3.5). Actuellement, il n'existe pas de fonctions de vulnérabilité pour les systèmes techniques et sociétaux. Si de tels systèmes sont touchés, il faut définir des fonctions de vulnérabilité appropriées à l'aide d'estimations effectuées par des experts.

3.4.2 Pondération de l'ampleur des dommages (aversion pour le risque)

Un autre facteur doit être évoqué ici pour des questions de méthodologie. Il s'agit de la pondération d'un grand dommage (prise en considération d'une fonction d'aversion pour le risque). Cette pondération fait partie intégrante de l'appréciation du risque à laquelle procède la collectivité ou une entreprise. Mais comme on ne pondère pas le risque mais l'ampleur des dommages, il est important d'aborder cette considération ici par souci de cohérence. Les raisons plus précises qui parlent en faveur d'une pondération de l'ampleur des dommages sont exposées au chapitre 4.4. Dans une analyse des risques, on détermine et présente toujours l'ampleur effective (non pondérée) et l'ampleur ressentie (pondérée) d'un dommage. Ce que l'on pondère en l'occurrence, c'est toujours l'«ampleur des dommages en cas d'événement» (chap. 3.4.3).

3.4.3 Détermination de l'ampleur directe des dommages

Dans le calcul de l'ampleur des dommages, il faut faire la distinction suivante :

1. **L'ampleur des dommages en cas d'événement** désigne l'ampleur des dommages lorsque l'objet est effectivement touché. Pour simplifier, on parlera désormais d'ampleur des dommages dans les pages suivantes.
2. **L'ampleur des dommages attendus** définit l'ampleur des dommages compte tenu de la probabilité d'occurrence spatiale et de la probabilité de présence d'un objet ou d'une personne. Elle peut aussi être identique à l'ampleur des dommages en cas d'événement.

L'ampleur des dommages en cas d'événement est donc plus grande ou égale à l'ampleur des dommages attendus, C'est la valeur qui est pondérée lors de la prise en compte de l'aversion pour le risque.

Les chapitres suivants exposent les principales étapes de la détermination de l'ampleur des dommages à l'aide des formules de calcul correspondantes. Elles sont basées sur les formules de calcul de la publication 107 de l'OFEV [11]. Ces formules constituent la base du calcul de l'ampleur des dommages pour tous les processus.

3.4.3.1 Ampleur des dommages aux bâtiments

$$A(G)_{i,j} = (1 - \varepsilon_i) \cdot W(G)_i \cdot SE(G)_{i,j} \quad [\text{francs}] \quad (3.3)$$

En tenant compte de la probabilité d'occurrence spatiale, on obtient l'ampleur des dommages attendus sur des bâtiments.

$$Aw(G)_{i,j} = p(rA)_j \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot W(G)_i \cdot SE(G)_{i,j} \quad [\text{francs}] \quad (3.4)$$

3.4.3.2 Ampleur des dommages aux personnes dans des bâtiments

$$A(PG)_{i,j,k} = (1 - \varepsilon_i) \cdot N(P)_{i,k} \cdot \lambda_{i,j} \quad [\text{NV}] \quad (3.5)$$

En tenant compte de la probabilité d'occurrence spatiale du processus, on obtient l'ampleur des dommages attendus aux personnes.

$$Aw(PG)_{i,j,k} = p(rA)_j \cdot p(pr)_{i,k} \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot N(P)_{i,k} \cdot \lambda_{i,j} \quad [\text{NV}] \quad (3.6)$$

$A(G)_{i,j}$	=	ampleur des dommages matériels en cas d'événement pour un objet i dans un scénario j [francs]
$Aw(G)_{i,j}$	=	ampleur des dommages matériels attendus pour un objet i dans un scénario j [francs]
$A(PG)_{i,j,k}$	=	ampleur des dommages aux personnes en cas d'événement (nombre de décès) pour un objet i dans un scénario j et une situation d'exposition k [NV]
$Aw(PG)_{i,j,k}$	=	ampleur des dommages attendus occasionnés à des personnes (nombre de décès) pour un objet i dans un scénario j et une situation d'exposition k [NV]
ε_i	=	facteur de protection de l'objet i en fonction du processus et de l'intensité [-]

- Sa valeur varie entre 0 et 1. La valeur 1 signifie que l'objet est protégé à 100 % et qui ne devrait donc subir aucun dommage.
- $W(G)_i$ = valeur de l'objet i [francs].
- $SE(G)_{i,j}$ = vulnérabilité de l'objet i en fonction du processus et de l'intensité [-]. Sa valeur varie entre 0 et 1. La valeur 1 signifie que l'objet est détruit à 100 %.
- $N(P)_{i,k}$ = nombre moyen de personnes se trouvant dans un objet i dans une situation d'exposition k [-]
- $\lambda_{i,j}$ = létalité pour les personnes se trouvant dans l'objet i , en fonction du processus et de l'intensité [-]. Sa valeur varie entre 0 et 1. L'affectation d'une valeur 1 indique qu'il faut s'attendre à ce que les personnes considérées soient mortellement touchées.
- $p(rA)_j$ = probabilité d'occurrence spatiale en fonction du processus et du scénario j choisi à l'endroit considéré [-].
- $p(pr)_{i,k}$ = probabilité de présence d'une personne i dans une situation d'exposition k [-].

L'ampleur totale des dommages attendus aux bâtiments $Aw(G)_j$ dans un scénario j se calcule par la formule :

$$Aw(G)_j = \sum_i Aw(G)_{i,j} \quad [\text{francs}] \quad (3.7)$$

et l'ampleur totale des dommages attendus aux personnes séjournant dans tous les bâtiments $Aw(P)_{j,k}$ dans un scénario j et pour une situation d'exposition k , avec :

$$Aw(PG)_{j,k} = \sum_i Aw(PG)_{i,j,k} \quad [\text{NV}] \quad (3.8)$$

L'ampleur des dommages pour toutes les situations d'exposition est la somme de l'ampleur des dommages liés à chacune des situations d'exposition considérées isolément :

$$Aw(PG)_j = \sum_k Aw(PG)_{j,k} \quad [\text{NV}] \quad (3.9)$$

3.4.3.3 Ampleur des dommages aux biens matériels fixes le long de routes

L'ampleur des dommages pour des biens matériels fixes (immobiles) le long de routes se calcule par la formule suivante :

$$A(S)_j = SE(S)_j \cdot W(S) \cdot g_j \quad [\text{francs}] \quad (3.10)$$

En tenant compte de la probabilité d'occurrence spatiale, on obtient l'ampleur probable des dommages $Aw(S)_j$:

$$Aw(S)_j = p(rA)_j \cdot SE(S)_j \cdot W(S) \cdot g_j \quad [\text{francs}] \quad (3.11)$$

$$SE(S)_j = \frac{(SE(S)_s \cdot g_s) + (SE(S)_m \cdot g_m) + (SE(S)_{st} \cdot g_{st})}{g_s + g_m + g_{st}} \quad [-] \quad (3.12)$$

$SE(S)_j$	=	vulnérabilité de la route en fonction du processus et de l'intensité [-]
$SE(S)_{s,m,st}$	=	vulnérabilité en fonction de l'intensité (faible, moyen, fort)
$W(S)$	=	valeur matérielle de la route par mètre courant [francs]
g_j	=	longueur totale du tronçon menacé par le scénario j comme somme des tronçons isolés indépendamment de l'intensité. Elle est composée de la somme des tronçons menacés par une intensité faible (g_s), moyenne (g_m) et forte (g_{st}).

3.4.3.4 Ampleur des dommages aux personnes le long de routes et sur des remontées mécaniques

Lors d'accidents sur des routes par suite d'événements naturels, on peut en principe distinguer deux cas de figure :

1. Le véhicule est directement touché par un processus. Cette configuration est surtout déterminante pour les processus gravitationnels et dits «brutaux». La probabilité d'une atteinte directe dépend de la fréquence de passage des véhicules, de leur vitesse moyenne et de la longueur moyenne du tronçon menacé.
2. Le véhicule peut rouler sur des matériaux déjà déposés (cas appelé «collision contre des matériaux déposés»).

Quant à savoir si cette distinction doit être faite, cela dépend de la situation du tronçon routier menacé et de la visibilité qu'offre son tracé. Comme les voitures et les autocars ont des distances de freinage beaucoup plus courtes que les trains, elle ne devrait être réellement nécessaire que dans quelques rares cas. C'est par souci d'exhaustivité qu'on la mentionne ici.

Impact direct : dans ce cas de figure, l'ampleur des dommages occasionnés à des personnes se trouvant dans des véhicules sur des routes ou des moyens de remontée mécanique se calcule comme suit :

$$A(PS)_{j,k} = \lambda_j \cdot \beta_k \quad [NV] \quad (3.13)$$

En tenant compte de la probabilité de présence spatio-temporelle, on obtient l'ampleur des dommages attendus aux personnes se trouvant sur une route ou sur une remontée mécanique $Aw(PS)_{j,k}$:

$$Aw(PS)_{j,k} = p(rA)_j \cdot \frac{DTV_k \cdot g_j}{v} \cdot \lambda_j \cdot \beta_k \quad [NV] \quad (3.14)$$

La létalité qu'est valable pour le calcul est équivalent à la létalité moyenne d'un tronçon par intensité, selon :

$$\lambda_j = \frac{(\lambda_s \cdot g_s) + (\lambda_m \cdot g_m) + (\lambda_{st} \cdot g_{st})}{g_s + g_m + g_{st}} \quad [-] \quad (3.15)$$

$A(PS)_{j,k}$	=	ampleur des dommages aux personnes se trouvant sur la route ou sur l'installation de remontée mécanique lors d'un événement dans le scénario j et la situation d'exposition k [NV]
DTV_k	=	trafic journalier moyen dans la situation d'exposition k [véhicules/jour]. Dans le cas des remontées mécaniques, cela correspond au nombre moyen de personnes transportées quotidiennement.
λ_j	=	létalité moyenne dans un véhicule d'un tronçon menacé, qui est composé de la létalité par l'intensité faible (λ_s), moyenne (λ_m) et forte (λ_{st})
β_k	=	taux moyen d'occupation des véhicules dans la situation d'exposition k
$p(rA)_j$	=	probabilité d'occurrence spatiale à l'endroit considéré, en fonction du processus et du scénario j
g_j	=	longueur totale du tronçon menacé par le scénario j comme somme des tronçons isolés indépendamment de l'intensité. Elle est composée de la somme des tronçons menacés par une intensité faible (g_s), moyenne (g_m) et forte (g_{st}).
v	=	vitesse moyenne des véhicules ou de l'installation de remontée mécanique sur le tronçon menacé [km/h]

L'ampleur totale des dommages dans le cas de figure «personnes le long de routes» est la somme de l'ampleur des dommages sur les différents tronçons menacés avec une intensité différente et différentes situations d'exposition k .

$$Aw(PS)_j = \sum_k Aw(PS)_{j,k} \quad [NV] \quad (3.16)$$

3.4.3.5 Ampleur des dommages sur des lignes ferroviaires

Lorsqu'on calcule l'ampleur des dommages sur des lignes de chemin de fer, on peut, suivant le processus, distinguer deux cas de figure.

1. Le train peut être directement atteint par un processus dangereux. Ce cas est surtout significatif pour les processus gravitationnels brutaux tels qu'avalanches, laves torrentielles, chutes de pierres et glissements de terrains superficiels (coulées de boue). La probabilité d'impact dépend de la fréquence des trains, de leur vitesse moyenne dans la zone menacée, de leur longueur et de la longueur de la zone menacée.
2. Le train peut rouler sur des matériaux déjà déposés. Cela constitue un nouveau cas de figure possible pour les processus cités plus haut.

De plus, il faut faire des distinctions entre les situations où des objets fixes ou variables sont rencontrés sur une ligne ferroviaire. Dans les objets variables, on range les compositions de trains et les personnes qui s'y trouvent.

Ampleur des dommages aux biens matériels fixes : l'ampleur des dommages subis par des biens matériels fixes définis comme objets ponctuels tels que postes de couplage, câbles, etc., se calcule selon la formule suivante :

$$A(BPO)_{i,j} = SE(BPO)_{i,j} \cdot W(BPO)_i \quad [\text{francs}] \quad (3.17)$$

Compte tenu de la probabilité, on obtient l'ampleur des dommages attendus :

$$Aw(BPO)_{i,j} = p(rA)_j \cdot SE(BPO)_{i,j} \cdot W(BPO)_i \quad [\text{francs}] \quad (3.18)$$

Pour des objets linéaires, tels que voie unique, etc., l'ampleur des dommages se calcule comme il suit :

$$A(BLO)_j = SE(BLO)_j \cdot W(BLO) \cdot g_j \quad [\text{francs}] \quad (3.19)$$

Compte tenu de la probabilité, on obtient l'ampleur probable des dommages :

$$Aw(BLO)_j = p(rA)_j \cdot SE(BLO)_j \cdot W(BLO) \cdot g_j \quad [\text{francs}] \quad (3.20)$$

La vulnérabilité qu'est valable pour le calcul est équivalent à la vulnérabilité moyenne d'un tronçon par intensité, selon :

$$SE(BLO)_j = \frac{(SE(BLO)_s \cdot g_s) + (SE(BLO)_m \cdot g_m) + (SE(BLO)_{st} \cdot g_{st})}{g_s + g_m + g_{st}} \quad [-] \quad (3.21)$$

$SE(BPO)_{i,j}$ = vulnérabilité d'un objet ponctuel i dans le scénario j [-]

$SE(BLO)_j$ = vulnérabilité moyenne de l'objet linéaire i par le tronçon menacé [-]

$W(BPO)_i$ = valeur matérielle du chemin de fer par objet [francs]

$W(BLO)$ = valeur matérielle du chemin de fer par mètre courant [francs]

g_j = longueur totale du tronçon menacé par le scénario j comme somme des tronçons isolés indépendamment de l'intensité. Elle est composée de la somme des tronçons menacés par une intensité faible (g_s), moyenne (g_m) et forte (g_{st}).

$Aw(BPO)_{i,j}$ = ampleur des dommages attendus aux biens matériels fixes correspondant à l'objet ponctuel i dans le scénario j [francs]

$Aw(BLO)_j$ = ampleur des dommages attendus aux biens matériels fixes correspondant à l'objet linéaire i dans le scénario j [francs]

Ampleur des dommages aux biens matériels mobiles : l'ampleur des dommages occasionnés à des biens matériels mobiles (locomotives et matériel roulant) sur des lignes ferroviaires est décrite par les deux cas de figure «impact direct» et «collision contre des matériaux déposés» (figure 3.3).

Impact direct : si le processus est déclenché, la probabilité d'un impact direct se calcule selon la formule suivante :

$$p(DT)_{j,k} = p(rA)_j \cdot \frac{Fz_k \cdot g_j}{v} \cdot \left(\frac{l(z)}{g} + 1 \right) \quad [-] \quad (3.22)$$

avec $\left(\frac{g}{l(z)} \leq 1 \right)$.

- $p(DT)_{j,k}$ = probabilité d'un impact direct dans le scénario j et la situation d'exposition k [-]
 $p(rA)_j$ = probabilité d'occurrence spatiale sur le lieu considéré [-]
 Fz_k = nombre de passages de trains par jour (fréquence) [-]
 g_j = longueur totale du tronçon menacé par le scénario j comme somme des tronçons isolés indépendamment de l'intensité. Elle est composée de la somme des tronçons menacés par une intensité faible (g_s), moyenne (g_m) et forte (g_{st}).
 v = vitesse moyenne des trains sur le tronçon menacé [km/h]
 $l(z)$ = longueur moyenne des trains [m]

L'ampleur des dommages subis par des biens matériels par impact direct se calcule ainsi :

$$A(BDT)_j = SE(BDT)_j \cdot W(B) \quad [\text{francs}] \quad (3.23)$$

En tenant compte de la probabilité d'un impact direct, on obtient l'ampleur des dommages attendus $Aw(BDT)_{j,k}$:

$$Aw(BDT)_{j,k} = p(DT)_{j,k} \cdot SE(BDT)_j \cdot W(B) \quad [\text{francs}] \quad (3.24)$$

La vulnérabilité qu'est valable pour le calcul est équivalent à la vulnérabilité moyenne d'un tronçon par intensité, selon :

$$SE(BDT)_j = \frac{(SE(BDT)_s \cdot g_s) + (SE(BDT)_m \cdot g_m) + (SE(BDT)_{st} \cdot g_{st})}{g_s + g_m + g_{st}} \quad [-] \quad (3.25)$$

- $A(BDT)_j$ = ampleur des dommages à des biens matériels mobiles par impact direct sur la ligne de chemin de fer dans le scénario j [francs]
 $SE(BDT)_j$ = vulnérabilité du chemin de fer en fonction du processus et de l'intensité, suite à un impact direct [-]
 $SE(BDT)_{s,m,st}$ = vulnérabilité en fonction de l'intensité (faible, moyen, fort).
 $W(B)$ = bien matériel ferroviaire mobile [francs]
 $Aw(BDT)_{j,k}$ = ampleur des dommages attendus aux biens matériels mobiles sur la ligne ferroviaire dans le scénario j et pour la situation d'exposition k [francs]
 $g_{s,m,st}$ = longueur des tronçons menacés par intensité faible (g_s), moyenne (g_m) et forte (g_{st})

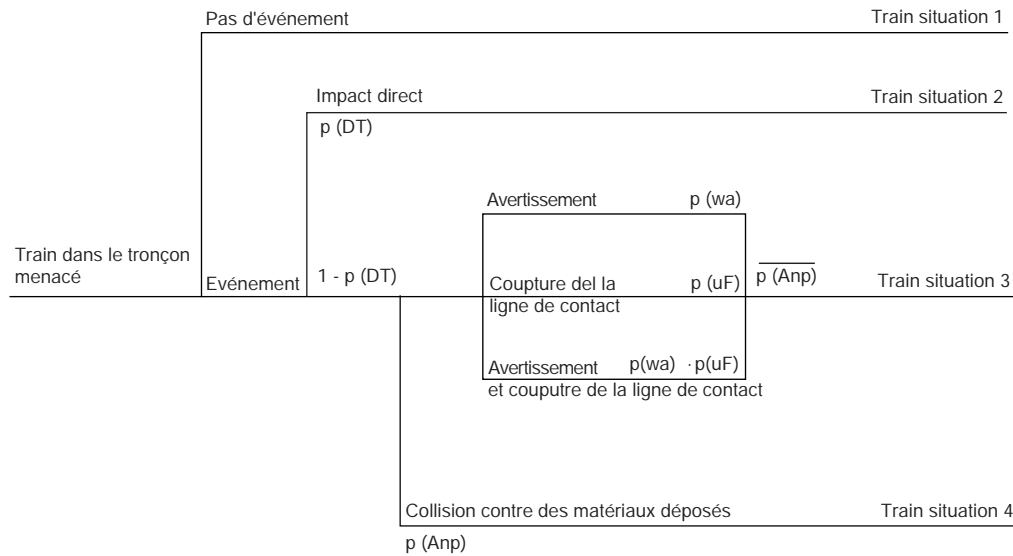


FIG. 3.3: Présentation de situation d'exposition d'un train sous la forme d'un histogramme

Collision contre des matériaux déposés : dans ce cas de figure, on détermine les différentes probabilités de dommages à des biens matériels mobiles sur la base de [84] :

$$p(Anp)_{j,k} = (1 - p(DT)_{j,k}) \cdot (1 - \overline{p(Anp)}) \quad [-] \quad (3.26)$$

$$\overline{p(Anp)} = p(wa) \cdot (1 - p(uF)) + p(uF) \cdot (1 - p(wa)) + p(wa) \cdot p(uF) \quad [-] \quad (3.27)$$

avec

$\overline{p(Anp)}$ = probabilité que le train ne roule pas sur ces matériaux [-]

$p(wa)$ = probabilité de l'avertissement du conducteur de la locomotive [-]

$p(uF)$ = probabilité de coupure de la ligne de contact [-]

On propose les valeurs indicatives suivantes pour la probabilité $p(wa)$ de l'avertissement du conducteur de la locomotive et de la probabilité $p(uF)$ de coupure de la ligne de contact :

TAB. 3.3: Valeurs empiriques attribuées aux probabilités d'avertissement $p(wa)$ et de rupture de la ligne de contact $p(uF)$

	Avalanche	Chute de pierres	Crues	Laves torrentielles	Eboulement	Glissement de terrain	Coulées de boues
$p(wa)$	0,3	0,1	0,3	0,2	0,05	0,2	0,2
$p(uF)$	0,5	0,1	0,5	0,2	0,5	0,2	0,2

L'ampleur des dommages se calcule alors de la façon suivante :

$$A(BAnp) = SE(BAnp) \cdot W(B) \cdot k \quad [\text{francs}] \quad (3.28)$$

Compte tenu de la probabilité d'une collision, on obtient

$$Aw(BAnp)_{j,k} = p(Anp)_{j,k} \cdot SE(BAnp) \cdot W(B) \cdot k \quad [\text{francs}] \quad (3.29)$$

$A(BAnp)$	=	sampleur des dommages aux biens matériels mobiles par collision lors d'un événement [francs]
$SE(BAnp)$	=	vulnérabilité des biens matériels mobiles
$W(B)$	=	bien matériel ferroviaire mobile [francs]
k	=	facteur de collision, en fonction de la vitesse du convoi, qui considère que seuls les wagons à l'avant sont touchés. Les valeurs sont définies dans le tableau 3.4
$Aw(BAnp)_{j,k}$	=	ampleur des dommages attendus aux biens matériels mobiles lors d'une collision dans le scénario j et pour la situation d'exposition k [francs]

TAB. 3.4: Facteur k , considérant qu'en cas de collision contre des dépôts de matériaux seuls les wagons à l'avant sont touchés. Ce facteur détermine le nombre de wagons ou de personnes touchés en fonction de la vitesse

Vitesse du train					
v [km/h]	30–50	50–80	80–100	100–120	> 120
k	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8

L'ampleur totale des dommages attendus rapportée aux biens matériels mobiles sur une ligne ferroviaire $Aw(mB)_j$ est la somme de l'ampleur des dommages attendus consécutivement à l'impact direct et à la collision contre des matériaux déposés :

$$Aw(mB)_j = \sum_k Aw(BDT)_{j,k} + \sum_k Aw(BAnp)_{j,k} \quad [\text{francs}] \quad (3.30)$$

Somme de l'ampleur des dommages aux biens matériels sur une ligne ferroviaire : l'ampleur totale des dommages attendus rapportée aux biens matériels sur une ligne ferroviaire est la somme de l'ampleur des dommages attendus consécutivement à l'impact direct et à la collision contre des matériaux déposés.

$$Aw(B)_j = Aw(mB)_j + Aw(BPO)_j + Aw(BLO)_j \quad [\text{francs}] \quad (3.31)$$

$Aw(B)_j$	=	ampleur des dommages attendus sur la ligne ferroviaire dans le scénario j
$Aw(mB)_j$	=	ampleur des dommages attendus en cas d'impact direct et de collision dans le scénario j
$Aw(BPO)_j$	=	ampleur des dommages attendus pour des objets ponctuels dans un scénario j
$Aw(BLO)_j$	=	ampleur des dommages attendus pour des objets linéaires dans un scénario j

3.4.3.6 Ampleur des dommages à des personnes sur des lignes ferroviaires

Impact direct : l'ampleur des dommages aux personnes se trouvant dans un train suite à un impact direct, dans le scénario j , se calcule avec la formule :

$$A(PBDT)_{j,k} = \lambda(DT)_j \cdot \beta_k \quad [NV] \quad (3.32)$$

Compte tenu de la probabilité d'un impact direct, il résulte que l'ampleur des dommages attendus $Aw(PBDT)_{j,k}$ est égale à :

$$Aw(PBDT)_{j,k} = p(DT)_{j,k} \cdot \lambda(DT)_j \cdot \beta_k \quad [NV] \quad (3.33)$$

Pour déterminer la probabilité d'un impact direct, voir aussi l'équation 3.22.

La létalité valable pour le calcul est équivalent à la létalité moyenne d'un tronçon par intensité, selon :

$$\lambda(DT)_j = \frac{(\lambda(DT)_s \cdot g_s) + (\lambda(DT)_m \cdot g_m) + (\lambda(DT)_{st} \cdot g_{st})}{g_s + g_m + g_{st}} \quad [-] \quad (3.34)$$

$\lambda(DT)_j$	=	létalité pour les personnes en cas d'impact direct
$\lambda(DT)_{s,m,st}$	=	létalité par intensité faible ($\lambda(DT)_s$), moyenne ($\lambda(DT)_m$) et forte ($\lambda(DT)_{st}$)
$g_{s,m,st}$	=	longueur des tronçons menacés par intensité faible (g_s), moyenne (g_m) et forte (g_{st})
β_k	=	taux d'occupation du train dans la zone menacée (selon la situation d'exposition k), avec $\frac{g}{l_k} \leq 1.0$
$Aw(PBDT)_{j,k}$	=	ampleur des dommages attendus aux personnes en cas d'impact direct sur la ligne ferroviaire dans le scénario j et la situation d'exposition k [NV]

Ampleur des dommages aux personnes par collision lors d'un événement : l'ampleur des dommages pour le cas de figure «collision lors d'un événement» se calcule comme suit :

$$A(PBAnp)_k = \lambda(Anp) \cdot \beta_k \cdot k \quad [NV] \quad (3.35)$$

Compte tenu de la probabilité d'un choc, on obtient l'ampleur des dommages attendus en cas de choc contre des dépôts de matériaux $Aw(PBAnp)_{j,k}$:

$$Aw(PBAnp)_{j,k} = p(Anp)_{j,k} \cdot \lambda(Anp) \cdot \beta_k \cdot k \quad [NV] \quad (3.36)$$

$p(Anp)_{j,k}$	=	probabilité qu'un train roule sur des matériaux déposés sur la voie (collision) [-]
$\lambda(Anp)$	=	léthalité pour les personnes se trouvant dans le train lors d'une collision contre des matériaux déposés
k	=	facteur k en cas de collision contre des dépôts de matériaux. Ce facteur tient compte du fait que seuls les premiers wagons sont touchés. Les valeurs sont définies dans le tableau 3.4.

L'ampleur des dommages attendus dans une situation d'exposition k pour des personnes se trouvant sur une ligne ferroviaire est la somme de l'ampleur probable des dommages consécutifs à un impact direct et à une collision contre des matériaux déposés :

$$Aw(PB)_{j,k} = Aw(PBDT)_{j,k} + Aw(PBAnp)_{j,k} \quad [NV] \quad (3.37)$$

L'ampleur totale des dommages est égale à la somme de l'ampleur des dommages dans les différentes situations d'exposition :

$$Aw(PB)_j = \sum_k Aw(PB)_{j,k} \quad [NV] \quad (3.38)$$

$Aw(PB)_{j,k}$	=	ampleur des dommages attendus aux personnes sur une ligne ferroviaire dans le scénario j et pour la situation d'exposition k
$Aw(PB)_j$	=	ampleur des dommages attendus aux personnes sur une ligne ferroviaire dans le scénario j
$Aw(PBDT)_{j,k}$	=	ampleur des dommages attendus aux personnes sur une ligne ferroviaire en cas d'impact direct dans le scénario j et la situation d'exposition k [NV]
$Aw(PBAnp)_{j,k}$	=	ampleur des dommages attendus aux personnes lors d'une collision dans le scénario j et la situation d'exposition k [NV]

3.4.3.7 Ampleur des dommages aux lignes et aux conduites

Pour les biens matériels fixes qui constituent des objets linéaires, l'ampleur des dommages se calcule avec la formule suivante :

$$A(L)_j = SE(L)_j \cdot W(L) \cdot g_j \quad [\text{francs}] \quad (3.39)$$

En tenant compte de la probabilité, on obtient la l'ampleur des dommages attendus.

$$Aw(L)_j = p(rA)_j \cdot SE(L)_j \cdot W(L) \cdot g_j \quad [\text{francs}] \quad (3.40)$$

La vulnérabilité qu'est valable pour le calcul est équivalent à la vulnérabilité moyenne d'un tronçon menacé par intensité, selon :

$$SE(L)_j = \frac{(SE(L)_s \cdot g_s) + (SE(L)_m \cdot g_m) + (SE(L)_{st} \cdot g_{st})}{g_s + g_m + g_{st}} \quad [-] \quad (3.41)$$

$SE(L)_j$	=	vulnérabilité de la ligne ou de la conduite en fonction de l'intensité [-]
$SE(L)_{s,m,st}$	=	vulnérabilité par intensité (faible, moyenne, forte)
$W(L)$	=	valeur matérielle de la ligne ou de la conduite par mètre courant [francs]
g_j	=	longueur totale du tronçon menacé par le scénario j comme somme des tronçons isolés indépendamment de l'intensité. Elle est composée de la somme des tronçons menacés par une intensité faible (g_s), moyenne (g_m) et forte (g_{st}).
$Aw(L)_j$	=	ampleur des dommages attendus aux biens matériels fixes définis par des lignes ou des conduites dans le scénario j [francs]

3.4.3.8 Ampleur des dommages à l'agriculture, à la forêt et aux espaces verts

Dans le cas des surfaces agricoles, des forêts et des espaces verts, l'ampleur des dommages se calcule comme :

$$A(F)_j = SE(F)_j \cdot W(F) \cdot F_j \quad [\text{francs}] \quad (3.42)$$

En tenant compte de la probabilité, on obtient l'ampleur des dommages attendus aux objets surfaciques $Aw(F)_j$:

$$Aw(F)_j = p(rA)_j \cdot SE(F)_j \cdot W(F) \cdot F_j \quad [\text{francs}] \quad (3.43)$$

La vulnérabilité qu'est valable pour le calcul est équivalent à la vulnérabilité moyenne d'un tronçon menacé par intensité, selon :

$$SE(F)_j = \frac{(SE(F)_s \cdot F_s) + (SE(F)_m \cdot F_m) + (SE(F)_{st} \cdot F_{st})}{F_s + F_m + F_{st}} \quad [-] \quad (3.44)$$

$SE(F)_j$	=	vulnérabilité d'un objet surfacique en fonction de l'intensité [-]
$SE(F)_{s,m,st}$	=	vulnérabilité par intensité (faible, moyenne, forte)
$W(F)$	=	valeur matérielle de l'agriculture [francs/are]
F_j	=	surface totale menacé par le scénario j comme la somme des tronçons isolés par une intensité faible (F_s), moyenne (F_m) et forte (F_{st})

3.4.3.9 Ampleur totale des dommages directs dans le scénario j

L'ampleur des dommages occasionnés à des biens matériels, exprimée en unités pécuniaires (francs ou euro), ne peut pas être directement additionnée aux dommages subis par des personnes. Cette opération n'est possible que lorsque les derniers nommés, exprimés en nombres de victimes, sont convertis en sommes d'argent (monétarisation). Cette monétarisation se fait à partir de ce qu'on appelle la dépense acceptée, à savoir la dépense qu'une collectivité est prête à consentir pour éviter un décès. En Suisse, selon la stratégie PLANAT et les autres outils informatiques dont on dispose

[7, 4], on admet généralement la valeur de 5 millions de francs par décès évité. L'ampleur directe des dommages aux biens matériels et aux personnes se calcule alors à l'aide de la formule suivante :

$$Aw_j = Aw(G)_j + Aw(S)_j + Aw(B)_j + Aw(L)_j + Aw(F)_j \quad \text{[francs]} \quad (3.45)$$

$$Aw(P)_j = 5 \cdot 10^6 \cdot (Aw(PG)_j + Aw(PS)_j + Aw(PB)_j) \quad \text{[francs]} \quad (3.46)$$

3.4.4 Détermination de l'ampleur indirecte des dommages

Comme on l'a vu au chapitre 3.3.1 et dans le tableau 3.2, outre les dommages directs mesurables ou observables, l'action de phénomènes naturels dangereux sur des objets peut aussi avoir des conséquences indirectes qui induisent généralement des coûts, logiquement appelés coûts subséquents. Dans certains cas, ces coûts subséquents sont même plus importants que les dommages matériels directement visibles.

Lorsque des lignes sont coupées, les compagnies ferroviaires, en particulier celles qui ont à respecter des obligations d'horaire et de desserte, doivent faire face à des coûts subséquents induits par la nécessité de mettre en place des services de remplacement et des déviations. Dans ce contexte, ces dépenses supplémentaires, qui n'existeraient pas sans un événement, doivent être considérées comme un dommage indirect, lequel peut être intégré dans l'analyse des risques.

Dans un contexte de concurrence, des interruptions d'exploitation prolongées peuvent même aller jusqu'à empêcher des entreprises de faire face à leurs engagements de livraison et, partant, à leur faire subir d'importants revers pour leur image, pouvant aller, dans le pire des cas, jusqu'à la cessation d'activité. Ce risque touche en premier lieu les petites et moyennes entreprises, moins à même de supporter des interruptions d'exploitation.

Dans l'optique d'une détermination intégrale des dommages consécutifs à des événements naturels, il faudrait séparer les conséquences (ou les coûts) indirectes découlant d'interruptions d'exploitation des dommages directs dans le calcul de l'ampleur des dommages. Le calcul des dommages indirects dépend généralement de la durée de l'interruption. Dans chaque cas, il faut donc documenter clairement les bases sur lesquelles repose l'estimation de ces dommages. En première approximation, le dommage indirect peut se calculer à l'aide de la formule suivante :

$$A(id)_j = K(ub) \cdot d_j \quad \text{[francs]} \quad (3.47)$$

$A(id)_j$ = ampleur des dommages indirects dans le scénario j [francs]

$K(ub)$ = coût de l'interruption d'exploitation par jour [francs]

d_j = durée de l'interruption d'exploitation [d]

Il faut être attentif au fait que l'ampleur des dommages n'augmente pas de manière linéaire avec la durée de l'interruption. En général, les coûts journaliers de celle-ci devraient croître dans un premier temps, pour régresser ensuite. De ce fait, les dommages indirects jouent un rôle important dans les domaines suivants :

- exploitants ferroviaires soumis à obligation d'horaire et de desserte ;

- distribution d'électricité ;
- télécommunication ;
- entreprises artisanales et industrielles tenues à des livraisons régulières ;
- populations de vallées n'ayant qu'un seul accès possible ;
- agriculture.

Les dommages indirects doivent être évalués séparément pour les différents scénarios, et peuvent ensuite être additionnés aux dommages directs. Il est recommandé d'effectuer et de présenter séparément le calcul des dommages indirects et directs et de leur somme.

3.4.5 Ampleur totale des dommages pour le scénario j

L'ampleur totale des dommages matériels directs et indirects et des dommages aux personnes se calcule avec la formule :

$$A_j = Aw_j + A(id)_j + Aw(P)_j \quad [\text{francs}] \quad (3.48)$$

- A_j = ampleur des dommages directs et indirects dans le scénario j
- Aw_j = ampleur des dommages matériels directs dans le scénario j
- $A(id)_j$ = ampleur des dommages indirects dans le scénario j
- $Aw(P)_j$ = ampleur monétarisée des dommages aux personnes dans le scénario j

3.5 Estimation et représentation des risques

La dernière partie de l'analyse des risques détermine les paramètres significatifs des risques. Outre les risques de dommages aux personnes (ou dommages corporels), il faut déterminer les risques matériels. Le rapport entre les risques de dommages corporels et les risques de dommages matériels varie en fonction du processus considéré ; il faut donc toujours présenter les deux composantes.

S'agissant des risques de dommages corporels, distinction doit être faite entre risques collectifs et individuels, qu'il faut également présenter séparément. Même si les risques collectifs dans le périmètre d'évaluation sont déterminants pour planifier des mesures de protection, il est recommandé de montrer également la contribution des scénarios correspondant aux différents événements et aux différentes situations d'exposition, car ils permettent de tirer des enseignements importants pour la planification des mesures. La contribution de ces scénarios et situations d'exposition se calcule à l'aide d'une matrice des risques.

Pour déterminer les risques individuels, il faut surtout considérer les personnes qui se trouvent en permanence dans une zone menacée et particulièrement exposées. On peut déterminer si ces risques sont au-dessus des valeurs limites définies et, partant, déterminants.

3.5.1 Risques collectifs

Dans l'estimation des risques, on relie à la fréquence des scénarios déterminants l'ampleur calculée des dommages occasionnés aux différents objets, selon l'équation 3.50.

$$R_j = p_j \cdot A_j \quad (3.49)$$

$$p_j = P_j - P_{j+1} \quad (3.50)$$

$$R = \sum_j R_j \quad [\text{francs/an}] \quad (3.51)$$

- R_j = risque collectif dans le scénario j [francs/an]
 p_j = fréquence du scénario j , défini en première approximation comme la différence entre la probabilité de dépassement de deux scénarios voisins P_j et P_{j+1}
 R = risque collectif exprimé en francs par année ou en nombre de décès par an

La présentation de base est la matrice de l'ampleur des dommages occasionnés aux différents objets dans les différents scénarios et les différentes situations d'exposition. De cette présentation, il est particulièrement facile de retracer la détermination du risque collectif, et de lire l'apport du dommage occasionné à certains objets bien définis à l'ampleur totale des dommages (tableau 3.5).

Les lignes de cette matrice représentent l'ampleur des dommages pour les différents objets ou groupes d'objets compte tenu des scénarios d'événements j et des situations d'exposition correspondantes k ainsi que leur somme. Les colonnes présentent la sommation sur les situations d'exposition et les scénarios d'événements. Cette forme de présentation permet d'évaluer la contribution des objets ainsi que des catégories d'objets à l'ampleur des dommages d'un scénario j . Enfin, elle permet aussi de faire une comparaison avec le potentiel de dommages dans le périmètre d'évaluation.

TABLE 3.5: Matrice avec représentation de l'ampleur des dommages pour tous les scénarios d'événements et toutes les situations d'exposition. Lorsque l'ampleur des dommages est pondérée, il faut en plus déterminer une matrice décrivant l'ampleur pondérée des dommages

Ampleur des dommages	SZ30				SZ100				SZ300				Somme
	ExSit1	ExSit2	ExSit3	ExSit4	ExSit1	ExSit2	ExSit3	ExSit4	ExSit1	ExSit2	ExSit3	ExSit4	
sans / avec aversion													
$Aw(PGm)_{j,k}$ ^a													$\sum_{j,k} Aw(PGm)_{j,k}$
$Aw(G)_j$ ^b													$\sum_j Aw(G)_j$
$Aw(PSm)_{j,k}$ ^c													$\sum_{j,k} Aw(PSm)_{j,k}$
$Aw(S)_j$ ^d													$\sum_j Aw(S)_j$
$Aw(PBm)_{j,k}$ ^e													$\sum_{j,k} Aw(PBm)_{j,k}$
$Aw(BPO)_j$ ^f													$\sum_j Aw(BPO)_j$
$Aw(BLO)_j$ ^g													$\sum_j Aw(BLO)_j$
$Aw(B)_j$ ^h													$\sum_j Aw(B)_j$
$Aw(L)_j$ ⁱ													$\sum_j Aw(L)_j$
$Aw(F)_j$ ^j													$\sum_j Aw(F)_j$
Somme ExSit ^k													
Somme scénarios ^l	A_{SZ30}				A_{SZ100}				A_{SZ300}				
Potentiel de dommages													

^a Ampleur des dommages aux personnes dans bâtiments (monétarisé) dans le scénario j et pour la situation d'exposition k ;

^b Ampleur des dommages aux bâtiments dans le scénario j ;

^c Ampleur des dommages aux personnes sur la route (monétarisé) dans le scénario j et pour la situation d'exposition k ;

^d Ampleur des dommages aux biens matériels dans le scénario j ;

^e Ampleur des dommages aux personnes sur une ligne ferroviaire (monétarisé) dans le scénario j et pour la situation d'exposition k ;

^f Ampleur des dommages aux objets ponctuels le long d'une ligne ferroviaire dans le scénario j ;

^g Ampleur des dommages aux objets linéaires dans le scénario j ;

^h Ampleur des dommages aux biens matériels dans le scénario j ;

ⁱ Ampleur des dommages aux réseaux de distribution d'énergie, d'eau et de communication dans le scénario j ;

^j Ampleur des dommages à l'agriculture et à la forêt dans le scénario j ;

^k Ampleur des dommages dans des situations d'exposition ;

^l Ampleur des dommages consécutifs aux scénarios.

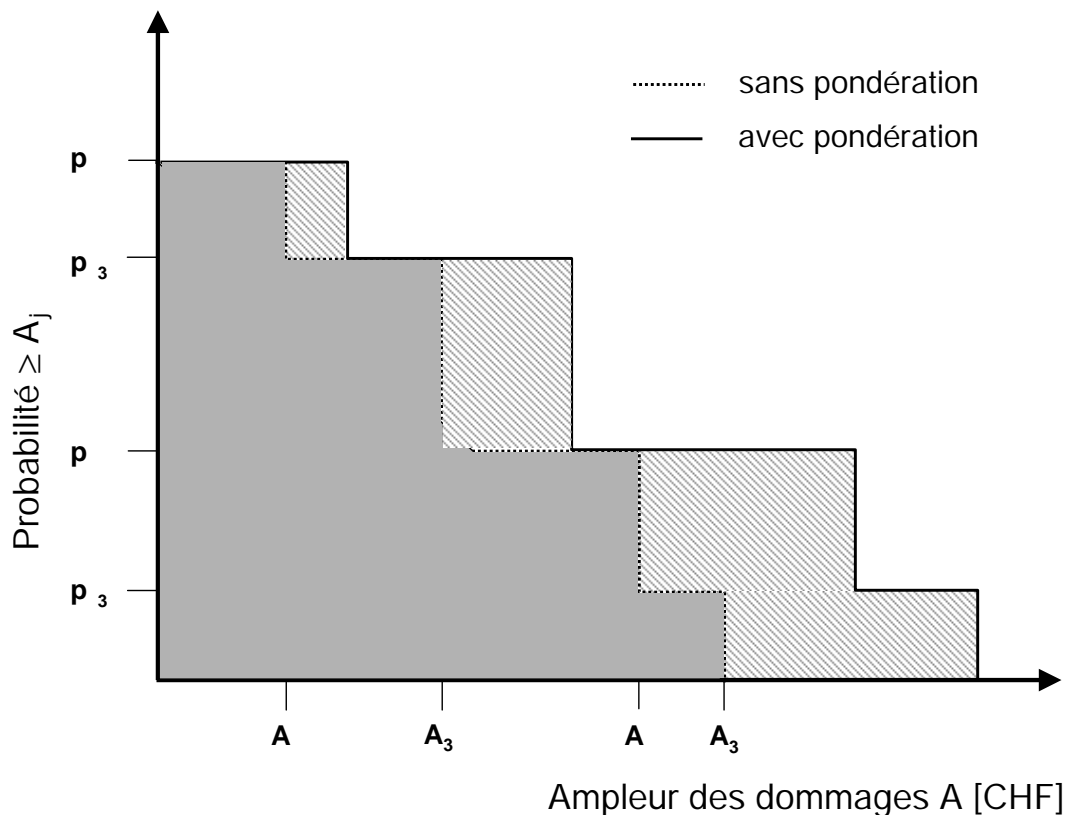


FIG. 3.4: Exemple de diagramme probabilité-conséquences sans et avec pondération (aversion). La surface grisée située au-dessous de la courbe en escalier correspond au risque effectif (non pondéré), la surface hachurée et grisée, au risque pondéré [47]

Le risque inhérent à différents scénarios peut être décrit par un diagramme probabilité-conséquences (diagramme PC ; figure 3.4). On le construit en reportant dans un diagramme les différents scénarios de dommages considérés, ordonnés selon leur ampleur et leur probabilité, et l'ampleur consécutive des dommages. La représentation de la somme des probabilités des scénarios (probabilité cumulative) avec l'ampleur correspondante des dommages génère une fonction en escalier (figure 3.4). Un tel diagramme est appelé diagramme probabilité-conséquences. On peut y lire la probabilité avec laquelle un dommage d'ampleur donnée est atteint ou dépassé.

Le risque collectif correspond ici à la surface située sous la courbe en escalier. La forme de cette courbe montre l'apport des scénarios considérés au risque total. Outre la valeur (isolée) cumulée pour le risque collectif, le risque devrait toujours être représenté dans un diagramme PC [47].

3.5.2 Risques individuels

Le calcul des risques individuels sert à identifier les personnes globalement les plus longtemps et les plus intensément menacées. Il ne s'agit donc pas, a priori, de déterminer les risques individuels de toutes les personnes, mais seulement ceux qui ont une valeur significative, voire critique. En général, cela concerne surtout les personnes résidant en permanence dans la zone dangereuse

et habitant dans des maisons particulièrement exposées. Les autres personnes pouvant être exposées à un risque individuel élevé sont celles qui se trouvent sur des voies de communication, qui traversent plusieurs fois par jour la zone dangereuse, ou encore des personnes se trouvant dehors.

Le risque individuel pour des personnes se trouvant dans des bâtiments est déterminé par :

$$A(PG)_{i,j} = p(rA)_j \cdot p(pr)_i \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot \lambda_j \quad [-] \quad (3.52)$$

$$r_{i,j} = p_j \cdot A(PG)_{i,j} \quad (3.53)$$

$$r_i = \sum_j r_{i,j} \quad (3.54)$$

Le risque individuel auquel sont exposées des personnes se trouvant sur des voies de communication est déterminé par :

$$A(PS)_{i,j} = p(rA)_j \cdot \frac{g_j \cdot z_i}{v} \cdot \lambda_j \quad [-] \quad (3.55)$$

$$r_{i,j} = p_j \cdot A(PS)_{i,j} \quad (3.56)$$

$$r_i = \sum_j r_{i,j} \quad (3.57)$$

La létalité qu'est valable pour le calcul est équivalent à la létalité moyenne d'un tronçon par intensité, selon :

$$\lambda_j = \frac{(\lambda_s \cdot g_s) + (\lambda_m \cdot g_m) + (\lambda_{st} \cdot g_{st})}{g_s + g_m + g_{st}} \quad [-] \quad (3.58)$$

$A(PG)_{i,j}$	=	ampleur des dommages individuels subis par une personne j dans un bâtiment dans le scénario j
$p(rA)_j$	=	probabilité d'occurrence spatiale du processus
ε_i	=	facteur de protection d'objet du bâtiment
$A(PS)_{i,j}$	=	ampleur individuelle des dommages subis par une personne j sur une voie de communication dans le scénario j
g_j	=	longueur du tronçon menacé [m]
z_i	=	nombre journalier de passages effectués par les personnes les plus exposées
v	=	vitesse moyenne sur le tronçon menacé [km/h]
λ_j	=	létalité moyenne dans un véhicule d'un tronçon menacé, qui est composé de la létalité par l'intensité faible (λ_s), moyenne (λ_m) et forte (λ_{st})
$r_{i,j}$	=	risque individuel pour une personne j dans le scénario j
p_j	=	fréquence du scénario j
r_i	=	risque individuel d'une personne i

Chapitre 4

Appréciation des risques et objectifs de protection

Le présent chapitre reprend la stratégie PLANAT de 2005 [56]. Au moment de l'impression du rapport, le concept proposé pour le projet B2.2 «Objectifs de protection» [24] était encore en cours d'élaboration. Les résultats seront intégrés ultérieurement.

4.1 Généralités

Une fois effectuée l'évaluation objective, systématique et transparente des risques existants grâce à l'analyse des risques, l'appréciation de ces derniers sert à examiner s'ils peuvent être supportés par la collectivité ou s'ils doivent être réduits. D'une part, cette appréciation est la base de la planification des mesures, d'autre part, seule une planification des mesures permet de montrer si les risques peuvent être réduits sans induire de coûts disproportionnés et si, partant, il est possible d'atteindre les objectifs de protection. Dans ce contexte, on entend par objectif de protection la mesure qui définit la limite des efforts à consentir pour protéger l'individu et la collectivité.

Dans l'appréciation des risques, il s'agit donc, d'une part, de trouver des critères clairs et transparents permettant de cerner les risques individuels et collectifs et, d'autre part, d'élaborer une démarche capable de circonscrire les risques de grande ampleur mais rares.

Etant donné que l'appréciation des risques est basée sur une échelle de valeur définie par la société, la question se pose de savoir qui est habilité à le faire : les critères d'appréciation peuvent-ils être fondés sur des estimations d'experts ou faut-il prendre pour référence la perception des risques par le grand public ? L'appréciation des risques est donc une sorte d'interface entre, d'un côté les sciences naturelles et les sciences de l'ingénieur et, de l'autre, les sciences humaines.

Une démarche pragmatique peut donc consister à compléter une analyse technique fondée sur les sciences naturelles par une perception intuitive des risques, afin d'établir des critères judicieux pour apprécier les risques [47]. Souvent, ces critères sont définis de manière non pas explicite, mais implicite, par les usages en vigueur.

La démarche proposée dans les pages qui suivent sert à réaliser une appréciation globale des risques compte tenu d'objectifs de protection de portée générale. Elle repose, d'une part, sur un

modèle de base logique et, d'autre part, sur des valeurs empiriques qui se déduisent des usages actuels de la société. On admet que ces considérations sont valables pour la majorité des risques, donc en particulier pour les risques consécutifs à des dangers naturels [66]. Mais comme de par sa nature-même, une décision implicite, non transparente, ne peut pas être cohérente, il est absolument indispensable de soumettre cette base empirique à une interprétation.

4.2 Objectifs de protection liés aux risques de dommages corporels

La protection de la vie humaine revêt une grande importance, tant dans le cas des dangers naturels que dans celui des dangers techniques, parce que la vie est extrêmement précieuse tout en étant très difficile à évaluer.

4.2.1 Approche méthodologique des critères définissant les objectifs de protection

A priori, cette évaluation doit être axée sur deux paramètres, le risque individuel et le risque collectif. Ce qui est prépondérant, c'est que ces deux paramètres impliquent deux objectifs totalement différents posés à la sécurité.

1. **Besoin de sécurité de l'individu** : le risque individuel décrit l'ampleur du risque que court un individu de perdre la vie lorsqu'il est exposé à un danger. Se pose alors la question du risque admissible. La réponse à cette question est donnée par la valeur r_i du risque individuel qu'il s'agit de limiter.
2. **Besoin de sécurité de la collectivité** : même si les risques individuels pesant sur toutes les personnes menacées sont assez faibles, il peut demeurer un risque collectif élevé (en terme de nombre de victimes) lorsque beaucoup de personnes sont exposées à un risque individuel faible (voir aussi la figure 2.2, p. 7). Par conséquent, le besoin de sécurité n'est pas satisfait même lorsque toutes les personnes courent un risque individuel suffisamment faible. Les victimes sont alors pour ainsi dire des personnes aléatoires et anonymes, et non pas des personnes prédestinées à devenir des victimes en raison de leur risque individuel élevé.

La société a un intérêt à minimiser le nombre total de victimes, indépendamment du fait qu'il s'agisse de personnes présentant un risque individuel élevé ou faible. En l'occurrence, dans la définition d'objectifs de protection pour la collectivité, il ne s'agit plus de définir un risque admissible pour diverses situations de risques, mais de minimiser le nombre de victimes dans le système considéré globalement (p. ex. un pays), compte tenu de l'ensemble des moyens à disposition. Il s'agit dès lors d'une tâche d'optimisation.

Cette optimisation demande que, dans toutes les situations de risque, des efforts soient consentis au profit de la sécurité à concurrence des mêmes coûts marginaux (montant déterminé par décès évité ou valeur d'une vie statistique¹). Les coûts marginaux des efforts consentis pour la sécurité peuvent donc être considérés comme le critère définissant l'objectif de sécurité dans le cas du risque collectif. Considérés comme montant limite des efforts devant être consentis pour la sécurité, les coûts marginaux ne doivent toutefois pas être interprétés comme découlant du fait que

¹ appelée en anglais «value of statistical life» (VSL).

l'on va attribuer une valeur à la vie humaine. Les coûts que la collectivité est prête à payer (ou qu'elle est en mesure de payer) pour éviter un décès n'ont rien à voir avec la valeur d'une vie humaine. Même si la vie humaine a une valeur infinie, la collectivité est dans l'impossibilité de dépenser une somme infinie pour la sauver, et elle ne va pas le faire. En revanche, le critère des coûts marginaux est celui qui permet d'éviter le plus de décès compte tenu des ressources dont une collectivité dispose.

Cet aspect revêt une importance toute particulière lorsque les risques de dommages corporels doivent être exprimés en unités monétaires dans le cadre de la planification des mesures, afin que l'on puisse utiliser la même unité (unités monétaires, p. ex. francs) que pour les risques matériels. Dans ce contexte, la monétarisation ne doit donc pas être interprétée comme une quantification du prix de la vie humaine, mais comme une évaluation du coût à payer pour éviter un décès.

4.2.2 Distinction entre catégories de risques

Avant d'aborder la quantification des objectifs de protection discutés plus haut, il importe d'introduire un autre élément, qui a une incidence sur la fixation de ces objectifs. Cela tient notamment au fait que les risques ne peuvent pas tous être traités sur un pied d'égalité.

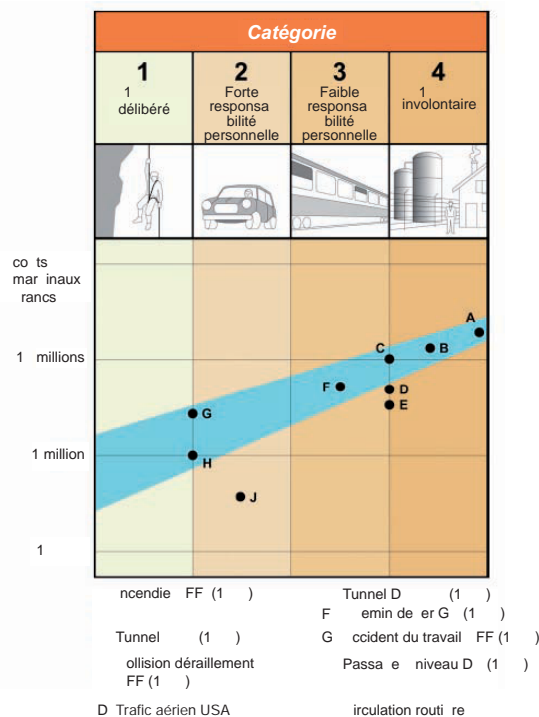


FIG. 4.1: Catégories de risques et fixation des coûts marginaux pour des risques techniques comme base du système d'évaluation des dangers naturels [2]

Dans les années 60 déjà, on avait relevé pour la première fois que l'on constatait une différence d'un facteur 1000 [74] dans l'acceptation de risques suivant que l'on y était exposé délibérément ou involontairement. Cela concerne les risques individuels. A partir de cette première piste, on a

élaboré par la suite un concept différencié de catégories de risques, qui met en évidence l'acceptation des risques en fonction du degré d'autodétermination et de l'immédiateté du bénéfice ressenti par les personnes concernées.

La figure 4.1 ventile dans quatre catégories l'éventail des risques pris délibérément ou involontairement. Ces catégories peuvent être appliquées aussi bien au risque individuel qu'au risque collectif. Elles impliquent une compréhension différenciée du rapport entre responsabilité sociale et responsabilité individuelle dans des situations de risque, un problème au demeurant très bien connu dans les dangers naturels. Ces catégories de risques constituent donc une base valable pour différencier ces objectifs de protection.

4.2.3 Proposition d'objectifs de protection applicables aux personnes

Alors que l'approche qualitative ou méthodologique ne constitue pas une appréciation des objectifs de protection, la quantification de ces derniers requiert indiscutablement une appréciation. La proposition de PLANAT repose sur des considérations et des éléments développés pour analyser des risques techniques [48]. Elle s'applique en principe à tous les genres de risques car on peut admettre qu'il n'y a aucune raison plausible de faire une distinction entre dommages et victimes générés par différents genres de dangers.

Les valeurs limites ou les objectifs de protection proposés par PLANAT pour le risque individuel de décès et pour les coûts marginaux dans l'optique du risque collectif sont réunis dans le tableau 4.1 (objectifs de protection de PLANAT).

Les objectifs de protection présentés dans le tableau 4.1 doivent encore être simplifiés dans l'optique de leur application pratique. Ainsi, la catégorie 1 peut être négligée dans le contexte de la planification des mesures en zone urbaine et sur les axes de communication. Sont surtout déterminantes les catégories de risques 2 à 4, compte également tenu que la distinction est quasiment impossible entre les catégories 3 et 4. De facto, on peut donc définir deux catégories pour les risques individuels (tableau 4.2).

La définition des valeurs limites du tableau 4.2 se justifie par la proposition de PLANAT (tableau 4.1) et par les objectifs de protection fixés dans différents cantons (Berne², Tessin).

Lorsqu'on traite les risques collectifs, il est plus difficile d'en faire des catégories étant donné qu'il est quasiment impossible de concevoir une protection de personnes dans un périmètre donné sur la base d'objectifs de protection divergents. Proposition est donc faite, s'agissant des risques collectifs, de classer systématiquement les personnes potentiellement concernées dans la catégorie 3 des objectifs de protection de PLANAT. **Dans cette catégorie, les coûts marginaux destinés à éviter un décès sont donc fixés de manière uniforme à 5 millions de francs.**

Une planification systématique de la sécurité doit donc avoir pour but tout à la fois d'optimiser l'utilisation des moyens financiers par une application cohérente d'objectifs de protection uniformes, et de garantir l'application de standards de sécurité uniformes. Cela correspond aux deux principaux objectifs de la vision et de la stratégie PLANAT [56]. Une sécurité uniforme peut être assurée par des valeurs maximales garanties du risque individuel ainsi que par des efforts

² Risikostrategie Naturgefahren : Ergebnissicherung der Klausursitzung des Regierungsrates vom 10. August 2005.

identiques consentis pour la sécurité face à des risques collectifs (respect des critères des coûts marginaux) [48].

4.3 Objectifs de protection relatifs à d'autres genres de dommages

4.3.1 Biens matériels

Par biens matériels, on entend les bâtiments, l'infrastructure, les voies de communication et les véhicules, ainsi que les surfaces agricoles et forestières utiles.

En principe, on admet qu'il ne faudrait pas investir plus d'un franc en mesures de sécurité par franc de dommages matériels potentiels évités, y compris les dommages subséquents et compte tenu des prestations d'assurance. Dans la pratique, cette démarche pose des problèmes puisque, bien souvent, les dommages matériels calculés n'incluent pas les dommages subséquents indirects parfois très lourds, et parce que les mesures mises en œuvre dans l'optique de respecter le rapport 1 : 1 proposé n'offrent qu'une protection insuffisante. Dans les cas où l'on s'attend à des dommages subséquents indirects importants, on peut aussi investir proportionnellement plus. Ce faisant, on tient compte du fait que :

TAB. 4.1: Objectifs de protection de PLANAT pour les risques individuels et collectifs de dommages corporels

Catégorie de risque	Risque individuel de décès Valeur maximale de la probabilité annuelle de décès	Risque collectif. Coûts marginaux des décès évités (mio de francs)	Exemple
Catégorie 1 100 % délibéré	$10^{-2} - 10^{-3}$	1 – 2	Personnes, ne respectant pas, délibérément, les interdictions par danger accru
Catégorie 2 Forte responsabilité personnelle	$10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4}$	2 – 5	Personnes capables d'estimer la situation de danger et se mettant consciemment en danger
Catégorie 3 Faible responsabilité personnelle	$2 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-5}$	5 – 10	Personnes totalement ou dans une large mesure non concernées, qui se mettent
Catégorie 4 100 % involontaire	$3 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-6}$	10 – 20	en danger plus ou moins involontairement

TAB. 4.2: Proposition d'objectifs de protection pour les risques individuels sur la base des objectifs de protection de PLANAT et des objectifs en usage dans les cantons

Catégorie de risque	Risque individuel de décès valeur annuelle maximale	Exemple
Forte responsabilité personnelle	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	Chauffeurs professionnels de poids, lourds, déneigement, etc.
Responsabilité personnelle faible à nulle	$\leq 1 \cdot 10^{-5}$	Usagers de la route, passagers de trains, riverains, etc.

- les dommages subséquents indirects sont souvent difficiles à chiffrer au moment où l'on détermine les dommages potentiels ; et que
- dans certaines situations, il vaut mieux éviter un dommage que miser sur sa réparation.

A l'appui des objectifs de protection esquissés dans la stratégie PLANAT, on propose, pour la planification de mesures, d'appliquer un rapport de 1 :1 entre les coûts des mesures et les dommages matériels. Si l'on s'attend à des dommages subséquents élevés, alors on peut proposer de les déclarer clairement comme des dommages matériels indirects et les intégrer dans l'analyse des risques et dans la planification des mesures. Le chapitre 3.4.4 (page 33) donne quelques exemples de dommages subséquents. Une possibilité d'intégrer les dommages indirects à l'aide d'un «facteur complémentaire de dommages» (Schadenergänzungsfaktor) a été esquissée dans le cadre du projet A2 «Aversion» [23].

4.3.2 Risques spéciaux

La stratégie PLANAT considère déjà que la protection d'infrastructures et de biens culturels particuliers doit s'effectuer sur la base de critères globaux. Les concepts de protection doivent tenir compte de leurs fonctions et de leur importance, en particulier lorsqu'il s'agit d'infrastructures vitales telles que des hôpitaux, la distribution d'eau, la distribution d'électricité, etc. Dans ces concepts de protection, les dangers naturels ne constituent qu'une des menaces potentielles. Les hypothèses quant aux menaces pesant sur ces objets doivent être formulées en fonction de critères uniformes. Suivant l'importance de ces infrastructures, il peut être nécessaire d'investir davantage dans des mesures de protection qu'il ne le faudrait en vertu de la seule valeur matérielle des dommages attendus. Il faudrait donc, dans la mesure du possible, chiffrer les effets indirects potentiels liés à la défaillance de dispositifs d'approvisionnement. Lorsqu'on est dans l'impossibilité de le faire, la prise en compte d'un facteur complémentaire de dommages [23] est une voie possible.

S'agissant des biens culturels, les dangers naturels ne constituent également qu'un des nombreux scénarios de menace possibles. Il en va de même pour les objets particulièrement dignes de protection sur le plan écologique.

La protection de collectivités politiques et de systèmes socio-économiques, tels ceux mentionnés dans la stratégie, est un sujet particulier très complexe. Elle fait en partie l'objet des réflexions

actuelles traitées sous l'angle de l'aversion pour le risque, réflexions qui n'ont pas été poussées plus avant jusqu'à présent. Pour le moment, il n'existe pas d'éléments permettant de la chiffrer. Il ne reste donc que la possibilité de la prendre en considération de manière qualitative et d'en faire une évaluation globale.

Dans tous les cas, il est nécessaire de définir clairement les hypothèses avancées, et de les communiquer ouvertement afin de garantir une planification transparente de la sécurité.

4.4 Aversion pour le risque

Par aversion pour le risque, on entend la pondération de l'ampleur des dommages ; Jusqu'à présent, on a réuni sous ce titre des phénomènes différents. Aujourd'hui, les nouvelles approches [3] ont permis de distinguer trois effets, qui seront décrits plus en détail :

1. Augmentation qualitative et croissance disproportionnée d'effets négatifs indirects d'événements causant des dommages, qui ne sont généralement pas pris en compte par des indicateurs de dommages (dommages socio-économiques globaux) ;
2. Incertitude dans l'estimation de la fréquence et de l'ampleur (des dommages) ;
3. Attitude intrinsèque face aux risques : attitude de rejet face à la possibilité que surviennent des événements pouvant générer de très importants dommages.

La pondération reposant sur le premier aspect sert à estimer l'ampleur de dommages et devrait faire, stricto sensu, partie intégrante de l'analyse des risques. Cette pondération doit être opérée lorsqu'un calcul exact des dommages directs et indirects n'est pas possible pour chaque scénario, mais que l'on doit extrapoler l'ampleur totale des dommages à partir de quelques indicateurs.

La pondération basée sur les deuxième et troisième aspects peut aussi être considérée comme une aversion pour le risque et est un élément de l'appréciation des risques effectuée par la société ou par l'organe ayant pouvoir décisionnel. Toutefois, comme le risque inhérent aux différents scénarios est pondéré et qu'il est introduit mathématiquement dans la détermination du risque collectif, cette réflexion doit déjà se faire dans l'analyse des risques.

4.4.1 Les trois effets de l'aversion pour le risque

4.4.1.1 Augmentation qualitative et croissance disproportionnée d'effets négatifs indirects d'événements causant des dommages

Du fait de l'accroissement des dommages observés, les catastrophes émeuvent des milieux plus nombreux, et se répercutent de manière toujours plus complexe sur le tissu socio-économique d'une collectivité. De plus, les coûts de remise en état et de régénération augmentent de manière disproportionnée. Cette augmentation qualitative et cette croissance disproportionnée des dommages sont prises en compte par un facteur complémentaire de dommages f , qui constitue ainsi une approximation des dommages totaux effectifs. Théoriquement, son appréciation peut être appuyée d'une manière assez objective sur des analyses technico-économiques. On peut prendre pour

base l'évaluation de dommages causés par des événements réels. Toutefois, il faut être attentif au fait que l'extension des catégories de dommages dépend en principe du système considéré, et que le facteur complémentaire de dommages varie donc théoriquement d'un système à l'autre.

Incertitude croissante quant à l'estimation quantitative de risques. En général, l'incertitude augmente dans la quantification des risques lorsque la fréquence d'un processus diminue et que l'ampleur de ses dommages augmente. Les valeurs empiriques concrètes passent de plus en plus vite au second plan et doivent laisser la place à des estimations analytiques, voire même à des estimations intuitives d'experts. Cela génère souvent un certain scepticisme chez les responsables de systèmes ou les responsables politiques et dans le grand public, tous réclamant de la prudence. Cela correspond au principe de prévention inscrit dans le droit, qui veut qu'une prudence particulière soit observée lorsqu'une grande incertitude règne face à des risques potentiellement graves.

Pour donner corps à cette prudence, il pondérer les meilleures estimations possibles avec un facteur de sécurité uniforme ou adapté à la connaissance que l'on a du système considéré, plutôt que d'appliquer dans l'estimation des risques, en différents endroits, ce qu'on appelle des estimations conservatives, autrement dit, de s'en tenir toujours au pire des scénarios. Un des atouts de la pondération avec un facteur de sécurité réside dans le fait que cela permet, dans l'analyse, de définir quel intervalle de confiance on utilisera et avec quelle marge de sécurité le risque effectif ne sera pas sous-estimé. Il s'agit ici d'une appréciation sociale (degré de prudence [ou d'aversion] face à des événements catastrophiques), qui peut donc être opérée de manière transparente et ne dépend pas de la responsabilité de ceux qui élaborent l'analyse des risques.

Incertitude croissante dans l'estimation de la probabilité d'occurrence. S'il est impossible de réduire suffisamment les dommages de sinistres potentiellement graves, voire de catastrophes, par des mesures de sécurité, il faut s'assurer que ces événements seront suffisamment improbables. Dans la plupart des systèmes, il reste finalement toujours des événements potentiels pouvant causer des dommages graves – voire constituant une menace pour la vie – qui peuvent être considérés comme suffisamment improbables en raison de leur rareté (p. ex. déclenchement d'une catastrophe par un tremblement de terre d'une intensité extrême). Souvent, ces événements ne sont même pas pris en compte dans l'analyse.

En général, la fiabilité de la détermination de fréquences d'événements diminue avec la rareté de ces derniers. Tandis que la fréquence d'événements réguliers peut être étayée par des statistiques, celle d'événements très rares ne peut être estimée que par des considérations théoriques ou même par des estimations d'experts, et cela justement dans le cas de grands événements particulièrement critiques.

4.4.1.2 Incertitude croissante dans le pronostic de dommages

Dans la prévision de l'ampleur des dommages, l'incertitude augmente généralement aussi avec la dimension d'un événement. Les scénarios, en particulier, deviennent de plus en plus complexes. Mais il y a aussi les lacunes techniques et scientifiques (p. ex. vulnérabilités) qui, s'additionnant les unes aux autres, pèsent toujours plus lourdement. Là également, on peut de moins en moins recourir à l'expérience et à l'évaluation d'événements passés. Parfois, il faut se référer à des impacts

qu'aucun modèle mathématique reconnu ne décrit actuellement. Il est nécessaire d'en passer par des calculs théoriques qui, forcément, s'appuient sur des hypothèses et des estimations avancées par des experts. Or, en vertu du concept de l'analyse des risques, ces estimations ne devraient pas simplement être considérées comme les pires hypothèses, mais bien être représentatives des dommages attendus pour le scénario considéré, établies en parfaite connaissance de cause et compte tenu des meilleures expériences.

4.4.1.3 Responsabilité en cas d'événements générant des dommages d'une ampleur extraordinaire

Cet effet décrit l'aversion au sens strict, appelée aussi attitude intrinsèque face au risque, d'après la théorie de la décision. Selon celle-ci, les personnes qui éprouvent une aversion pour les risques préfèrent la sûreté d'une perte minimale à l'incertitude d'une situation de risque générant une perte de même valeur attendue. Cela s'explique par le fait que l'on tient pour maîtrisable la valeur attendue, généralement minimale, de grands sinistres rares, tandis que la possibilité que l'événement se produise effectivement induit la menace de dommages d'une ampleur potentiellement non maîtrisable. Le fait d'avoir une préférence pour des dommages certains, mais maîtrisables, représente ainsi une sorte de protection rationnellement justifiable. L'assurance responsabilité civile privée, très répandue, est un exemple d'une telle protection.

L'attitude intrinsèque face au risque est particulièrement marquée lorsque, face à des événements rares générant des dommages de grande ampleur pouvant même menacer la vie, on se trouve assez éloigné de ce que l'expérience connaît par les statistiques, et, par conséquent, du champ de validité des modèles statistiques tels que l'exprime la valeur attendue $R = \sum p_j \cdot A$ pour les événements rares causant des dommages de grande ampleur.

4.4.2 Proposition de facteurs d'aversion

La subdivision décrite de l'aversion pour le risque a été développée dans le cadre du projet de plan d'action PLANAT B 2.1 «Aversion». Comme l'application de ce concept n'est pas encore définitivement fixée dans la pratique, le présent guide propose dans un premier temps de continuer à utiliser un facteur. Celui-ci correspond à la quantification exposée dans le projet B 2.1. Cette proposition est illustrée à la figure 4.2 pour la fonction de l'aversion pour le risque y compris le facteur complémentaire de dommages f .

Pour le moment, la fonction d'aversion se rapporte à l'indicateur de dommages «victimes». Il est proposé d'appliquer la fonction sous cette forme à d'autres dommages également aussi longtemps que l'on n'aura pas acquis de nouvelles connaissances à propos d'autres indicateurs de dommages. A cet effet, il faut multiplier le nombre de victimes par les coûts marginaux appropriés dans chaque cas de figure.

Fonction pour le facteur sectoriel f :

$$f = 10^{0.001 \log x^4 - 0.0119 \log x^3 + 0.0208 \log x^2 + 0.1931 \log x - 0.0001} \quad (4.1)$$

Fonction pour tous les facteurs sectoriels f , ϕ_{1+2} et ϕ_3 :

$$y(f, \phi_{1+2}, \phi_3) = 10^{\frac{1}{\log(300)} \cdot \log(x)} \quad \text{für } 1 < x < 300 \quad (4.2)$$

$$y(f, \phi_{1+2}, \phi_3) = 10^{-0.0418 \log x^2 + 0.5515 \log x - 0.1064} \quad \text{für } 300 < x < 1'000'000 \quad (4.3)$$

Fonction pour tous les facteurs sectoriels (éléments de l'aversion) :

$$\phi(\phi_{1+2}, \phi_3) = 10^{-0.0036 \log x^3 + 0.02011 \log x^2 + 0.186 \log x} \quad (4.4)$$

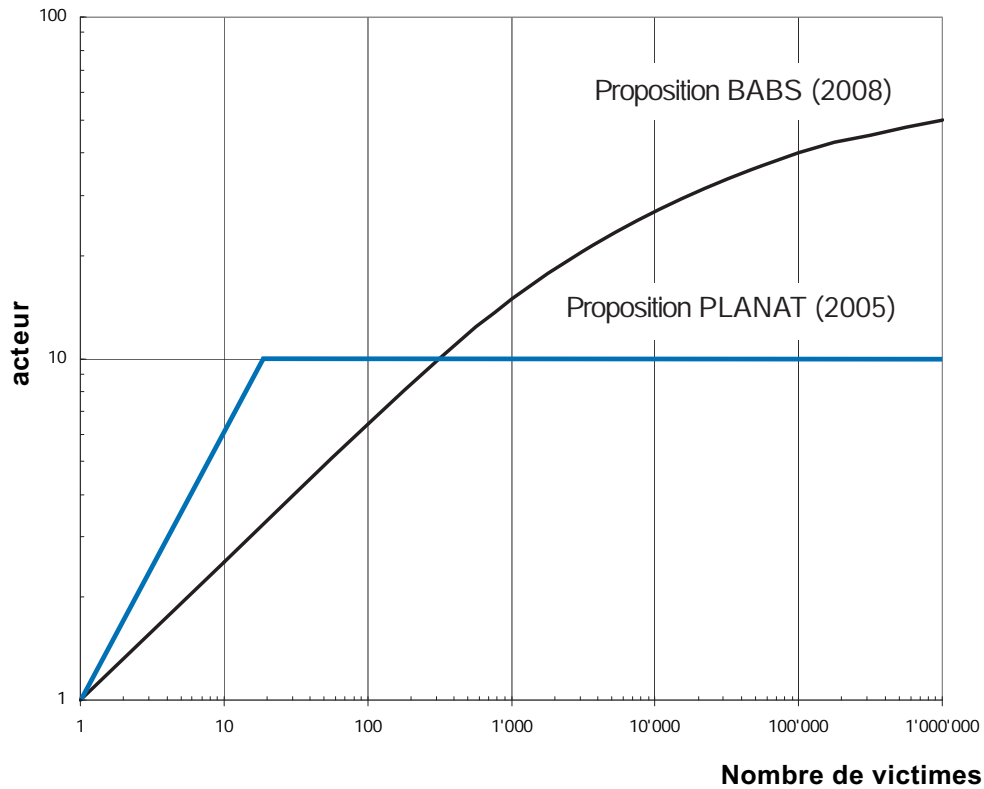


FIG. 4.2: Proposition pour une nouvelle aversion pour le risque composée de facteurs sectoriels (non indiquée, ligne noire) et fonction selon la stratégie PLANAT (ligne bleue)

Chapitre 5

Planification et appréciation des mesures

5.1 Objectif

Les résultats de l'analyse et de l'appréciation des risques constituent la base de la planification et de l'appréciation des mesures, troisième étape du concept de risque. Celle-ci consiste à développer des mesures de protection possibles ou des combinaisons de mesures, et à les analyser quant à leur efficacité et à leurs coûts.

La planification des mesures a pour but de trouver les mesures ou les trains de mesures qui

1. réduisent de manière optimale les risques collectifs au sens de l'efficacité économique, en vertu du principe des coûts marginaux, et
2. réduisent au besoin les risques individuels au-dessous d'une probabilité annuelle de décès de $1 \cdot 10^{-4}$ ou $1 \cdot 10^{-5}$ (voir chapitre 4.2.3).

Par ailleurs, les mesures ou combinaisons de mesures entrant en ligne de compte doivent être analysées dans l'optique d'autres facteurs. Ainsi,

- les mesures doivent répondre aux critères relevant de l'impact sur l'environnement (p. ex. protection des paysages);
- elles ne doivent pas reporter les coûts en priorité sur les générations futures (principe du développement durable¹);
- des contraintes telles que les conditions d'évacuation ou de fermeture des routes doivent être supportables et proportionnées².

¹ Rapport Brundtland, 1987 : par développement durable, on entend «la satisfaction des besoins de la génération actuelle, sans menacer les possibilités pour les générations futures de satisfaire leurs propres besoins».

² Supportabilité et proportionnalité sont des notions floues. Appliquées dans un cas concret pour justifier un besoin de protection plus élevé, elles requièrent une formulation contraignante. La stratégie des risques du canton de Berne propose, p. ex., de fixer pour les voies de communication des impératifs de disponibilité en fonction de leur importance. Un tel impératif pourrait être formulé en ces termes : «tel que la ligne ferroviaire doive être interrompue au plus quelques heures tous les dix ans et au plus une semaine tous les trente ans.»

La planification est dans une large mesure un processus créatif, dont la réalisation n'obéit pas à une systématique parfaitement rigoureuse. Cela se reflète en particulier dans le développement de combinaisons optimales. Une combinaison appropriée permet, par exemple, de compenser certains points faibles, de réduire des incertitudes grâce à des actions redondantes ou de réduire l'ampleur des mesures et, de cette façon, de diminuer les coûts et d'améliorer la réceptivité de la part des collectivités concernées.

Enfin, la qualité de la planification des mesures ne peut jamais être meilleure que la base de départ mise en place. Il n'est pas possible d'intégrer dans l'appréciation ce qui n'est pas pris en compte en tant que mesure. C'est pour cette raison qu'il est important de pouvoir s'appuyer sur des expertises, sur l'expérience et sur les informations fournies par des personnes directement touchées.

5.2 Mesures de protection possibles

A priori, toutes les mesures plausibles et judicieuses de prévention et d'intervention sont intégrées dans la planification des mesures³. Elles peuvent être subdivisées en quatre groupes :

- Mesures d'aménagement du territoire : des contraintes relevant de l'aménagement du territoire favorisent une utilisation de l'espace adaptée à la situation de danger.
- Mesures techniques de construction : d'une part, des corrections de cours d'eau peuvent empêcher ou juguler le départ, le développement ainsi que l'extension de processus dangereux. D'autre part, des interventions techniques au niveau des constructions augmentent la résistance des objets potentiellement menacés.
- Mesures biologiques : l'effet stabilisateur des végétaux peut, spécialement dans le cas de processus gravitationnels, être utilisé pour empêcher, freiner ou juguler des mouvements.
- Mesures organisationnelles : la préparation à un événement, l'alarme ainsi qu'une intervention durant des situations et des événements critiques peuvent diminuer les dommages.

Les mesures d'aménagement du territoire jouent un rôle capital dans la gestion et le contrôle des risques à long terme. On leur attribue donc une fonction importante dans la gestion intégrée des dangers naturels. Cependant, le présent guide se concentre sur l'analyse et la résolution de problèmes de sécurité aigus. Il met plutôt en exergue des mesures appartenant aux trois autres groupes, mesures qui peuvent être appliquées activement et relativement à court terme en vue de réduire les risques. Le déplacement de populations doit être considéré comme un cas spécial ; il fait partie des mesures d'aménagement du territoire et permet, au besoin, d'opérer de grands changements sur des laps de temps relativement courts. En revanche, la protection des objets – même si elle est en général juridiquement forcée par les plans d'affectation – relève des mesures techniques de construction. Une autre mesure d'aménagement du territoire est la limitation d'utilisation, qui assure que des personnes (ou des biens matériels) ne seront pas présentes au moment d'une menace potentielle.

La réalisation de mesures de protection est opportune tant que les risques sont trop élevés en vertu de l'appréciation qui en est faite, ou qu'ils peuvent être réduits de manière économiquement

³ La remise en état est le troisième élément du cycle de gestion intégrée des risques. Au contraire de la prévention et de l'intervention, elle n'a pas pour but d'éviter ou de réduire des dommages potentiels, mais de préparer (p. ex. assurances, fonds) et de réaliser rapidement des travaux de réparation adaptés à la (nouvelle) situation consécutive à des événements.

optimale. Si les risques individuels sont suffisamment faibles ou s'il n'y a pas (ou plus) de proportionnalité économique, que ce soit parce qu'on a trouvé la combinaison optimale de mesures ou parce qu'aucune mesure de protection n'est nécessaire ou efficace, les mesures d'aménagement du territoire offrent la palette d'instruments propices à une autre affectation du territoire sans accroître des risques existants, ni en créer de nouveaux. Elles forment dans une certaine mesure le cadre dans lequel il sera possible d'utiliser le territoire d'une manière cohérente sous l'angle des risques. C'est la raison pour laquelle les considérations relevant de l'aménagement du territoire sont indissociables d'une planification intégrée des mesures, mais qu'elles ne peuvent pas, dans tous les cas, être évaluées suivant les critères applicables aux autres mesures, à savoir les coûts marginaux et l'objectif de protection contre les risques individuels.

5.3 Evolution en fonction du temps

D'une part, les analyses des risques et les planifications des mesures sont des photographies. D'autre part, elles comportent une forte composante temporelle, axée sur le futur. On le constate en particulier dans le cas des mesures générant de grandes modifications au fil du temps, notamment les interventions biologiques (p. ex. reforestations) ou la réglementation de l'utilisation du territoire par l'intermédiaire des plans d'affectation.

En principe, le concept de risque permet aussi de considérer les risques de manière différenciée sur l'échelle du temps et, par exemple, d'envisager des situations d'exposition (voir chap. 3.3.3) à caractère prévisionnel ou de faire une évaluation circonstanciée de l'impact (croissant ou décroissant) de mesures de protection et, ainsi, d'obtenir une estimation quantitative des risques futurs. Cette considération de détail n'est pas explicitement exclue ici. on recommande toutefois d'appliquer au cas normal les simplifications ci-dessous :

- L'impact des déplacements de populations possibilité inhérente aux mesures d'aménagement du territoire et spécialement prise en compte ici, n'est en soi pas difficile à estimer. Il en va tout autrement de leur réalisation : avec quelle rapidité les interventions pour le moins massives seront-elles opérées, ou des solutions seront-elles trouvées avec les personnes touchées ? Si, dans le cas concret, ces déplacements sont effectivement pris en considération comme étant une solution possible – ce qui présuppose notamment des réflexions quant à leur acceptation et à leur faisabilité –, il faut apprécier les mesures à partir de l'idée que leur réalisation peut s'étaler sur des périodes similaires à d'autres mesures.
- Les coûts et l'impact de mesures techniques de construction se produisent essentiellement à partir de leur réalisation⁴. L'appréciation est donc relativement peu problématique. Les coûts générés plus tard (p. ex. l'entretien) sont pris en compte dans le calcul des coûts.
- En général, le coût des mesures biologiques se produit dès le début du projet, tandis qu'il faut compter avec des retards dans la manifestation de leurs effets (p. ex. développement de plantations). C'est pourquoi il faut baser leur efficacité uniquement sur les composants dont les effets sont « certains » dès le début (p. ex. composants techniques). Suivant la situation, les mesures

⁴Entre le processus de planification et la réalisation effective d'ouvrages de protection, soit leur achèvement, il peut se passer plusieurs années, et cela, pour diverses raisons. Durant cette période, les paramètres initiaux de l'analyse des risques peuvent changer, en particulier le dommage potentiel. Mais on admet que ces changements se situent dans le domaine d'incertitude de l'estimation des risques. Par conséquent, une considération statique des risques reste admise pour l'appréciation des mesures.

développant des effets «incertains» (p. ex. développement de la végétation) ne peuvent pas être prises en considération ou seulement avec un effet réduit. Conséquence : les coûts affluent dès le début, mais les effets appropriés ne surviennent qu'avec retard. Le cas échéant, on peut atténuer financièrement ce phénomène en admettant par hypothèse que les mesures biologiques s'étalent sur une longue durée.

L'essentiel des considérations exposées ci-dessus à propos des mesures techniques de construction vaut aussi pour les mesures organisationnelles : leurs coûts et leur efficacité se produisent durant la phase de mise en place de quelques années. Par conséquent, on peut souvent attendre un effet à court terme déjà, celui-ci pouvant se manifester très différemment suivant la situation (p. ex. bases et instruments existants, expériences). Avec le temps, des mesures organisationnelles peuvent se développer positivement du fait de l'étendue croissante des expériences. Cependant, il demeure des incertitudes quant à leur pérennité (existence à long terme d'un service d'alerte et d'un service de secours).

Une question essentielle demeure : faut-il considérer une éventuelle «plus-value» ultérieure, consécutive à l'intensification de l'utilisation du territoire, de mesures de protection contre les dangers. En général de tels scénarios sont économiquement avantageux lorsque les hypothèses adéquates sont formulées, mais il faut les analyser au préalable. Sous l'angle de l'appréciation des mesures, de telles considérations ne doivent pas être exclues a priori. Mais il faut se souvenir qu'un scénario n'est justifié que dans deux cas : premièrement, s'il existe des intentions concrètes de construire et, deuxièmement, si l'on ne dispose pas de sites de remplacement plus propices. Ce dernier cas semble être plutôt rare dans l'optique du bailleur de subventions. Même si le bénéficiaire concret n'est pas déterminant sous l'angle économique, ce genre de considération pose la question de la justice distributive : est-il acceptable de favoriser plutôt les propriétaires fonciers touchés ou plutôt la commune ?

Dans la perspective de la décision économique de mettre en œuvre des mesures, la règle veut qu'une mesure de protection soit économiquement proportionnée à la situation actuelle. Dans des cas justifiés – par exemple lorsque, pour différentes raisons, une utilisation plus intense du territoire serait propice sur le site considéré –, des scénarios prospectifs peuvent être pris en compte en guise d'informations complémentaires et influencer la décision lorsque d'autres mesures équivalentes entrent en ligne de compte.

5.4 Démarche

A priori, on peut admettre que la planification des mesures au sens strict (technique) est opérée en vertu de l'état actuel des connaissances, et qu'elle tient compte des bases techniques. Le travail peut se dérouler de la manière suivante (figure 5.1) :

Déclencheur : la planification des mesures est lancée à partir des résultats de l'analyse et de l'appréciation des risques, lesquelles sont elles-mêmes réalisées en raison d'un déficit de sécurité présumé.

Planification des mesures : les mesures isolées et les combinaisons de mesures possibles sont élaborées à partir du risque actuel. En général, d'autres études spécifiques aux mesures sont nécessaires pour que la planification puisse avoir la précision voulue. Ainsi, dans le

cas de corrections de cours d'eau, il faut connaître le type d'ouvrage, ses dimensions et son extension, mais aussi des conditions-cadre telles que le terrain ou son équipement, et en tenir compte. Ces informations sont nécessaires tant pour l'analyse des risques après réalisation des mesures que pour le calcul des coûts.

Détermination de l'efficacité et des coûts : ici, on établit l'aptitude de ces mesures à réduire les risques, et leurs coûts. Chiffrer la réduction des risques requiert une nouvelle analyse de ceux-ci. Suivant la mesure, soit on réadapte les scénarios d'événements et les cartes d'intensités, soit on élabore de nouvelles situations d'exposition et on en détermine les conséquences (risque après mise en œuvre des mesures).

Appréciation des mesures : l'évaluation économique des mesures élaborées s'effectue en vertu du critère des coûts marginaux (voir figure 5.1). L'analyse des risques individuels fait partie intégrante de cette évaluation. L'option choisie doit les abaisser en dessous de la valeur limite préalablement établie.

Proposition de mesures : des analyses précédentes ressort la variante de mesure recommandée pour la suite de la démarche selon le présent guide.

Facteurs mous : souvent, les mesures ne peuvent pas être décidées uniquement à partir de facteurs techniques et économiques. Des aspects tels que proportionnalité, acceptation, compatibilité écologique, etc., jouent aussi un rôle. Cependant, il est souvent difficile de prendre systématiquement en considération de tels facteurs, appelés «facteurs mous», et surtout leur valeur, en raison de l'absence de méthodes et de bases. De plus, ces facteurs ne sont pas toujours reproductibles. C'est la raison pour laquelle la transparence est très importante ici, en particulier lorsque ce sont des facteurs de ce type qui appellent à modifier les mesures proposées. Il faut alors répondre aux questions suivantes :

- La mesure choisie est-elle acceptée par la population concernée ?
- La mesure choisie est-elle acceptée par les organes décisionnels politiques ?
- La mesure choisie est-elle écologiquement acceptable ?
- La mesure est-elle en contradiction avec d'autres objectifs de l'aménagement du territoire auxquels il faut parfois donner plus de poids ?
- La mesure a-t-elle une incidence fortement négative sur le fonctionnement d'une infrastructure (p. ex. disponibilité d'un axe de transport) ?
- Les intérêts de la protection de la nature et du paysage sont-ils pris en compte ?

Avenir : comme on l'a déjà vu, l'aménagement du territoire et les risques qui y sont liés doivent être considérés de manière dynamique. De ce fait, les réflexions portant sur l'évolution future des risques doivent entrer dans une planification intégrée des mesures. La démarche peut s'appuyer sur la structure méthodologique basique du concept de risque, laquelle peut modéliser aussi bien des situations futures que la situation actuelle. Cependant, on ne sait pas encore très bien comment les scénarios prévisionnels doivent être élaborés concrètement et, en particulier, comment les mesures décidées vont les influencer. Dans tous les cas, il est complexe de mettre en lumière des situations où, sur une période de quelques années à quelques décennies, les risques recommencent à augmenter après la réalisation des mesures. Il est possible que ces situations fassent apparaître des lacunes dans la planification des mesures et, en particulier, au niveau des mesures d'aménagement du territoire déterminantes à long terme. Mais parfois, il peut aussi s'agir d'une stratégie délibérée, découlant d'une utilisation volontairement intensifiée du territoire.

Décision et application : si l'évaluation globale des mesures planifiées est positive même après un examen approfondi, la décision finale est prise et la mise en application, lancée. Dans le cas contraire, il est indiqué de réexaminer la planification, car il subsisterait des différences sensibles entre l'approche technico-économique et l'approche étendue.

5.5 Détermination de l'efficacité

L'efficacité d'une mesure correspond à la réduction des risques qui en résulte. Elle peut être déterminée par la différence entre le risque initial et le risque résiduel une fois la mesure mise en œuvre. Pour pouvoir calculer le risque résiduel, il faut déterminer l'incidence des mesures sur les différents paramètres de l'équation du risque. En l'occurrence, on peut classer sommairement les différents types de mesures en fonction de leur incidence (tableau 5.1).

En général, la détermination concrète de leur efficacité fait apparaître de grandes divergences entre les différentes mesures. Cela dit, une analyse individuelle de la situation concrète est généralement indispensable. Quelques principes généraux peuvent toutefois en faciliter les premiers pas.

- **Déplacement de populations (cas particulier des mesures d'aménagement du territoire) :** les bâtiments situés dans la zone dangereuse sont rasés ou tout au moins réaffectés. L'affectation principale est transférée dans une zone non menacée. Il s'agit de cas isolés devant être considérés individuellement. En général, il faut savoir quels bâtiments sont concernés et comment devra se présenter concrètement leur utilisation future (p. ex. démolition, réaffectation). Alors que la réalisation d'un déplacement de population peut se heurter à de grandes difficultés, a priori cette mesure est très facile à estimer. Seuls sont touchés des objets ponctuels (bâtiments) pour lesquels il est possible d'estimer avec une précision relativement grande comment se présentera le danger potentiel une fois la mesure mise en œuvre.

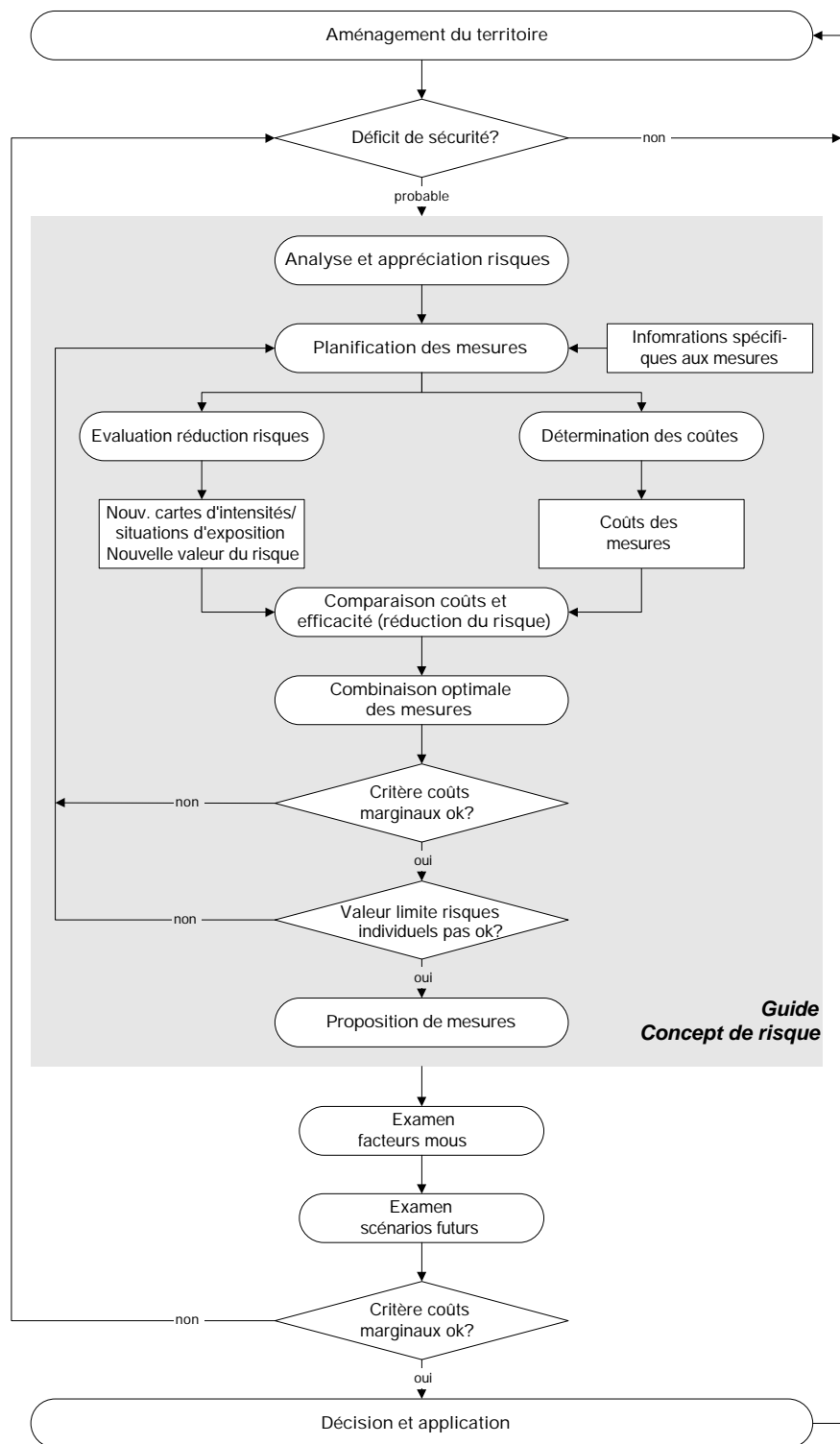


FIG. 5.1: Aperçu de la planification et de l'appréciation des mesures

TAB. 5.1: Effet des différentes mesures sur le risque

		Effet sur...		
	P_j	$P_{i,j}$	A_i	$SE_{i,j}$
	Fréquence du scénario j	Probabilité que l'objet i soit exposé au scénario j	Valeur de l'objet i	Vulnérabilité de l'objet i en fonction du scénario j
Mesures d'aménagement du territoire	Pas d'incidence	A long terme, réduction possible	A très long terme, réduction possible	Indirectement, ou du fait de contraintes de construction
Cas particulier des déplacements de population	Pas d'incidence	Forte réduction en cas de réalisation	Forte réduction en cas de réalisation	Pas d'incidence
Mesures techniques de construction	Action prépondérante de corrections	P. ex. construction d'un abri sûr, protection des objets	Pas d'incidence	D'une part atteintes réduites, d'autre part constructions renforcées
Mesures biologiques	Idem mesures techniques de construction	Pas d'incidence	Pas d'incidence	Atteintes réduites
Mesures organisationnelles	Influence, p. ex. par déclenchement artificiel ou déviation d'un processus	Influence, par fermeture, évacuation	Pas d'incidence	Influence, p. ex. par renforcement temporaire, premiers secours, sauvetage

Comme on l'a déjà vu, les autres mesures d'aménagement du territoire ne sont pas appréciées en vertu de la démarche proposée dans ce guide. Leur impact devrait être déterminé à l'aide de scénarios prévisionnels, c'est-à-dire par la comparaison de différents scénarios plus ou moins influencés par l'aménagement du territoire (p. ex. restrictions d'utilisation ou réajustements d'affectations).

- **Mesures techniques de construction** : en principe, l'efficacité d'ouvrages de protection – qu'il s'agisse de mesures de protection contre des dangers ou de mesures destinées à renforcer des objets potentiellement menacés – est déterminée à partir de la comparaison entre les atteintes d'un processus et le comportement de l'ouvrage dans le cas de charge. Ce parallèle permet d'estimer la situation des dangers une fois les mesures mises en œuvre (intensités et probabilités du processus) ou la diminution de la vulnérabilité d'objets et, par conséquent, de réajuster le calcul du risque. Les constructions sont souvent réglementées par des contraintes de dimensionnement ou des règles générales (normes, directives). En revanche, la compréhension des interactions entre ouvrages et processus varie d'une situation à l'autre. Le projet PLANAT A3 «Wirkung von Schutzmassnahmen» (impact de mesures de protection) propose un mode opératoire général et des auxiliaires de travail concrets pour les principaux types de mesures de protection contre les avalanches, les phénomènes d'éboulements, les glissements de terrain, les torrents et les cours d'eau [60]. On se sert généralement de ce manuel pour déterminer l'efficacité des mesures techniques de construction.
- **Mesures biologiques** : pour l'essentiel, leur efficacité peut être appréciée sur le même principe que les mesures techniques de construction. Les commentaires qui précèdent s'appliquent donc aussi dans ce cas, en particulier le renvoi au rapport PLANAT A3 «Wirkung von Schutzmassnahmen» [60].
- **Mesures organisationnelles** : ce groupe de mesures couvre un large domaine. On y trouve ainsi des mesures visant à favoriser la perception des risques (sensibilisation) et des comportements adaptés, de même que des systèmes d'alarme précoce et la conversion des informations en mesures telles que fermetures ou mesures d'intervention en cas de sinistre. L'efficacité de ces mesures ne peut être évaluée qu'en fonction de situations et d'interventions spécifiques puisque les différentes options poursuivent des objectifs différents. Les bases d'appréciation sont cependant très différentes et, en général, l'action de telles mesures n'a pas encore été systématiquement étudiée.

5.6 Détermination des coûts

Les coûts se composent des coûts d'investissement (frais de capital) et des frais courants (coûts d'exploitation). La ventilation réelle des flux de coût en fonction du temps est inconnue. Pour simplifier, on admet qu'elle est constante. On applique également cette hypothèse au bénéfice retiré des projets de protection (réduction des risques), que l'on admet constant d'une année sur l'autre.

On applique un calcul statique des coûts [83], lequel, en particulier, ne tient pas compte de l'escompte, et cela, pour les raisons suivantes : d'une part, le bénéfice retiré, c'est-à-dire la réduction des risques, n'est pas escompté et, d'autre part, les erreurs méthodologiques de ce calcul des coûts restent dans les marges d'incertitude de l'analyse globale.

$$K(j) = K(b) + K(u) + K(r) + K(a) + K(z) \quad (5.1)$$

avec

$$K(a) = \frac{I(0) - L(n)}{n} \quad (5.2)$$

et

$$K(z) = \left[L(n) + \frac{I(0) - L(n)}{2} \right] \cdot \frac{p}{100} \quad (5.3)$$

$$= \frac{I(0) + L(n)}{2} \cdot \frac{p}{100} \quad (5.4)$$

Après remplacement dans l'équation de base, les coûts annuels se calculent de la manière suivante :

$$K(J) = K(b) + K(u) + K(r) + \frac{I(0) - L(n)}{n} + \frac{I(0) + L(n)}{2} \cdot \frac{p}{100} \quad (5.5)$$

$K(J)$	=	coûts annuels	[francs/an]
$K(b)$	=	coûts d'exploitation (p. ex. coûts des munitions)	[francs/an]
$K(u)$	=	coûts d'entretien	[francs/an]
$K(r)$	=	frais de réparation	[francs/an]
$K(a)$	=	amortissements	[francs/an]
$K(z)$	=	intérêts	[francs/an]
$I(0)$	=	investissement	[francs]
$L(n)$	=	valeur résiduelle	[francs]
n	=	durée	[années]
p	=	taux d'intérêt	[%]

Ce calcul permet de comparer les coûts de diverses variantes d'un projet⁵. Cette marge est déterminante pour l'estimation des coûts d'investissement et des frais courants. Les différents paramètres sont toujours déterminés en fonction des mesures spécifiques (voir partie B). Il faut les comprendre de la manière suivante :

- Les frais courants se composent des coûts d'exploitation (p. ex. frais de personnel dans le cas d'un service d'alerte), des frais d'entretien (p. ex. travaux annuels de maintenance des installations techniques) et des frais de réparation (p. ex. remise en état d'ouvrages de protection). Ils doivent être estimés compte tenu de deux critères : la fonctionnalité de la mesure mais aussi sa sécurité doivent être garanties pendant toute la période considérée. Les frais courants sont estimés soit en valeurs absolues, soit en pourcentage des investissements consentis.
- Les coûts financiers englobent les amortissements et les charges de capital. Les frais d'investissement sont toujours déterminés pour un cas de figure concret. On recommande de considérer un taux d'intérêt fixe de 2 %⁶. L'échéance et, indirectement, la valeur résiduelle découlent de la

⁵ Le chapitre 5.4 prescrit le degré de détail de l'«étude préliminaire» entrant dans la planification des mesures. Selon la circulaire n° 7 de l'OFEV, cela correspond à une précision des coûts de +/- 25 %

⁶ En se fondant sur les rendements des obligations de la Confédération de 1981 à 92, Wilhelm [82] propose d'appliquer un taux d'intérêt de 1,65 %. Sur la base des chiffres de 1975 à 2001, ce taux devrait être de 1,9 %.

longévité de la mesure ou du nombre d'années pendant lequel elle doit être amortie. S'agissant de la longévité, on admet qu'une mesure a expiré lorsque la fonctionnalité et la sécurité des ouvrages ne sont plus garanties en dépit d'opérations de maintenance. La longévité dépend donc des dépenses consenties pour l'entretien et la réparation. On ne considère pas ici les longévités maximales possibles, mais les durées minimales pendant lesquelles une mesure déploie en général véritablement ses effets.

La partie B propose des valeurs indicatives pour les coûts d'exploitation, d'entretien et de réparation, ainsi que les échéances et les valeurs résiduelles. Ces valeurs reposent sur les expériences recueillies jusqu'à présent. Ce sont toutefois les circonstances locales qui sont déterminantes dans le calcul des valeurs concrètes. Pour ce qui est des mesures organisationnelles telles que fermetures et évacuations, les coûts indirects, difficiles à chiffrer, sont un point important. Ce sont des mesures apparemment propices. Les coûts des fermetures, qui se présentent sous la forme de perturbations de l'activité économique ou de la charge psychique induite par des évacuations ne sont pas négligeables. Dans le cas des fermetures, Wilhelm [83] propose un mode opératoire possible. Mais il n'existe quasiment pas de bases générales fiables pour déterminer les coûts effectifs des mesures organisationnelles. En guise de valeurs indicatives, on propose ici de considérer comme tolérables sans autres conséquences financières :

- des fermetures jusqu'à 5 jours par année,
- et des évacuations jusqu'à un maximum d'une fois par période de 10 ans.

Lorsqu'il y a lieu de procéder à des fermetures ou à des évacuations plus fréquentes, il faut, soit faire la meilleure estimation possible des coûts, soit revoir le concept des mesures.

5.7 Combinaisons de mesures optimales

Pour pouvoir prendre en compte équitablement les risques matériels et les risques de dommages corporels dans l'évaluation, on convertit les derniers cités en valeurs pécuniaires. Comme on l'a déjà vu, il ne s'agit pas de monétariser la valeur de la vie, mais la disposition de la collectivité à éviter des décès, notamment en fonction de ses capacités financières. Cela correspond au concept des coûts marginaux, en vertu duquel des investissements sont considérés comme respectant le principe de proportionnalité lorsqu'ils n'excèdent pas un montant limite bien défini. Ce montant limite a été fixé à 5 millions de francs par décès évité (chapitre 4.2.3). Le risque initial et la réduction des risques de dommages corporels (exprimés en nombre de victimes [NV] par an) obtenue grâce à la mesure considérée sont multipliés par ce montant limite et c'est ainsi que l'on peut monétariser le risque pesant sur les personnes.

Le but de l'évaluation est de trouver la mesure ou les combinaisons de mesures optimales d'un point de vue macro-économique. A cet effet, on reporte les mesures dans un diagramme coût-risque (figure 5.2).

L'évaluation économique des mesures projetées se fait sur la base du critère des coûts marginaux. Les coûts marginaux décrivent l'unité de coût ΔK qui doit être appliquée pour obtenir une «unité

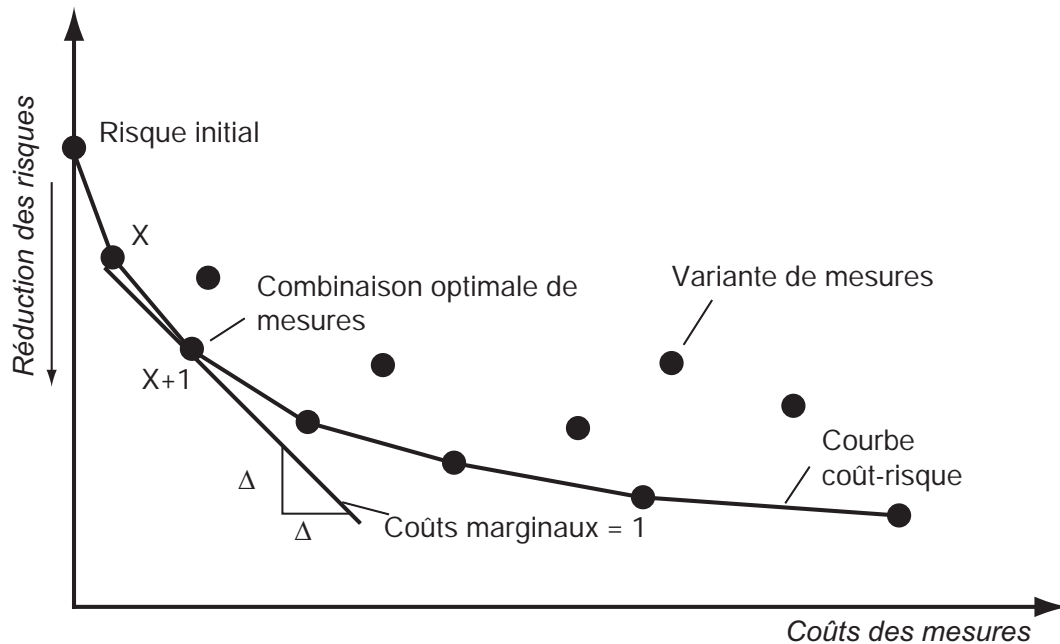


FIG. 5.2: Détermination de la combinaison optimale de mesures d'après le critère des coûts marginaux

d'efficacité» (bénéfice) ΔN . Graphiquement, ils correspondent à la tangente à la courbe théorique des coûts⁷.

La première mesure entrant en ligne de compte est celle qui offre le meilleur rapport coûts efficacité. Elle est suivie des autres mesures considérées dans l'ordre décroissant de ce rapport. Sont optimales les combinaisons de mesures pour lesquelles la courbe qui les relie forme l'enveloppe inférieure du «nuage» des valeurs discrètes. Les mesures de sécurité ne doivent pas aller plus loin que ce que permettent les coûts marginaux. Graphiquement, ce point représente le point de contact de la tangente à la courbe théorique à l'endroit où sa pente est égale à -1, au point X+1 où, dans le cas de mesures représentées par des points discrets, au segment reliant la mesure X à la mesure X+1. Une tangente de pente plus faible signifierait qu'il faut dépenser plus d'une unité de coût pour obtenir une unité d'efficacité (bénéfice). Par conséquent, la tangente de pente -1 représente la valeur limite déterminante pour l'optimisation économique.

L'évaluation d'une mesure fait également intervenir l'examen des risques individuels. La variante choisie doit être telle qu'ils se situent en-dessous de la valeur limite prescrite.

5.8 Conclusion

La planification et l'évaluation proposées des mesures sur la base du critère des coûts marginaux constituent un socle décisionnel reposant sur des considérations de sécurité et sur une utilisation économiquement optimale des moyens financiers. Selon cette proposition, les efforts consentis

⁷ La courbe suit la loi des rendements décroissants. Celle-ci dit que, lorsqu'on persévère dans l'utilisation d'un facteur (p. ex. de l'argent) afin d'agir sur un autre facteur de production fixe (p. ex. couloir à avalanches), l'output supplémentaire atteint diminue [63].

au titre de la sécurité vont toujours jusqu'au même point. De ce fait, on peut assurer que, dans les limites des imprécisions, les moyens à disposition permettent d'atteindre une sécurité maximale.

Toutefois, les expériences pratiques montrent que l'application du critère des coûts marginaux n'est pas toujours possible. Dans certains cas, le choix des variantes de mesures n'est pas assez vaste. Dans ces cas, on se sert du rapport coût efficacité (critère de la sécante dans le diagramme coût-risque) comme critère économique de décision.

Cependant, les coûts marginaux ne représentent pas le seul critère décisionnel dans une planification intégrée des mesures, car la sécurité, même si elle est un élément très important, n'en est jamais qu'un des aspects. Comme on l'a montré, la pratique doit aussi s'orienter en fonction d'autres contraintes, comme la disponibilité des voies de communication, la compatibilité écologique des mesures et l'acceptation de celles-ci par la collectivité. Il est donc nécessaire d'incorporer ces aspects dans la planification des mesures, mais, faute de bases, on ne peut le faire actuellement de la même façon que pour les critères économiques. Il est toutefois important que la prise en compte de ces facteurs se fasse toujours de manière explicite et transparente.

