



Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

## Sensibilité des dangers naturels au changement climatique

Partie 2 : Résultats

## Mentions légales

<b>Mandant:</b>	Office fédéral de l'environnement (OFEV), division Prévention des dangers, CH-3003 Berne L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).
<b>Mandataire:</b>	geo7 AG, bureau scientifique géographique Neufeldstrasse 5 - 9, 3012 Berne
<b>Auteurs:</b>	Peter Mani, géographe diplômé Ursin Caduff, master géographe
<b>Accompagnement OFEV:</b>	Stéphane Losey
<b>Remarque:</b>	Le présent rapport a été réalisé(e) sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

## Contrôle des versions

Version	Date	Nom	Remarques
0.1	04.03.2014	Peter Mani	Elaboration
1.0	18.03.2015	Peter Mani	Version définitive

### Remarques sur le document

Elaboré avec	Microsoft Office Word, Version 2010
Nom du fichier	\\srvbiblio\all\projekte\2013\3140_siprocc4\bericht\be02map_b, resultate phase 4.docx
Taille du fichier	41311 KBytes

## Table des matières

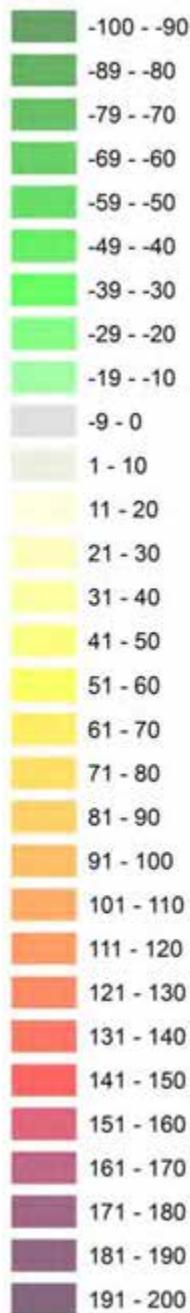
<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Chutes de pierres.....</b>	<b>2</b>
2.1	Explications .....	2
2.2	Résultats intermédiaires.....	4
2.3	Résultats agrégés .....	10
<b>3</b>	<b>Eboulement.....</b>	<b>12</b>
3.1	Explications .....	12
3.2	Résultats intermédiaires.....	13
3.3	Résultats agrégés .....	21
<b>4</b>	<b>Avalanches de neige sèche.....</b>	<b>23</b>
4.1	Explications .....	23
4.2	Résultats intermédiaires.....	24
4.3	Résultats agrégés .....	27
<b>5</b>	<b>Avalanches de neige mouillée .....</b>	<b>29</b>
5.1	Explications .....	29
5.2	Résultats intermédiaires.....	30
5.3	Résultats agrégés .....	32
<b>6</b>	<b>Coulées boueuses provenant de fortes pentes .....</b>	<b>34</b>
6.1	Explications .....	34
6.2	Résultats intermédiaires.....	35
6.3	Résultats agrégés .....	36
<b>7</b>	<b>Coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés ....</b>	<b>37</b>
7.1	Explications .....	37
7.2	Résultats intermédiaires.....	38
7.3	Résultats agrégés .....	42
<b>8</b>	<b>Torrents.....</b>	<b>44</b>
8.1	Explications .....	44
8.2	Résultats intermédiaires.....	47
8.3	Résultats agrégés .....	61

9	Rivière à caractère torrentiel.....	64
9.1	Explications .....	64
9.2	Résultats intermédiaires.....	66
9.3	Résultats agrégés .....	75
10	Rivière.....	78
10.1	Explications .....	78
10.2	Résultats agrégés .....	79
11	Evaluation des résultats.....	80
12	Bibliographie .....	84

# 1 Introduction

Les résultats finaux de l'analyse de sensibilité des dangers naturels au changement climatique sont présentés et brièvement expliqués dans le présent rapport. Les conclusions et résultats détaillés relatifs à la sensibilité climatique de même que les méthodes ayant conduit à ces résultats sont décrites dans le « Methodenbericht » (geo7, 2015a) et le « GIS-Handbuch » (geo7, 2015b).

Pour toutes les cartes de sensibilité, une légende uniforme est utilisée, allant de -100 (sensibilité décroissante) jusqu'à +200 (sensibilité fortement croissante).



Des légendes séparées seront utilisées pour la description d'autres données et interprétées aux endroits correspondants.

## 2 Chutes de pierres

### 2.1 Explications

Sur le Plateau, dans le Jura, dans les vallées du Sud des Alpes et jusqu'à une altitude moyenne des Préalpes et des Alpes, les températures plus importantes conduisent à une diminution des jours présentant une alternance gel-dégel. Seules les zones des sommets des hautes Alpes subissent une augmentation. Cela se répercute sur une désagrégation de substrat due à cette alternance et ainsi sur la disponibilité des matériaux. Pour le scénario moyen, cette disponibilité diminue dans les régions de moyenne et de basse altitude à cause de la diminution de l'alternance gel-dégel (Carte 1). Dans les régions de haute altitude, un changement n'est pas attendu. Seules les zones de très haute altitude subissent une augmentation.

Pour le scénario extrême, une image identique se dessine. La différence principale porte sur le nombre de jours présentant une alternance gel-dégel qui augmente très fortement pour les régions de haute altitude, en comparaison au scénario moyen. Cela influence la disponibilité des matériaux. Dans les zones des sommets des hautes Alpes, en particulier en Valais, de grandes surfaces atteignent le niveau « sensibilité fortement croissante » (Carte 2). Par ailleurs, pour une grande partie des Préalpes et au Sud des Alpes, il faut compter avec une diminution de la disponibilité des matériaux due à une régression des jours avec une alternance gel-dégel.

Les changements de la disponibilité des matériaux provenant de la dégradation du permafrost se limitent naturellement aux régions élevées des Alpes. Des changements importants ne sont cependant pas attendus dans les Alpes bernoises, valaisannes et grisonnes, pour le scénario moyen (Carte 3). Pour le scénario extrême, la dégradation s'étend jusqu'au sommet des plus hautes régions, avec des effets correspondants pour la disponibilité des matériaux (Carte 4). Une différenciation supplémentaire résulte de la géologie et de l'exposition.

La combinaison de la disponibilité des matériaux due à l'alternance gel-dégel et à la dégradation du permafrost montre que cette disponibilité diminue ou reste inchangée, à l'exception des régions des hautes Alpes (Carte 5). Cette augmentation est encore plus marquée pour le scénario extrême (Carte 6), en comparaison au scénario moyen.

Concernant l'apport en eau, une diminution est à attendre dans les régions les plus basses du Plateau pour un scénario moyen (Carte 7) ; là, les événements de fonte des neiges seront plus rares et aucun changement important n'est attendu pour les fortes pluies. Pour les zones de moyenne altitude, la situation reste inchangée. Dans les hautes régions des Préalpes et dans les Alpes, l'apport en eau augmente, ceci particulièrement à cause d'une fonte des neiges importante en hiver et au printemps.

L'apport en eau est très différencié pour le scénario extrême par rapport au scénario moyen (Carte 8). L'augmentation des fortes pluies conduit à une augmentation de l'apport en eau pour toutes les altitudes. De plus, la fonte des neiges renforcée en haute altitude provoque une augmentation supplémentaire de l'apport en eau.

Les résultats non agrégés pour la fréquence et la magnitude (Carte 9 à Carte 12) ne considèrent pas le nombre de sources de chutes de pierres existantes et montrent la sensibilité pour le scénario moyen et extrême. Pour le scénario moyen, ces deux paramètres montrent une diminution dans le Jura, sur le Plateau et dans les vallées des Préalpes et des Alpes ainsi qu'au Sud de la Suisse ; ceci est dû à la diminution de la disponibilité des matériaux. Les augmentations de la disponibilité des matériaux et de l'apport en eau conduisent dans les Alpes à une augmentation et par endroit à une forte augmentation de la fréquence. Cela est moins prononcé pour la magnitude ; en effet, la plus grande fréquence des événements ne permet pas d'accumuler de grandes quantités de matériaux. Pour le scénario extrême,

de plus grandes régions dans les Alpes présentent une forte augmentation ; ceci est essentiellement dû à la forte augmentation de l'apport en eau, mais aussi à une plus grande disponibilité des matériaux. Comme pour le scénario moyen, l'augmentation de la magnitude est limitée par l'augmentation de la fréquence.

Pour les résultats agrégés (Carte 13 à Carte 16), le nombre de sources de chutes de pierres est pris en compte. Cela étant, plusieurs régions ne présentent aucun changement pour les deux scénarios ; en effet, il n'existe qu'un petit nombre de sources de chutes de pierres dans ces régions. Les changements importants se situent principalement dans les Alpes et les Préalpes, ainsi que dans le Sud de la Suisse. Pour le scénario moyen, une augmentation de la fréquence est à enregistrer dans les Alpes et une diminution dans les Préalpes et le Sud de la Suisse. Pour le scénario extrême, de grandes régions des Alpes présentent une forte augmentation, alors que les Préalpes et le Sud de la Suisse montrent une diminution. Pour la magnitude, peu de régions montrent une augmentation, cela pour les deux scénarios. Dans les Préalpes et dans le Sud de la Suisse, de grandes régions présentent cependant une diminution. Pour le scénario extrême, cela concerne aussi partiellement les régions des Alpes situées à basse altitude.

## 2.2 Résultats intermédiaires

**Chutes de pierres**  
Disponibilité des matériaux due à l'alternance gel-dégel  
Scénario moyen



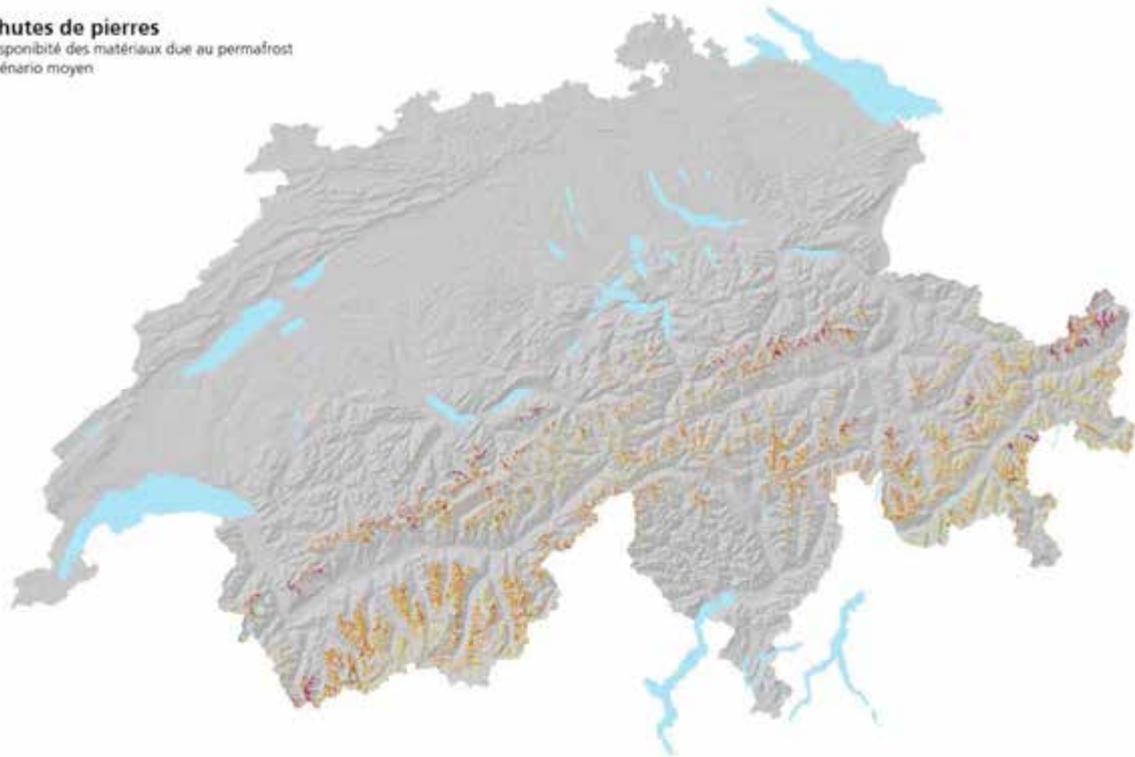
Carte 1

**Chutes de pierres**  
Disponibilité des matériaux due à l'alternance gel-dégel  
Scénario extrême



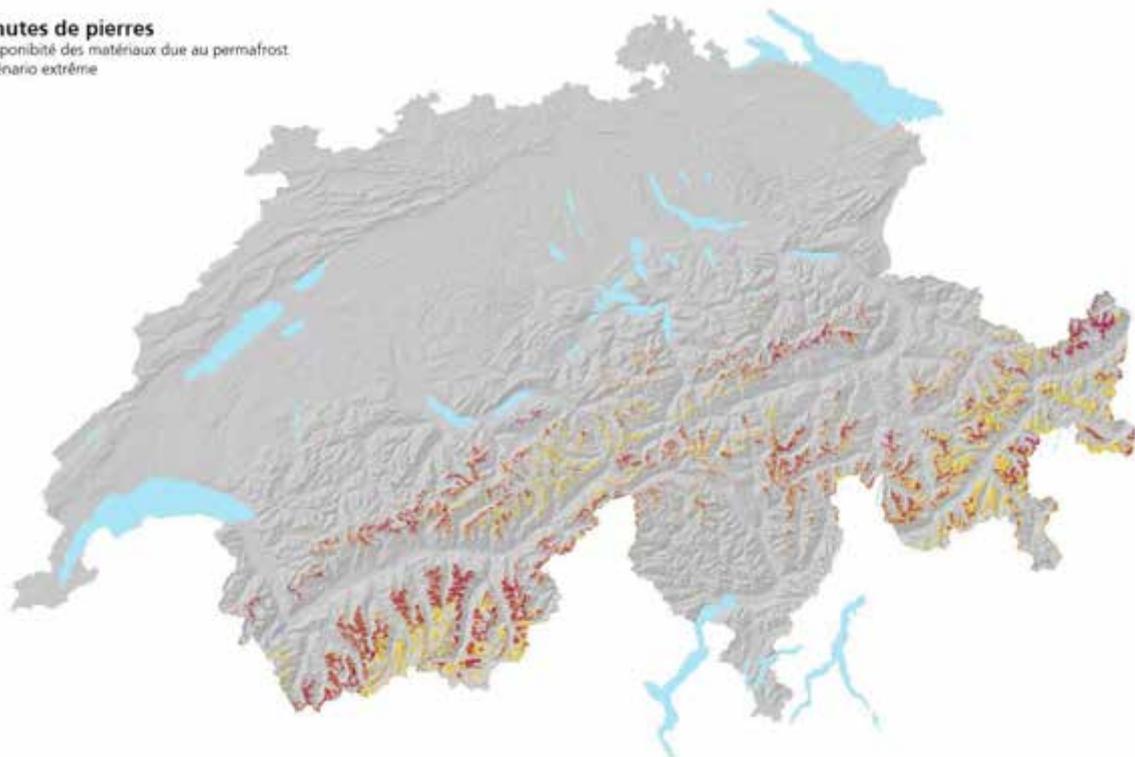
Carte 2

**Chutes de pierres**  
Disponibilité des matériaux due au permafrost  
Scénario moyen



Carte 3

**Chutes de pierres**  
Disponibilité des matériaux due au permafrost  
Scénario extrême



Carte 4

**Chutes de pierres**  
Totalité des matériaux disponibles  
Scénario moyen



Carte 5

**Chutes de pierres**  
Totalité des matériaux disponibles  
Scénario extrême



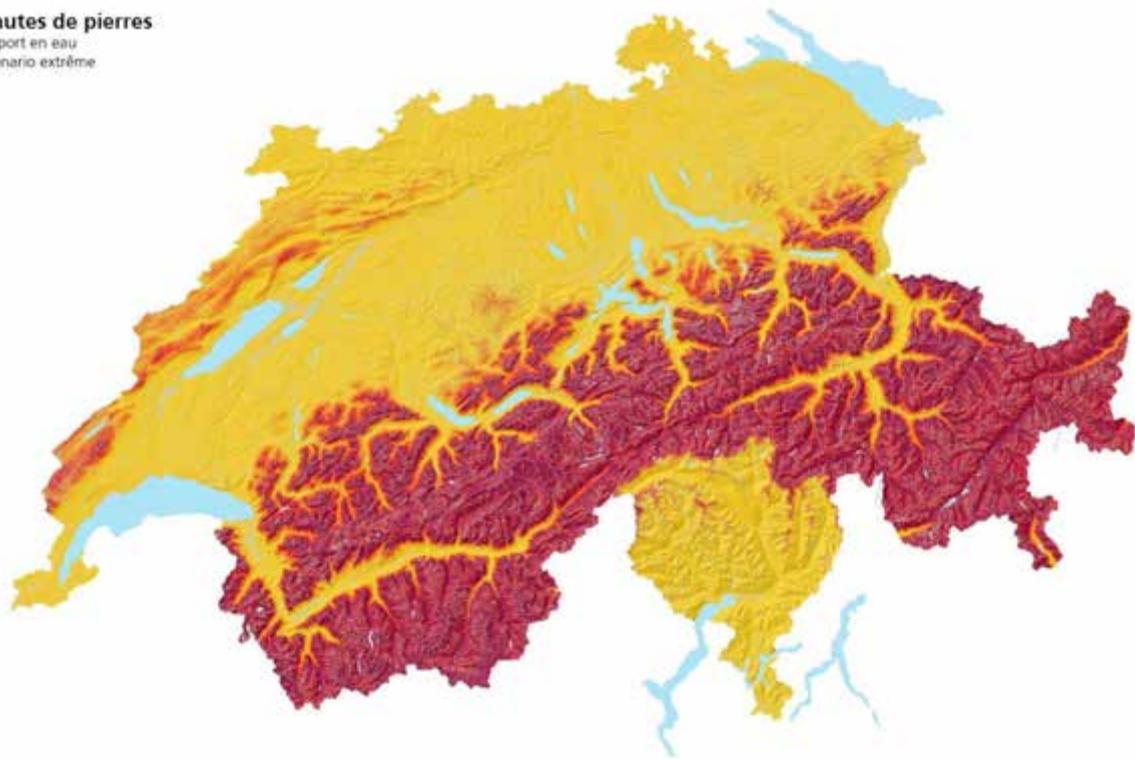
Carte 6

**Chutes de pierres**  
Apport en eau  
Scénario moyen



Carte 7

**Chutes de pierres**  
Apport en eau  
Scénario extrême



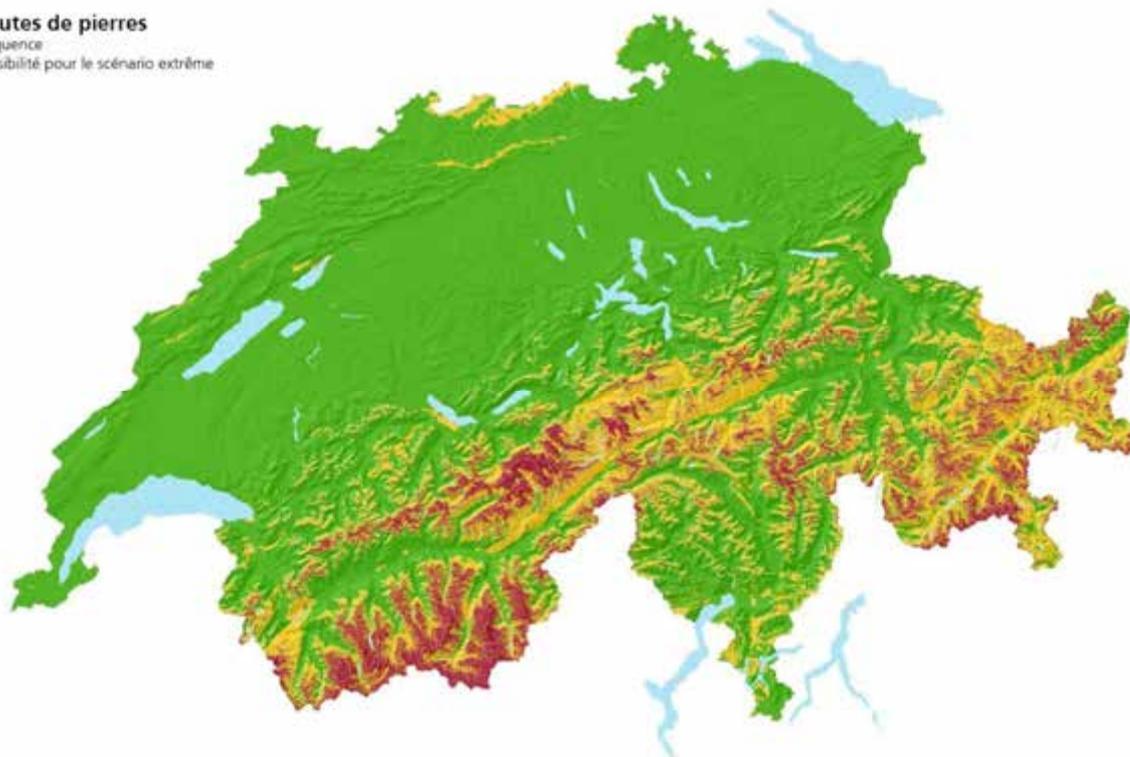
Carte 8

**Chutes de pierres**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 9

**Chutes de pierres**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 10

**Chutes de pierres**  
Magnitude  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 11

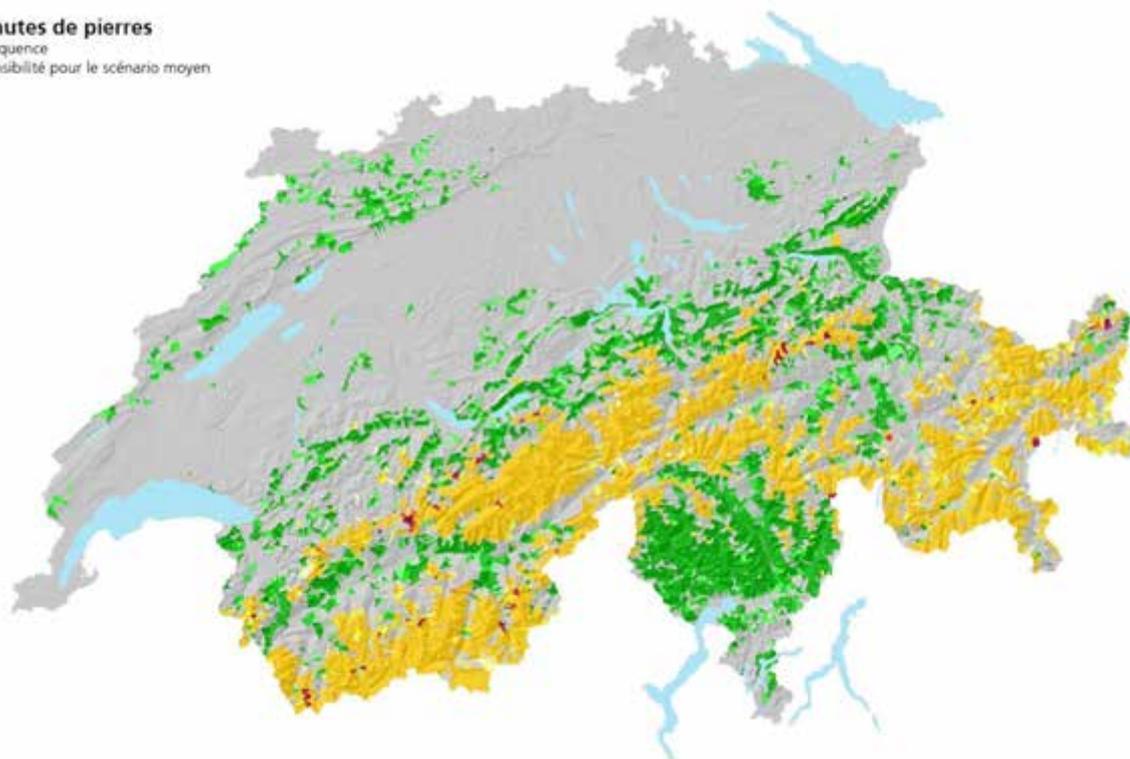
**Chutes de pierres**  
Magnitude  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 12

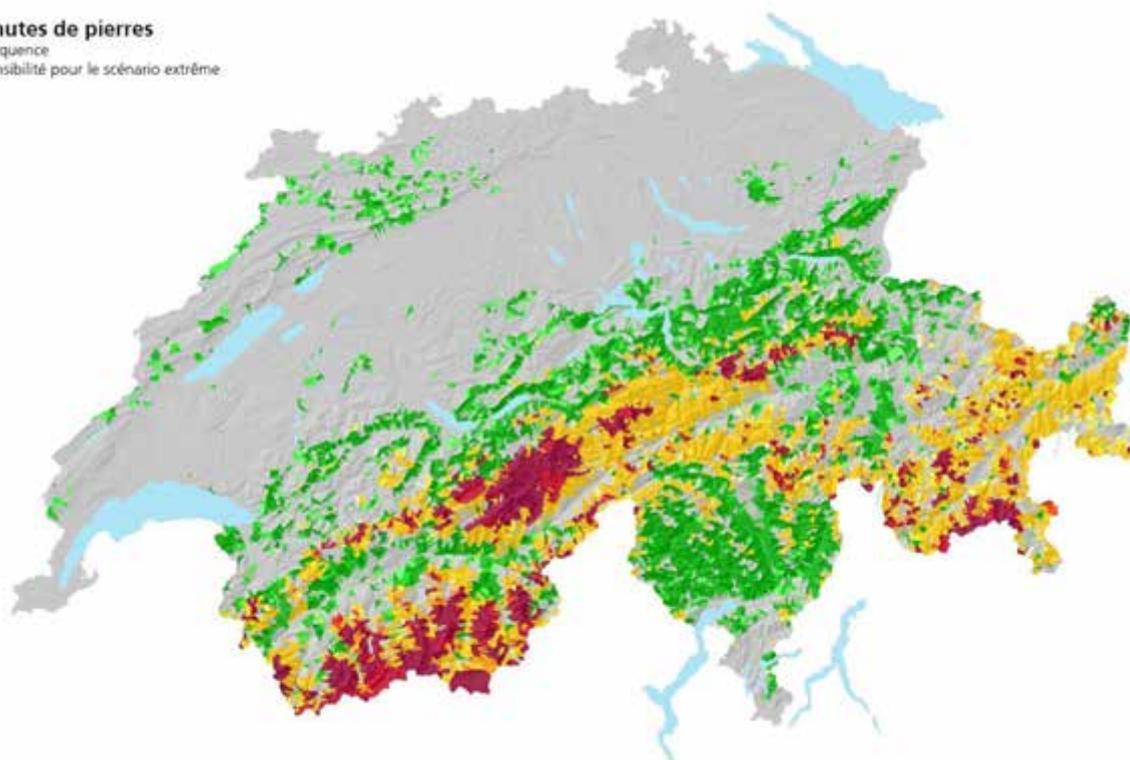
## 2.3 Résultats agrégés

**Chutes de pierres**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario moyen



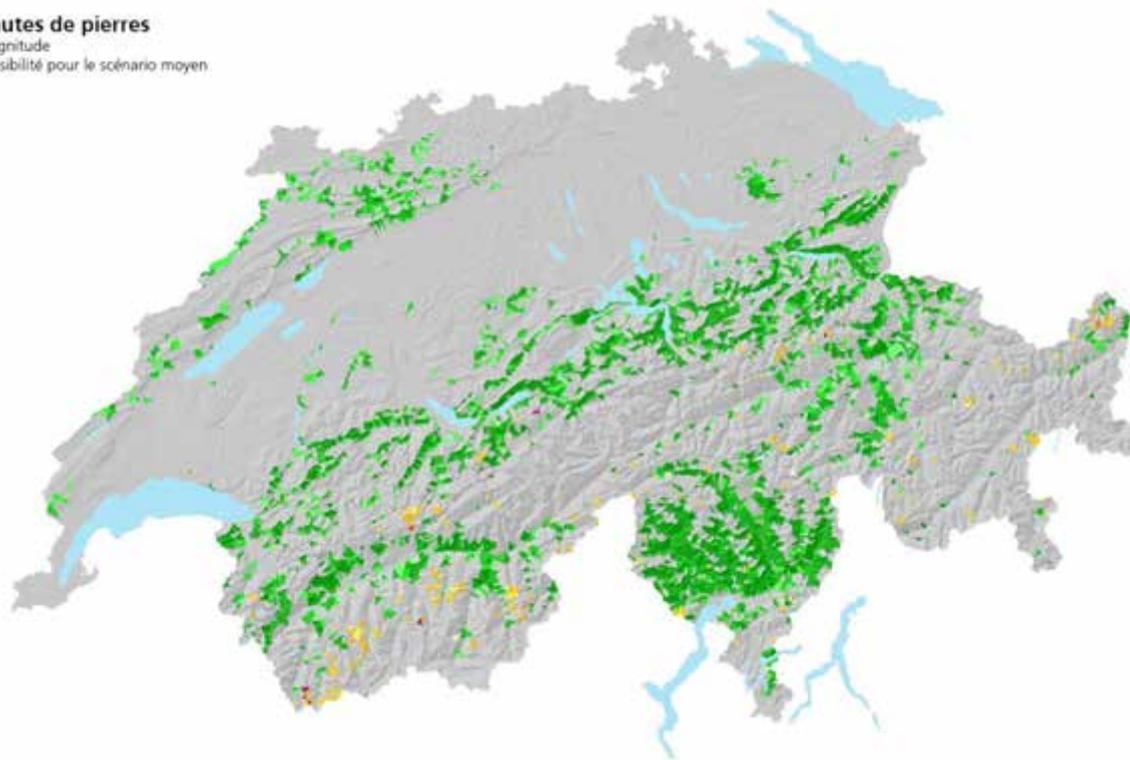
Carte 13

**Chutes de pierres**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario extrême



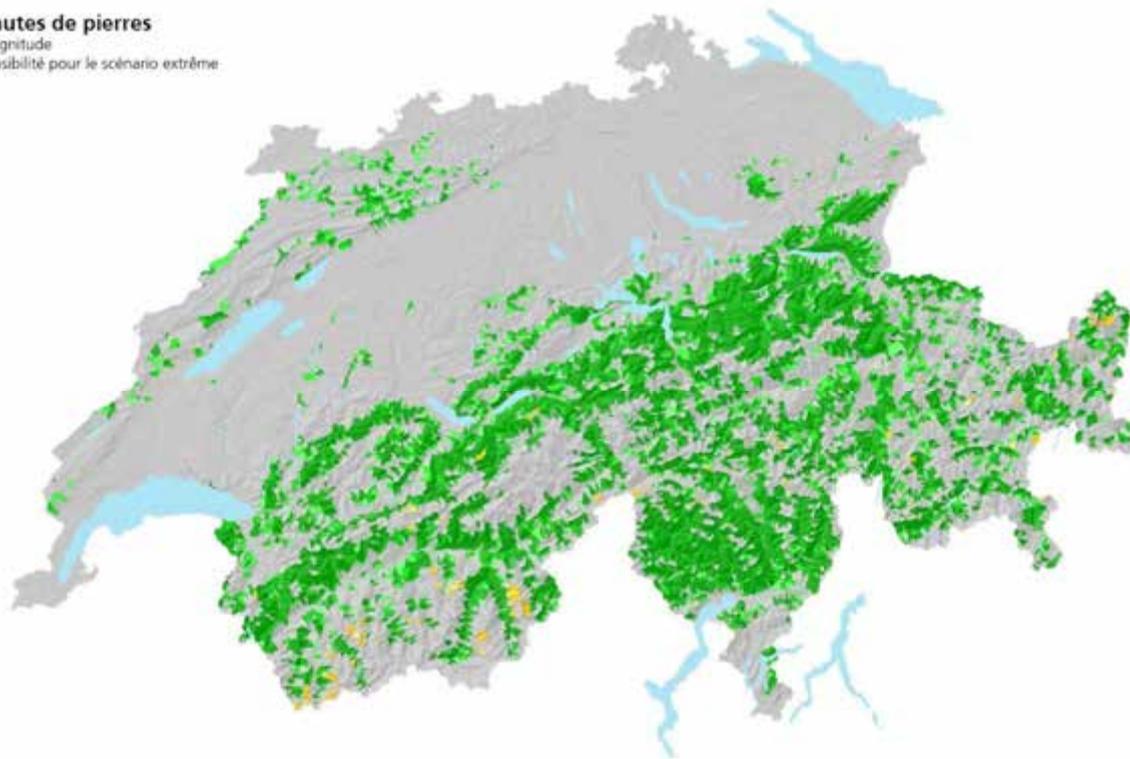
Carte 14

**Chutes de pierres**  
Magnitude  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 15

**Chutes de pierres**  
Magnitude  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 16

## 3 Eboulement

### 3.1 Explications

Sur la durée, l'apport en eau joue un rôle important pour le processus d'éboulement par l'augmentation des pressions hydrostatiques qu'elle génère dans les discontinuités. Pour le scénario moyen, l'apport en eau augmente seulement au Sud de la Suisse (Carte 17). Sur le Plateau, dans le Jura et dans les vallées des Préalpes et des Alpes, il faut compter sur une diminution. Une autre image se dessine pour le scénario extrême (Carte 18): sur le Plateau et dans le Jura, il faut en effet s'attendre à une forte augmentation de l'apport en eau provoqué par des pluies hivernales importantes et par une fonte des neiges précoce. Dans les Alpes, l'augmentation est moins importante, dans la mesure où les fortes fontes des neiges précoces ne coïncident pas encore avec l'augmentation des pluies. Au Sud des Alpes, il faut même compter sur une diminution de l'apport en eau, due à la diminution des pluies au printemps et en été dans les vallées.

La dégradation du permafrost est clairement moins forte pour le scénario moyen (Carte 19) que pour le scénario extrême (Carte 20). Pour ce dernier scénario, de grandes surfaces, principalement en Valais et dans les Alpes grisonnes, présentent une forte augmentation.

Pour le scénario moyen, l'évaluation de la sensibilité (sans considérer les zones de départ pour les éboulements) montre une diminution de la fréquence dans les régions de basse altitude due à la régression de l'apport en eau, et une augmentation dans les zones de haute altitude, où la dégradation du permafrost joue un rôle (Carte 21). Pour le scénario extrême, les zones de basse altitude doivent compter sur une augmentation des éboulements due à la forte progression de l'apport en eau et les zones de haute altitude sur une très forte augmentation (Carte 22).

Pour le scénario moyen, il faut s'attendre à une augmentation voire à une forte augmentation de la magnitude des éboulements dans les zones de dégradation du permafrost (Carte 23). Dans les autres régions, la situation reste inchangée. Pour le scénario extrême, la magnitude diminue dans les régions non concernées par la dégradation du permafrost (Carte 24). C'est uniquement dans les zones présentant une dégradation du permafrost, qu'il faut compter sur une augmentation, souvent sur une forte augmentation de la magnitude.

Les zones de retrait glaciaire sont analysées séparément. Ce retrait est moins important pour le scénario moyen (Carte 25) que pour le scénario extrême (Carte 26). La fréquence dans ces régions est partout en augmentation ; en effet, ces dernières deviennent de nouvelles sources potentielles d'éboulements. Pour le scénario moyen, ces régions présentent une augmentation de la magnitude (Carte 27) et une forte augmentation due à un apport en eau important pour le scénario extrême (Carte 28).

En combinant les deux fréquences (sans et avec retrait glaciaire), on ne remarque pas de grandes différences par rapport à l'évaluation sans le retrait des glaciers (Carte 29 et Carte 30). Pour le scénario extrême, plus de régions présentent une forte augmentation de la magnitude, provoquée par un changement important dans les régions de retrait glaciaire (Carte 32).

En examinant les résultats agrégés, une autre image se dessine clairement (Carte 33 à Carte 36). À l'exception des Alpes, il n'y a pas de grands changements à attendre pour les deux scénarios, car une grande partie de la Suisse n'est pas exposée aux grands éboulements. Dans les Alpes par contre, il faut s'attendre partout à une augmentation voir une forte augmentation pour les deux scénarios, aussi bien pour la fréquence que pour la magnitude.

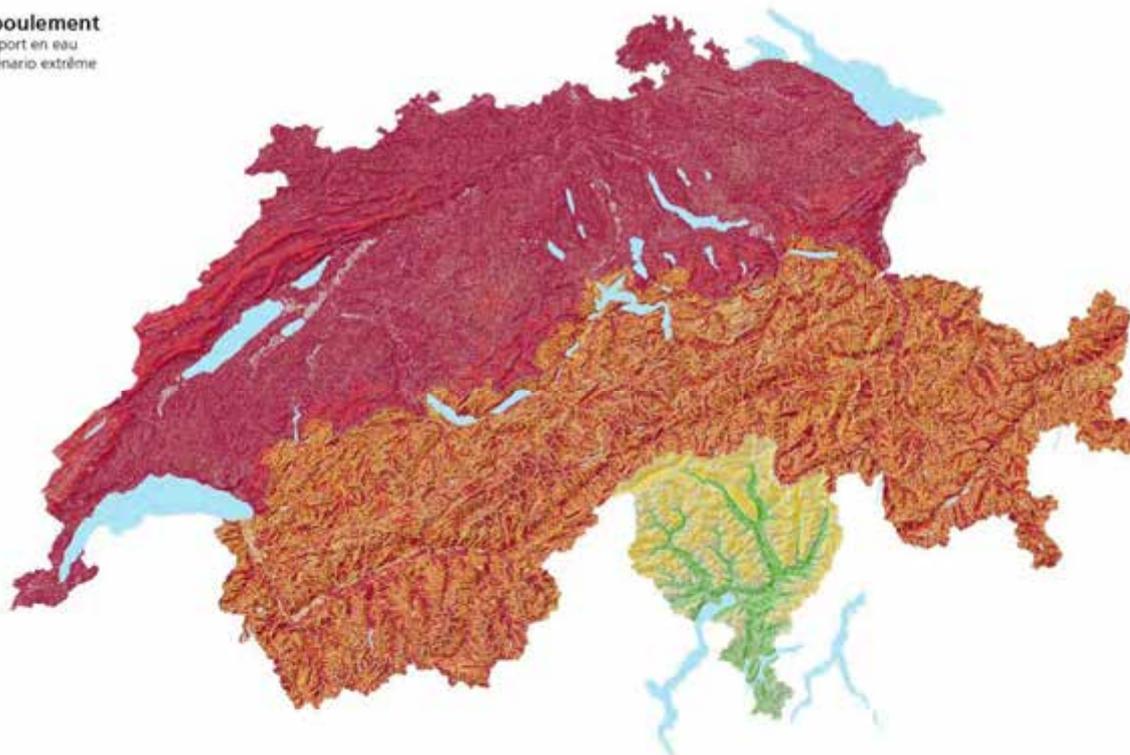
### 3.2 Résultats intermédiaires

**Eboulement**  
Apport en eau  
Scénario moyen



Carte 17

**Eboulement**  
Apport en eau  
Scénario extrême



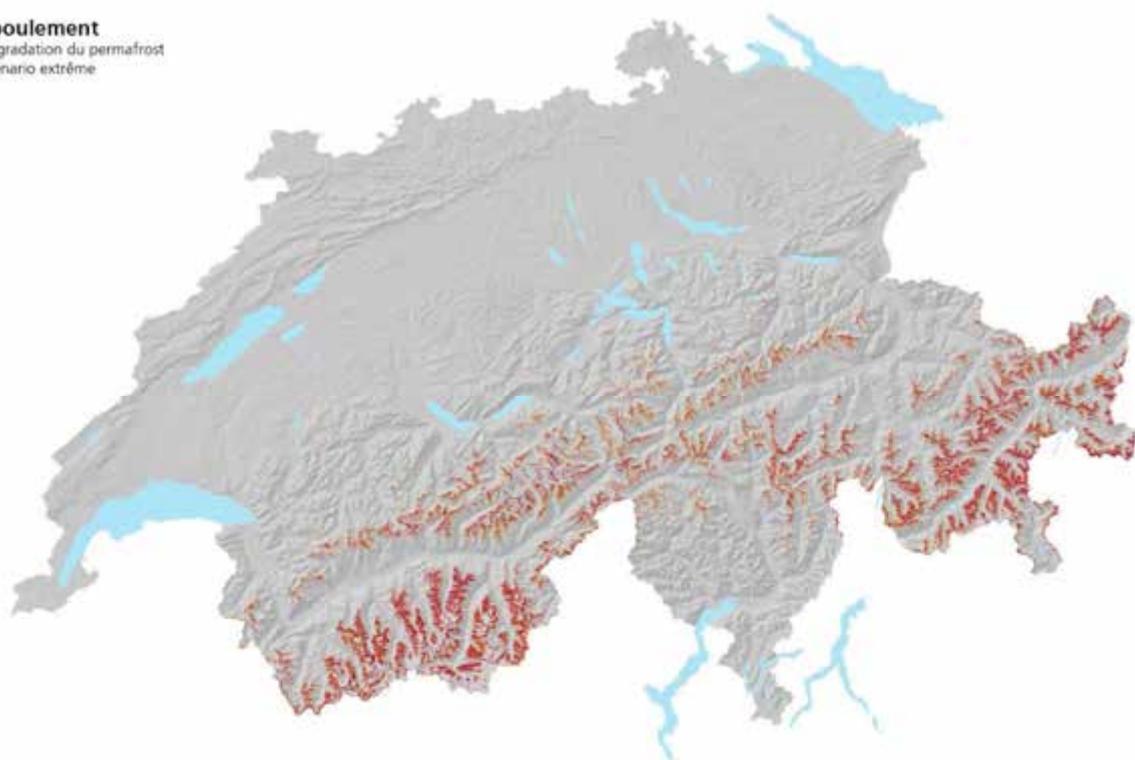
Carte 18

**Eboulement**  
Dégradation du permafrost  
Scénario moyen



Carte 19

**Eboulement**  
Dégradation du permafrost  
Scénario extrême



Carte 20

**Eboulement**

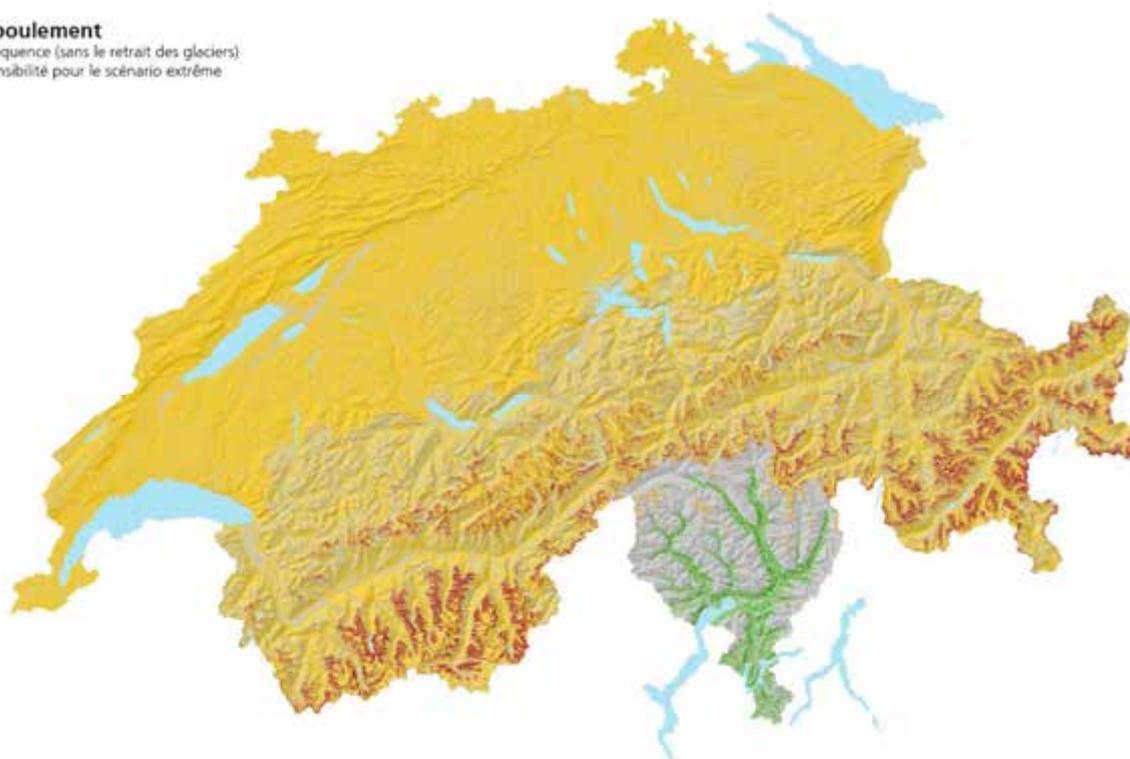
Fréquence (sans le retrait des glaciers)  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 21

**Eboulement**

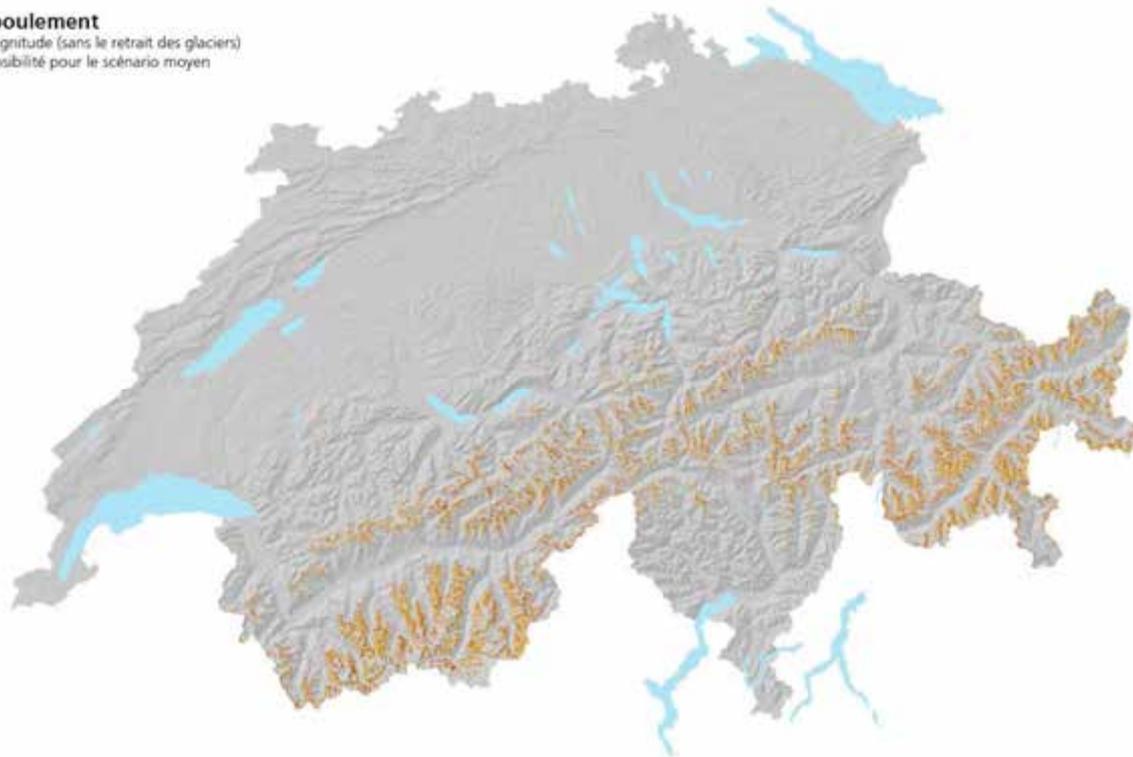
Fréquence (sans le retrait des glaciers)  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 22

**Eboulement**

Magnitude (sans le retrait des glaciers)  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 23

**Eboulement**

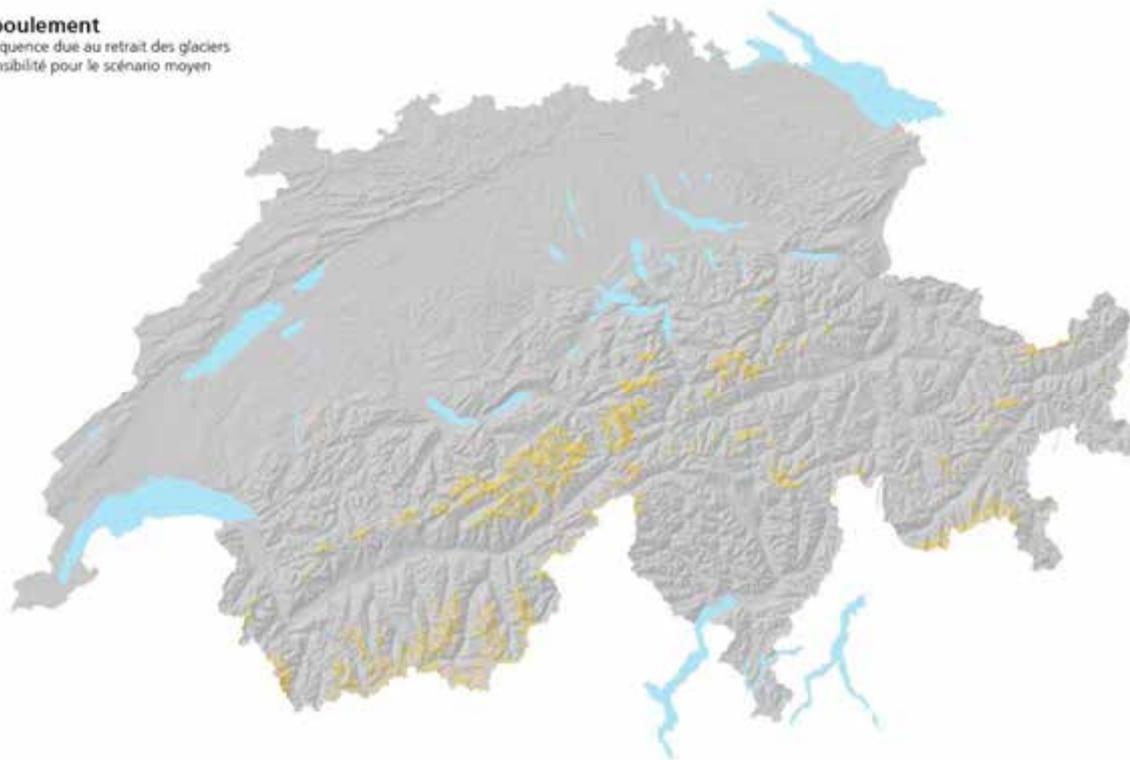
Magnitude (sans le retrait des glaciers)  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 24

**Eboulement**

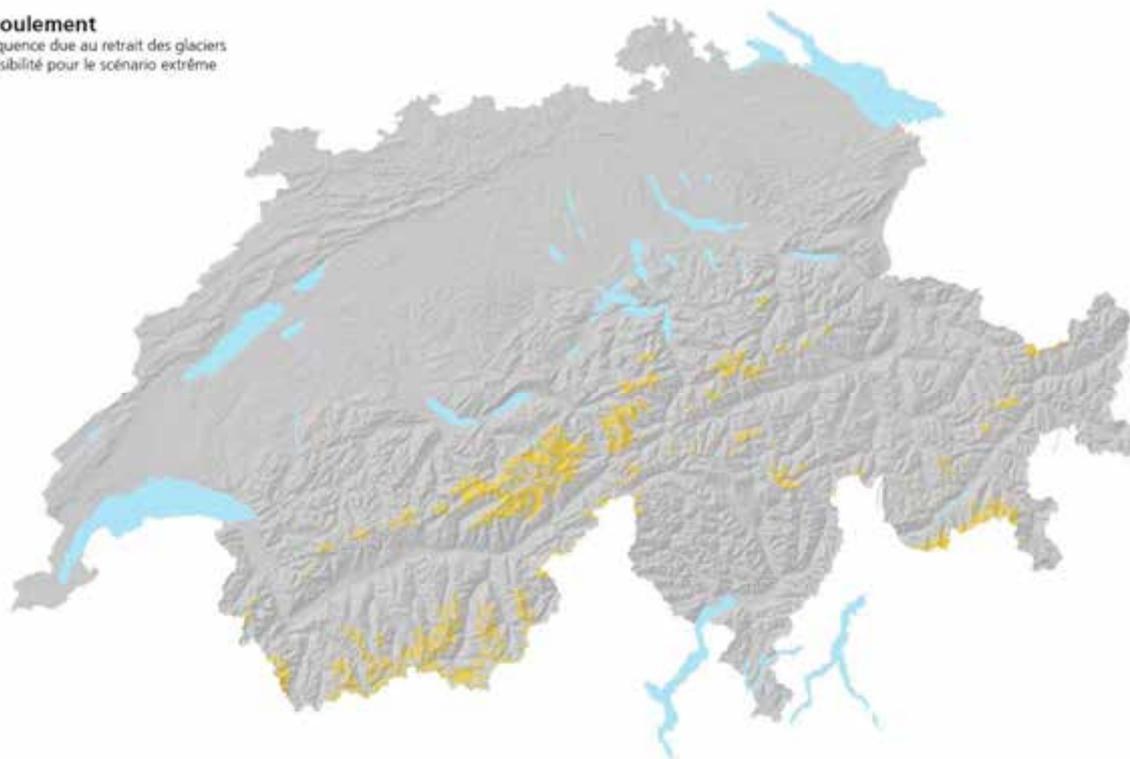
Fréquence due au retrait des glaciers  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 25

**Eboulement**

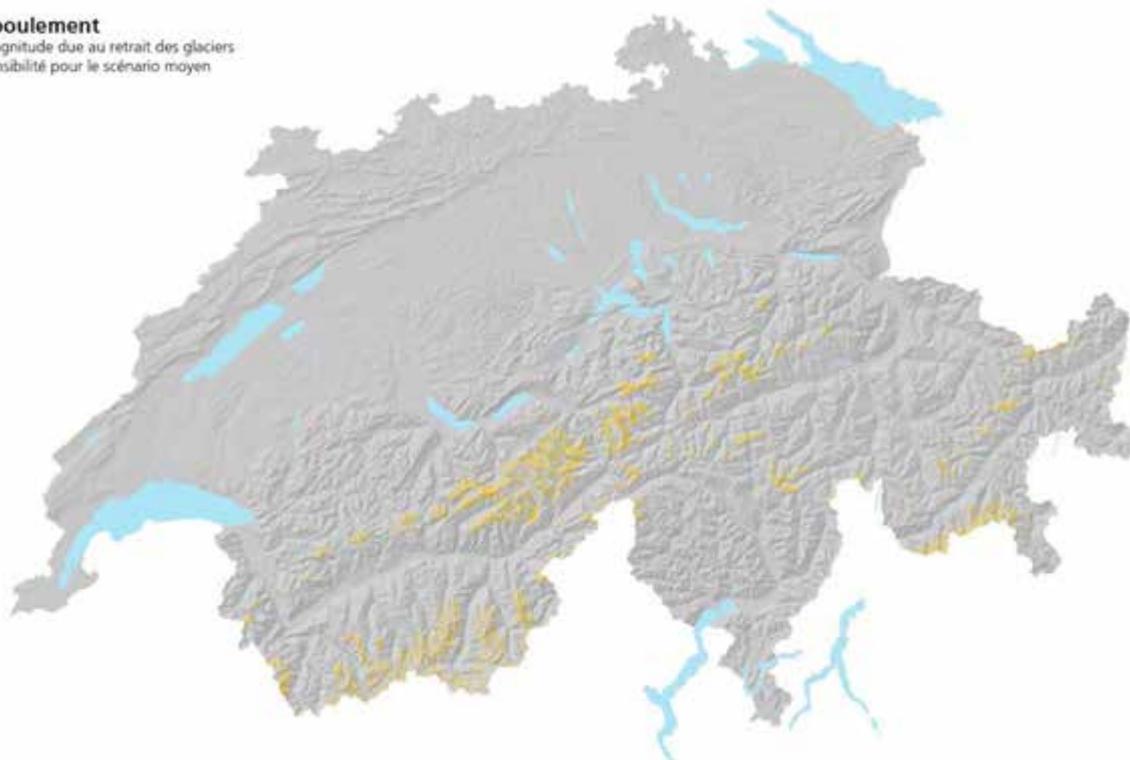
Fréquence due au retrait des glaciers  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 26

**Eboulement**

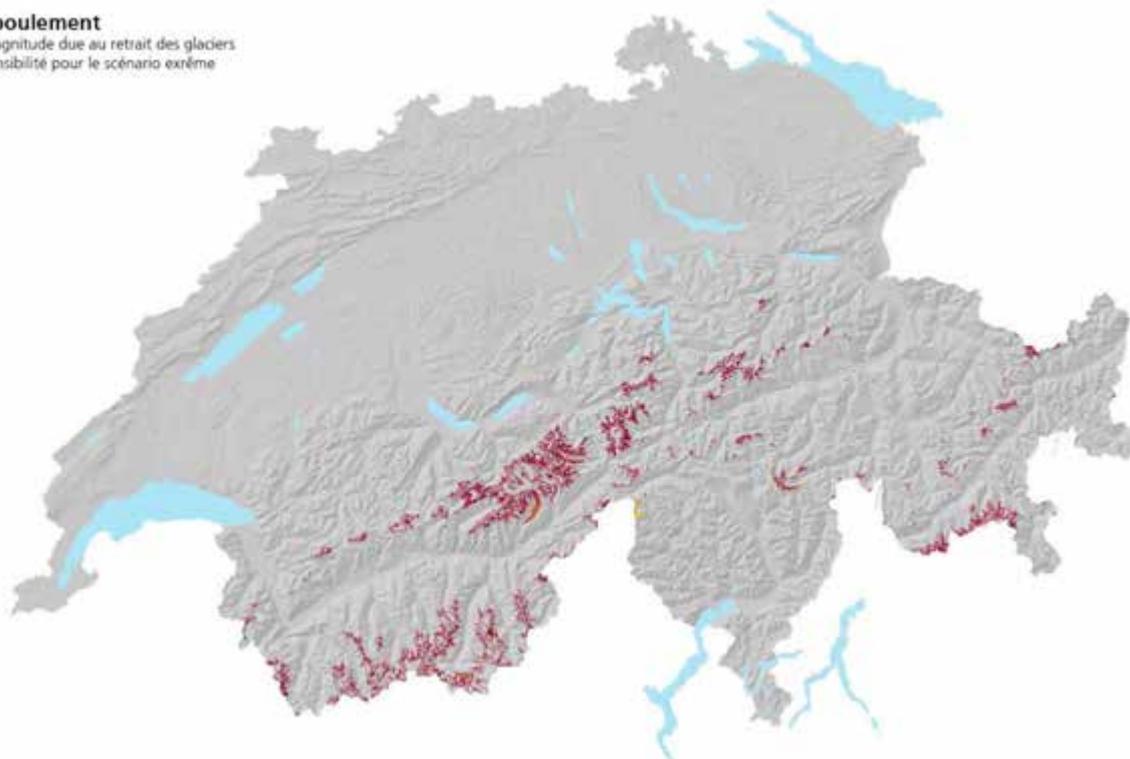
Magnitude due au retrait des glaciers  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 27

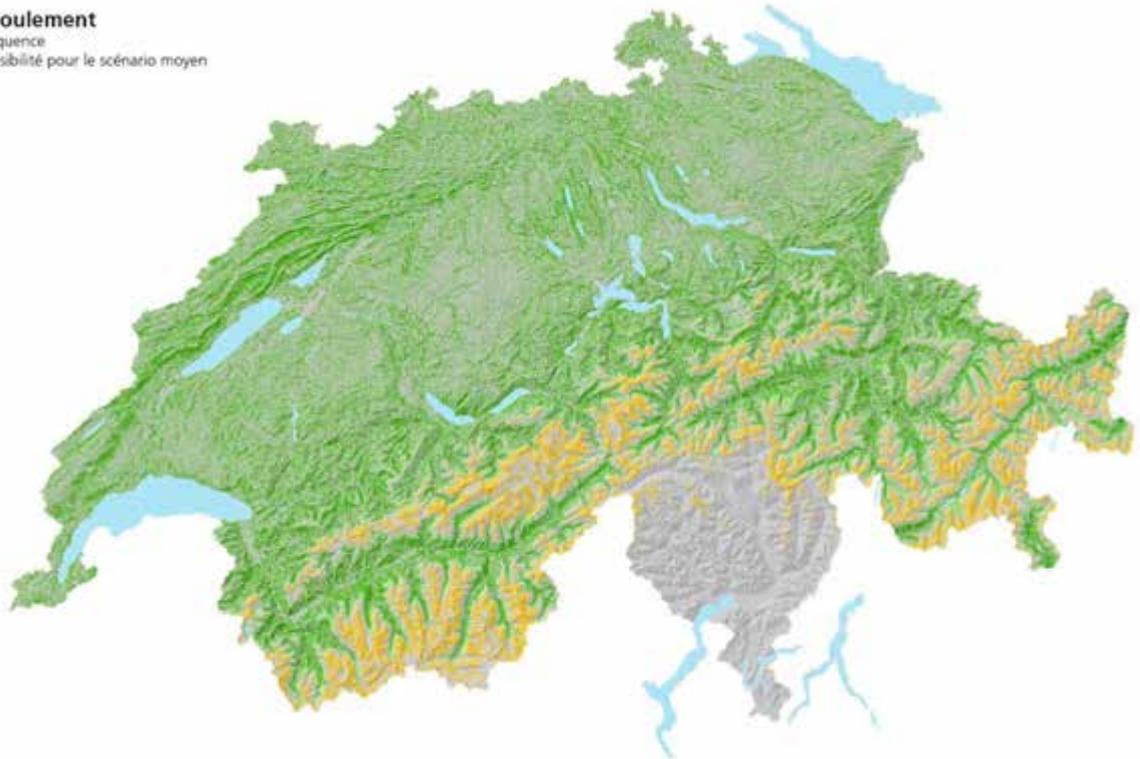
**Eboulement**

Magnitude due au retrait des glaciers  
Sensibilité pour le scénario extrême



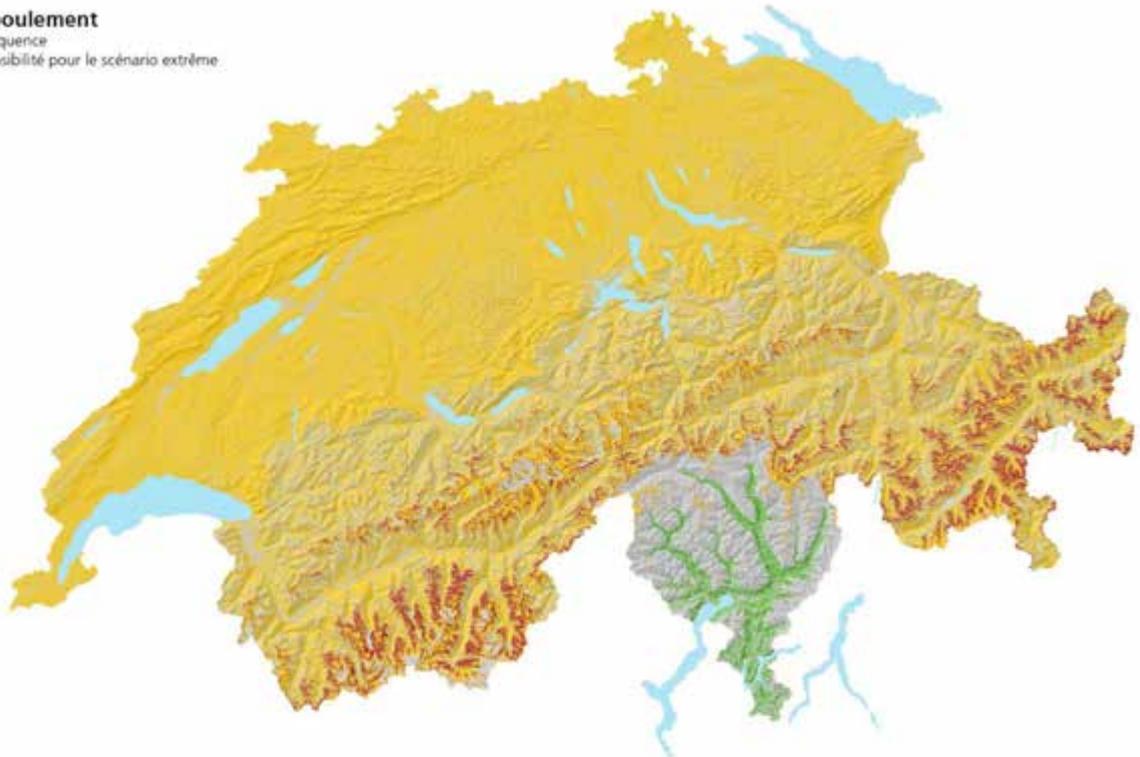
Carte 28

**Eboulement**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario moyen



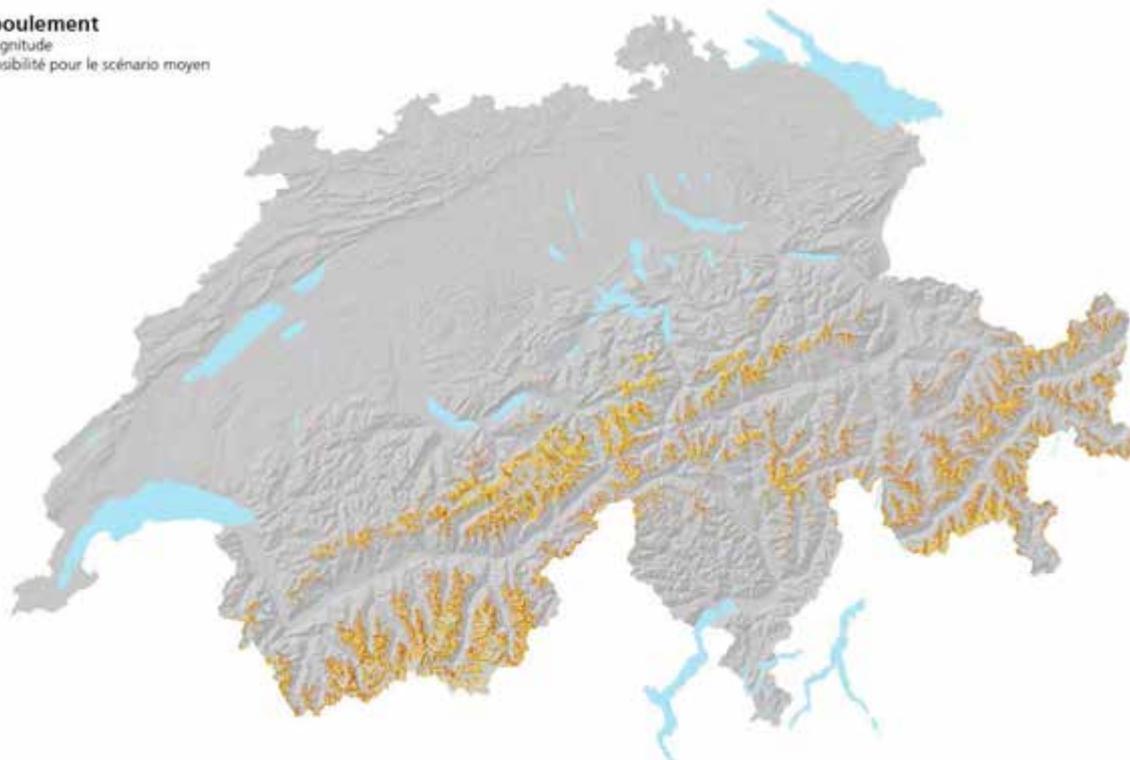
Carte 29

**Eboulement**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario extrême



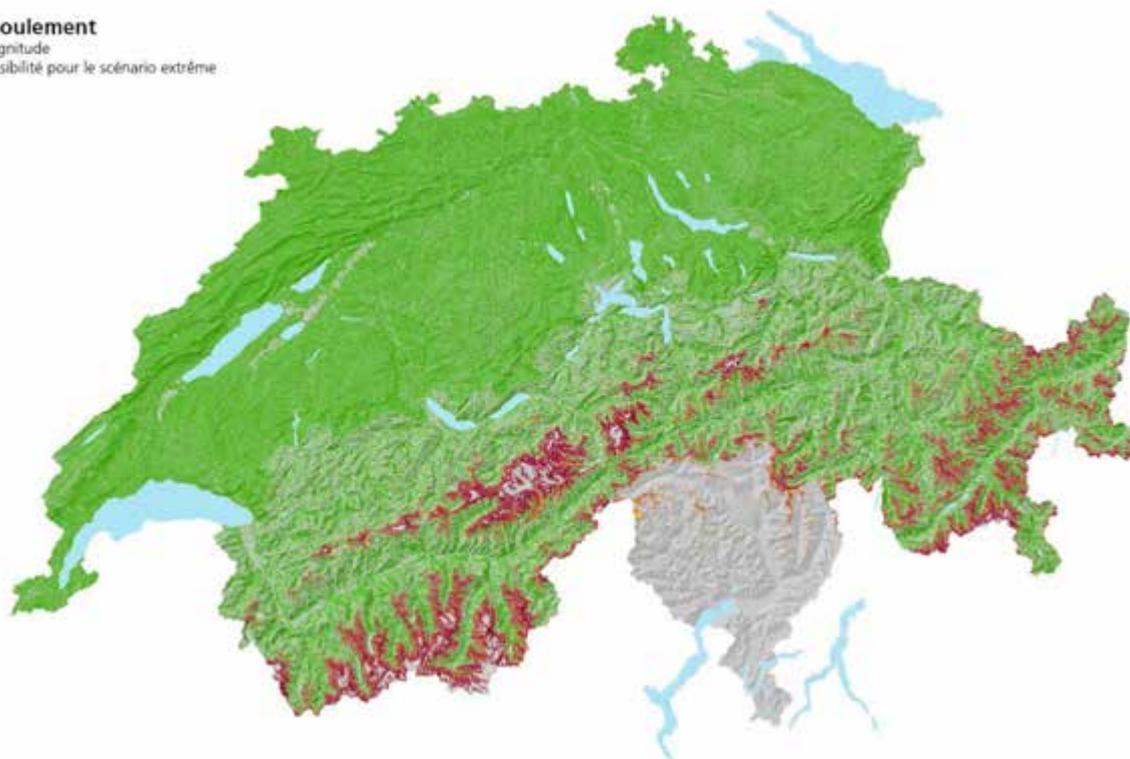
Carte 30

**Eboulement**  
Magnitude  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 31

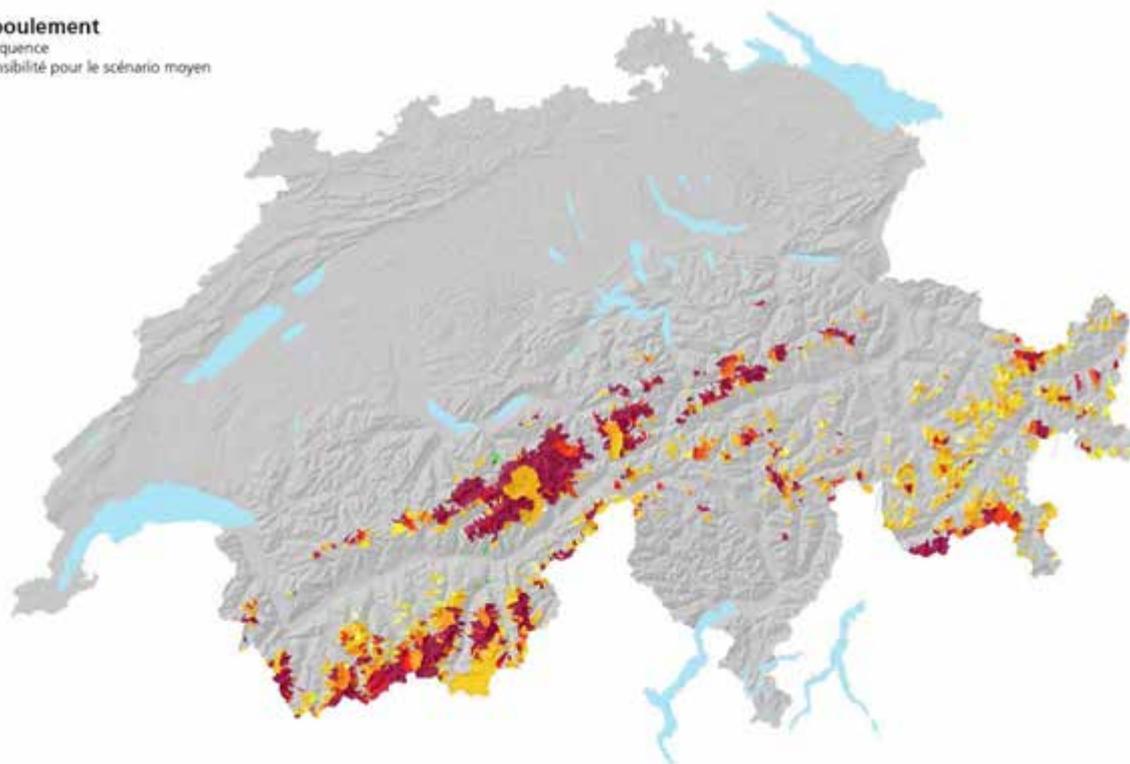
**Eboulement**  
Magnitude  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 32

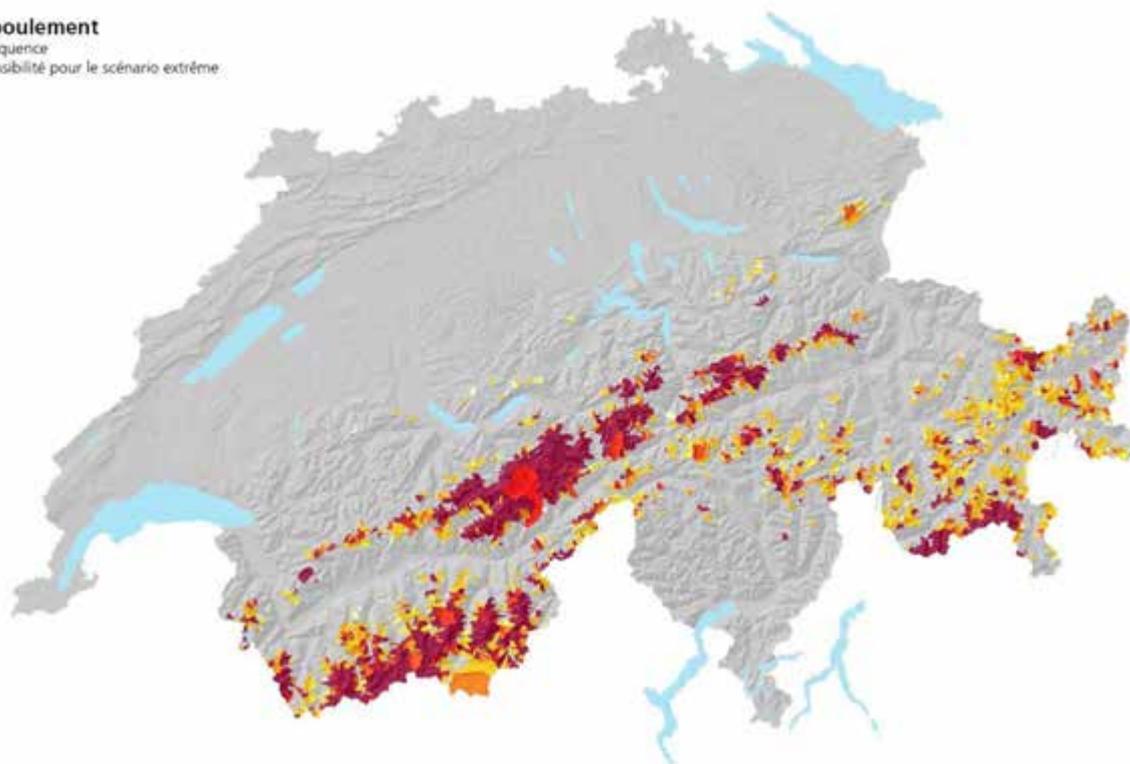
### 3.3 Résultats agrégés

**Eboulement**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario moyen



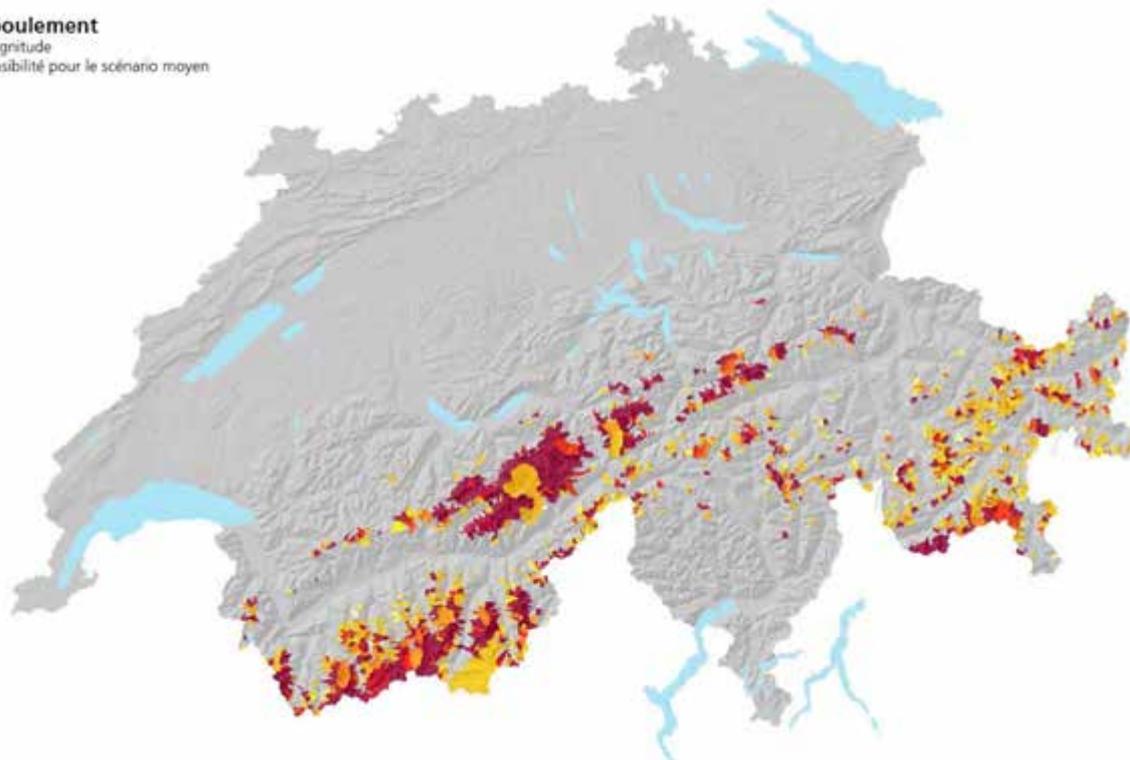
Carte 33

**Eboulement**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario extrême



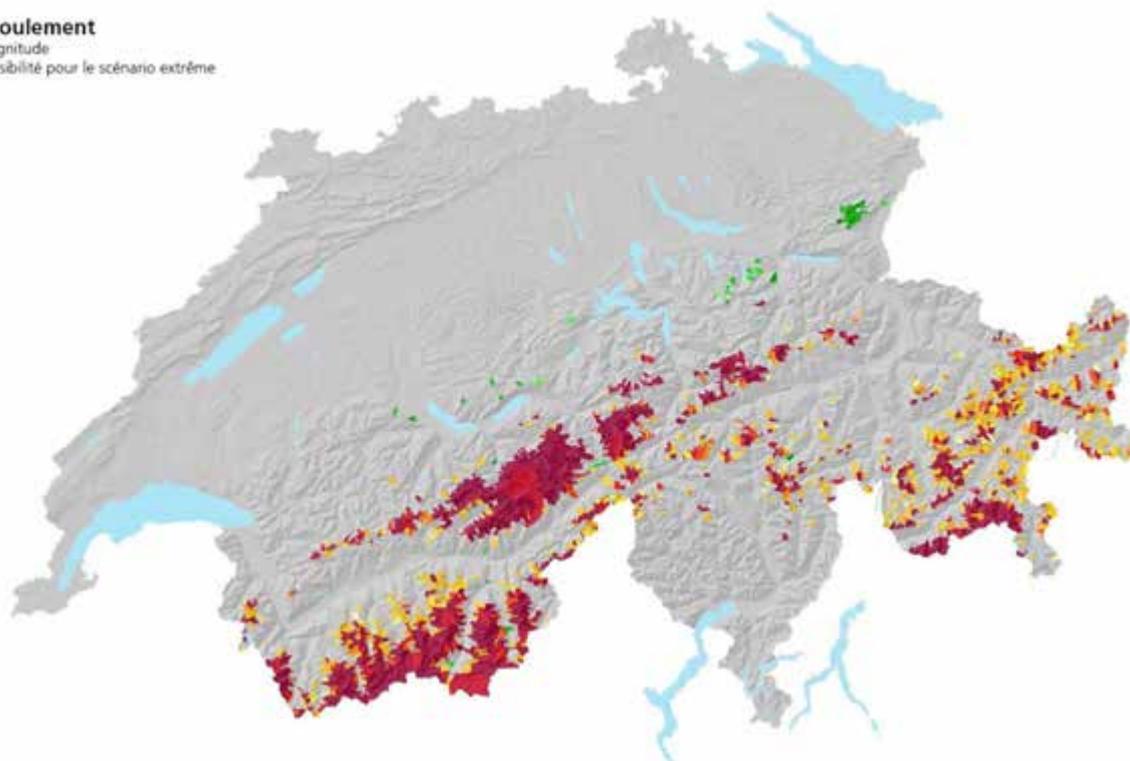
Carte 34

**Eboulement**  
Magnitude  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 35

**Eboulement**  
Magnitude  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 36

## 4 Avalanches de neige sèche

### 4.1 Explications

Le danger lié aux avalanches de neige sèche dépend de la quantité de neige tombée en quelques jours. Pour le scénario moyen, les fortes chutes de neige diminuent dans une grande partie de la Suisse (Carte 37). La situation reste identique dans les régions plus élevées des Préalpes et des Alpes ainsi que dans le Sud des Alpes. Une augmentation est prévue uniquement dans les endroits situés à une altitude supérieure à 3'000m. Pour le scénario extrême et dans les régions de haute altitude, il faut en partie compter avec une augmentation importante des fortes chutes de neige due à la forte augmentation des précipitations hivernales (Carte 38).

Comme l'évaluation de la fréquence et de la magnitude est basée sur le volume de départ découlant de la modélisation des avalanches, seules les surfaces de décrochement sont représentées sur les Carte 35 à Carte 42. Dans les Préalpes, les régions de basse altitude des Alpes et au Sud des Alpes, il en résulte une diminution pour le scénario moyen; une augmentation est attendue dans les régions de haute altitude des Alpes. Pour le scénario extrême, de grandes surfaces présentent une augmentation, voir une forte augmentation pour les zones de haute altitude. Concernant la magnitude, plus de surfaces présentent une forte augmentation pour les deux scénarios.

Pour le scénario moyen, une diminution de la fréquence est déduite des résultats agrégés pour le nord des Alpes et le Tessin (Carte 43). Lors du scénario extrême, la diminution est moindre dans le Sud de la Suisse (Carte 44). Pour les Alpes, le scénario moyen engendre une augmentation de la fréquence, mais cela concerne une plus grande surface pour le scénario extrême.

Quelques surfaces présentent une forte augmentation de la magnitude lors du scénario moyen (Carte 45). Pour le scénario extrême cette proportion est plus grande (Carte 46).

## 4.2 Résultats intermédiaires

**Avalanches de neige sèche**  
Fortes chutes de neige  
Scénario moyen



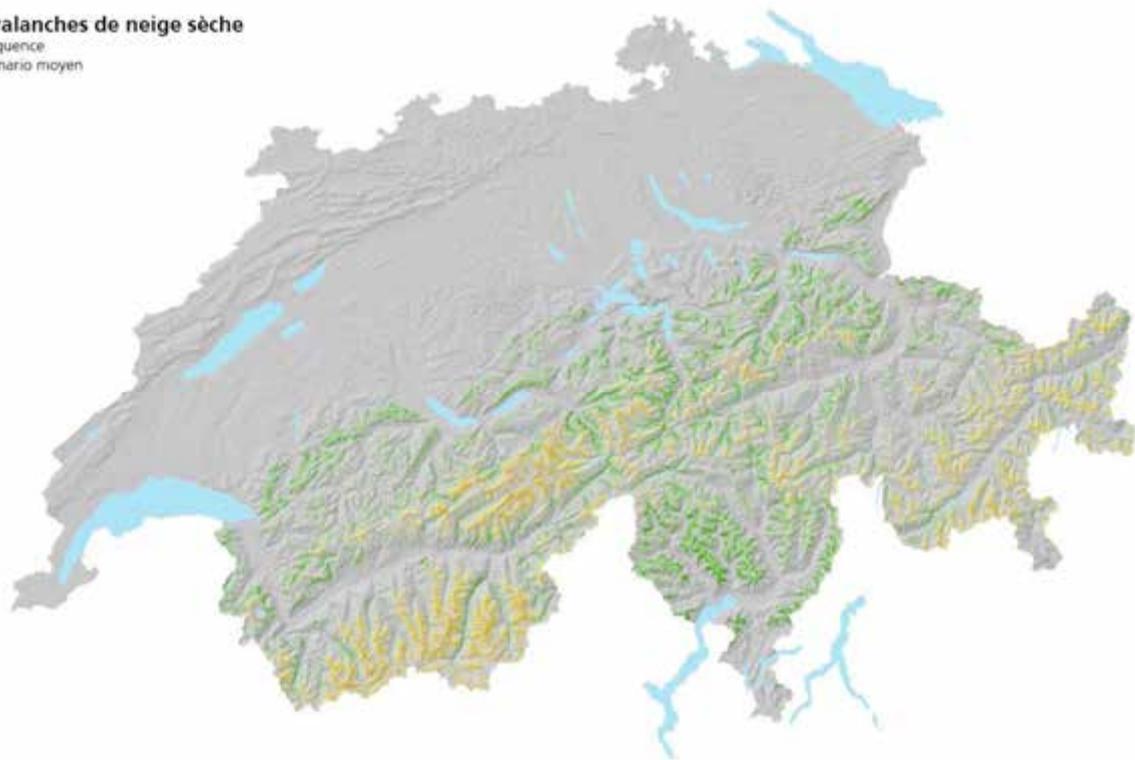
Carte 37

**Avalanches de neige sèche**  
Fortes chutes de neige  
Scénario extrême



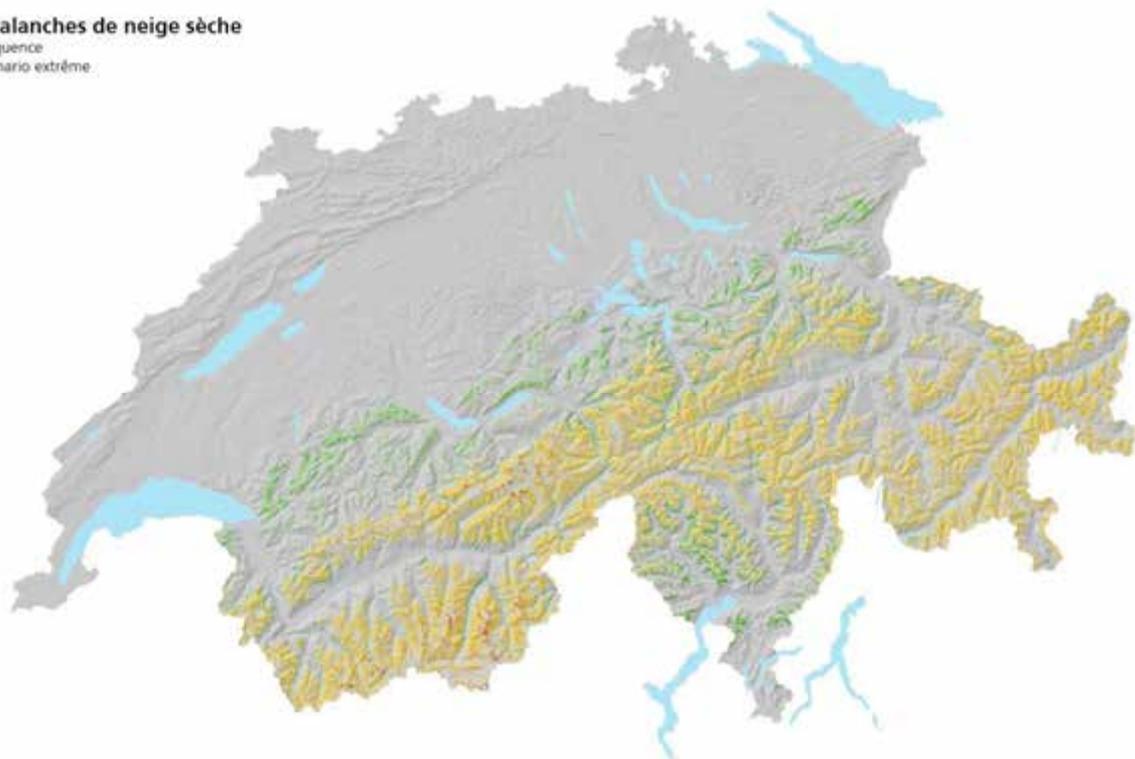
Carte 38

**Avalanches de neige sèche**  
Fréquence  
Scénario moyen



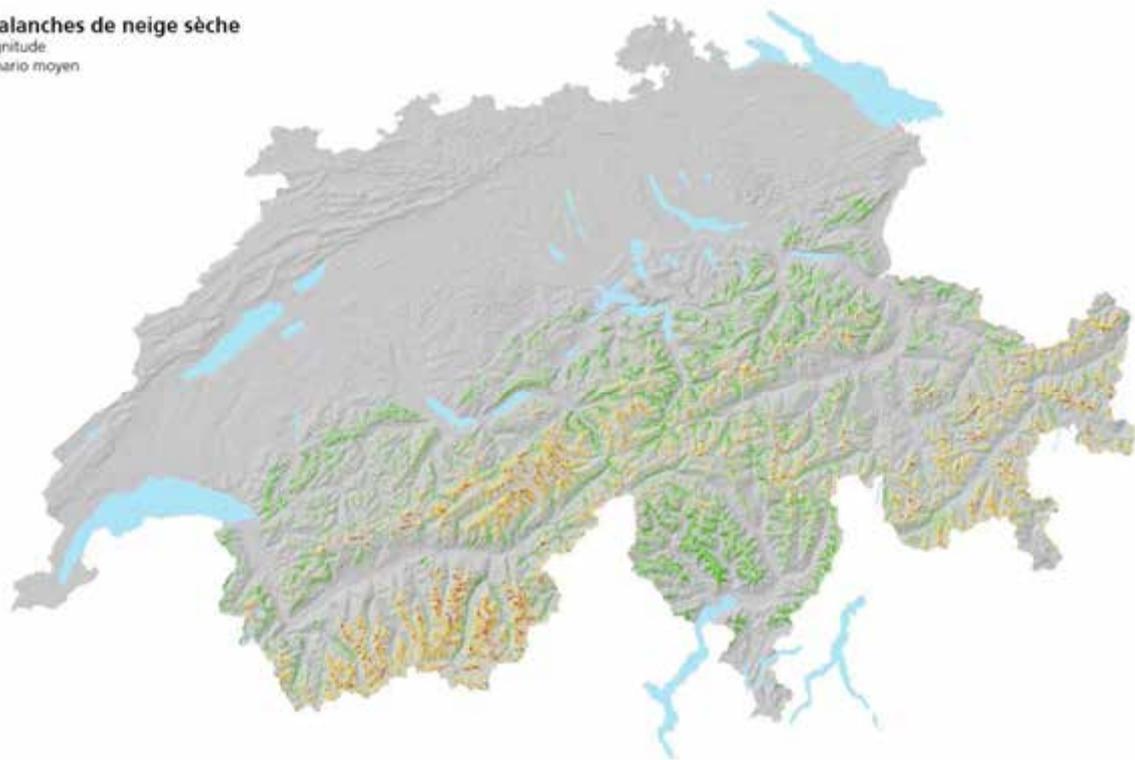
Carte 39

**Avalanches de neige sèche**  
Fréquence  
Scénario extrême



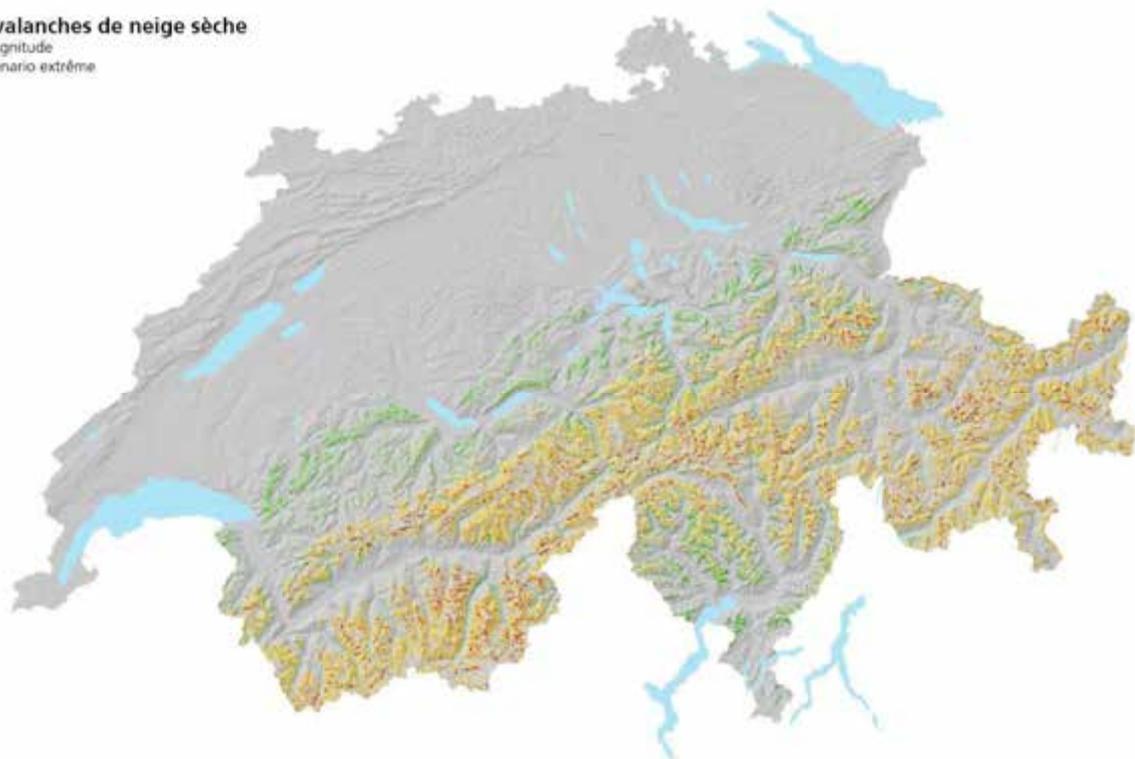
Carte 40

**Avalanches de neige sèche**  
Magnitude  
Scénario moyen



Carte 41

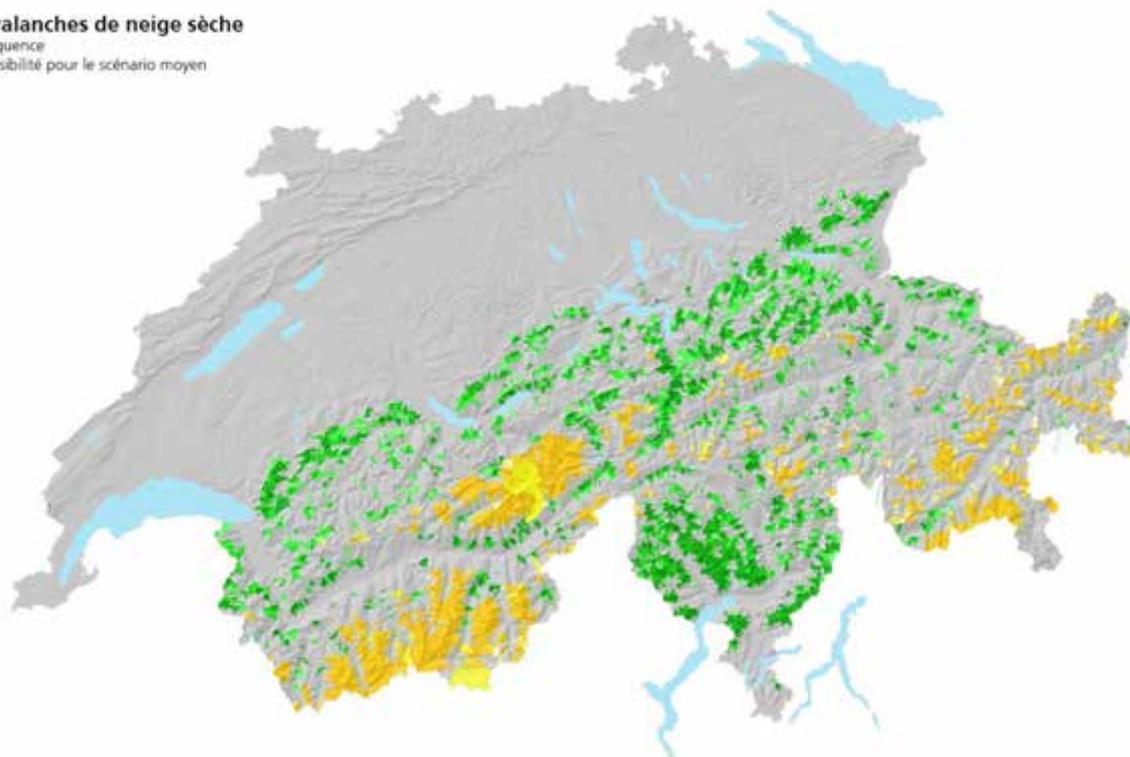
**Avalanches de neige sèche**  
Magnitude  
Scénario extrême



Carte 42

### 4.3 Résultats agrégés

**Avalanches de neige sèche**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario moyen



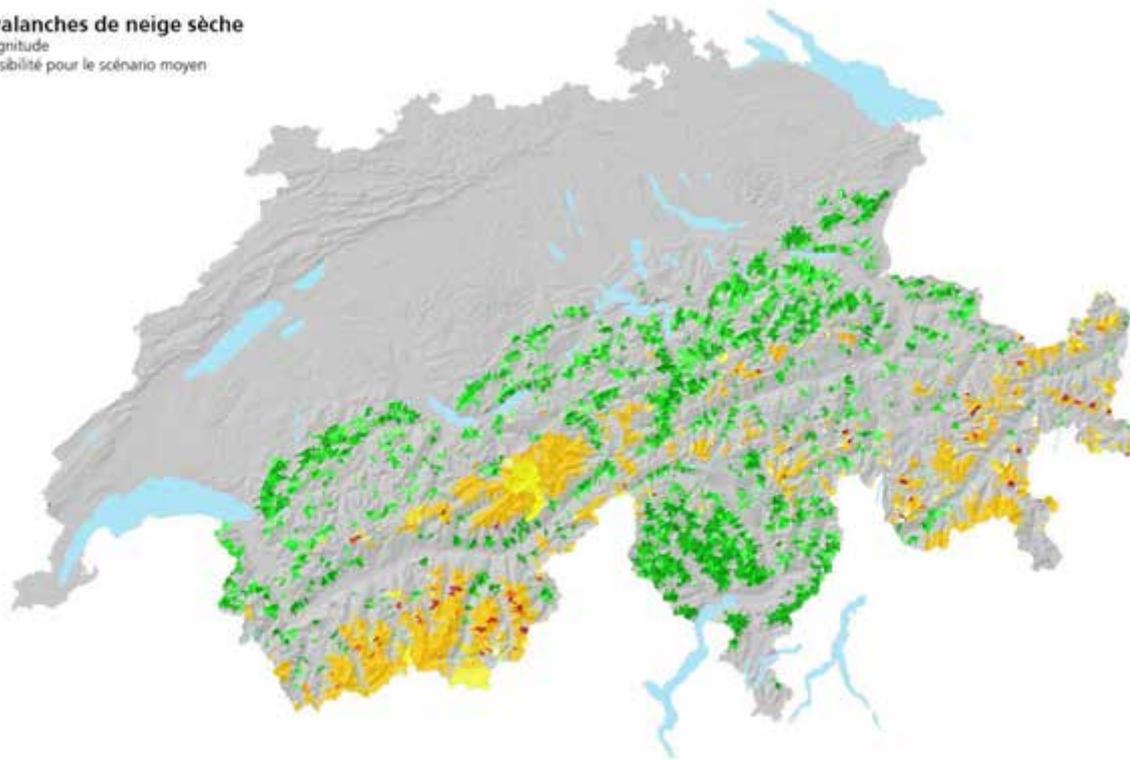
Carte 43

**Avalanches de neige sèche**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario extrême



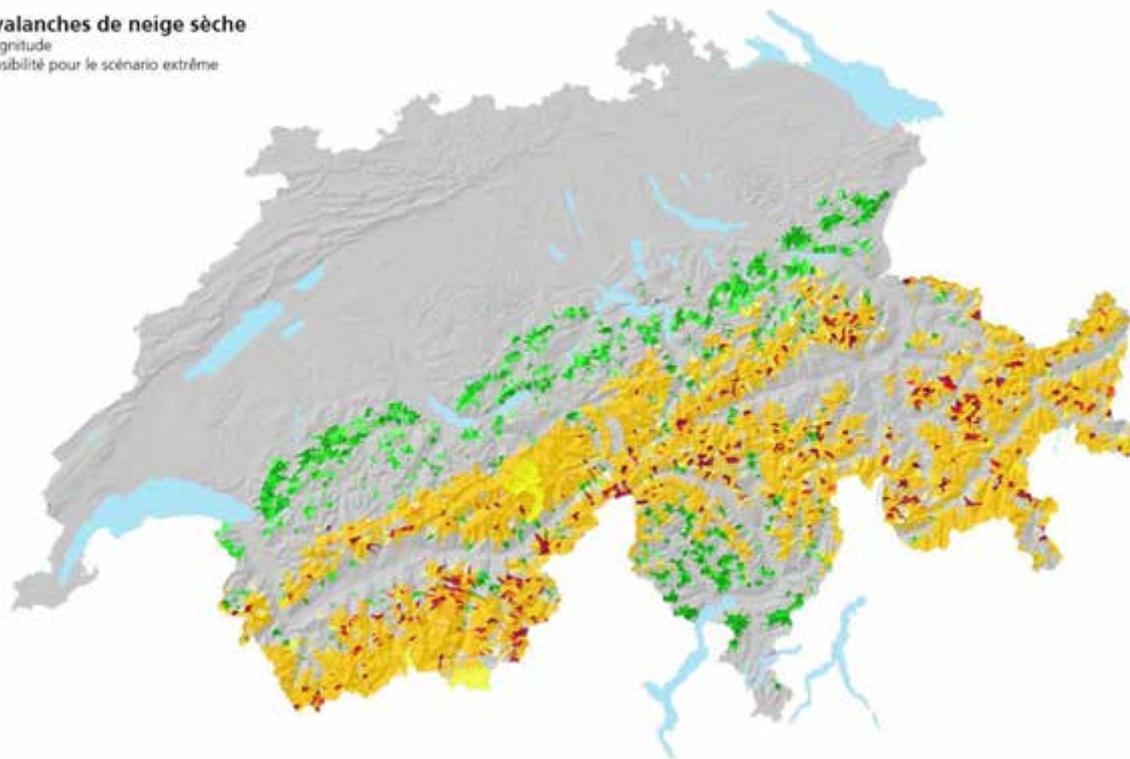
Carte 44

**Avalanches de neige sèche**  
Magnitude  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 45

**Avalanches de neige sèche**  
Magnitude  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 46

## 5 Avalanches de neige mouillée

### 5.1 Explications

Afin d'évaluer la sensibilité des avalanches de neige mouillée, seule la quantité de neige accumulée est considérée, l'altitude servant de fait d'indicateur. Une augmentation de la fréquence est observée dans les zones de haute altitude pour le scénario moyen (Carte 47) et une forte augmentation pour le scénario extrême, due à un accroissement des pluies hivernales dans les régions de très haute altitude (Carte 48). Dans la plupart des régions des Préalpes et du Plateau, l'évaluation présente une diminution pour les deux scénarios ; là, les précipitations tombent sous forme de pluie et diminuent ainsi l'épaisseur de la couche de neige.

Pour le scénario moyen, la magnitude diminue pour les régions de basse altitude; elle reste inchangée dans les zones de haute altitude (Carte 49). Une forte augmentation est présente dans les zones de haute altitude pour le scénario extrême (Carte 50).

L'évaluation agrégée ne considère que les zones de départ des avalanches. C'est pourquoi le Plateau et la plupart des vallées des Préalpes, des Alpes ainsi que le Sud de la Suisse ne présentent aucun changement de fréquence et de magnitude car il n'y a pas de telles zones à ces endroits (Carte 51 à Carte 54). Dans les Préalpes, il en résulte une diminution de la fréquence pour les deux scénarios et dans les Alpes une augmentation. Pour le scénario extrême, les Alpes bernoises, les hautes Alpes valaisannes et la région de la Bernina présentent une forte augmentation.

En ce qui concerne la magnitude, le scénario moyen montre une diminution dans les régions de haute altitude des Préalpes et du Sud des Alpes (Carte 53). Pour les zones élevées des Alpes, les vallées en général ainsi que le Plateau et le Jura, la situation reste inchangée. A l'opposé, une augmentation voire une forte augmentation de la magnitude est prévue pour les versants élevés des Alpes lors du scénario extrême (Carte 54).

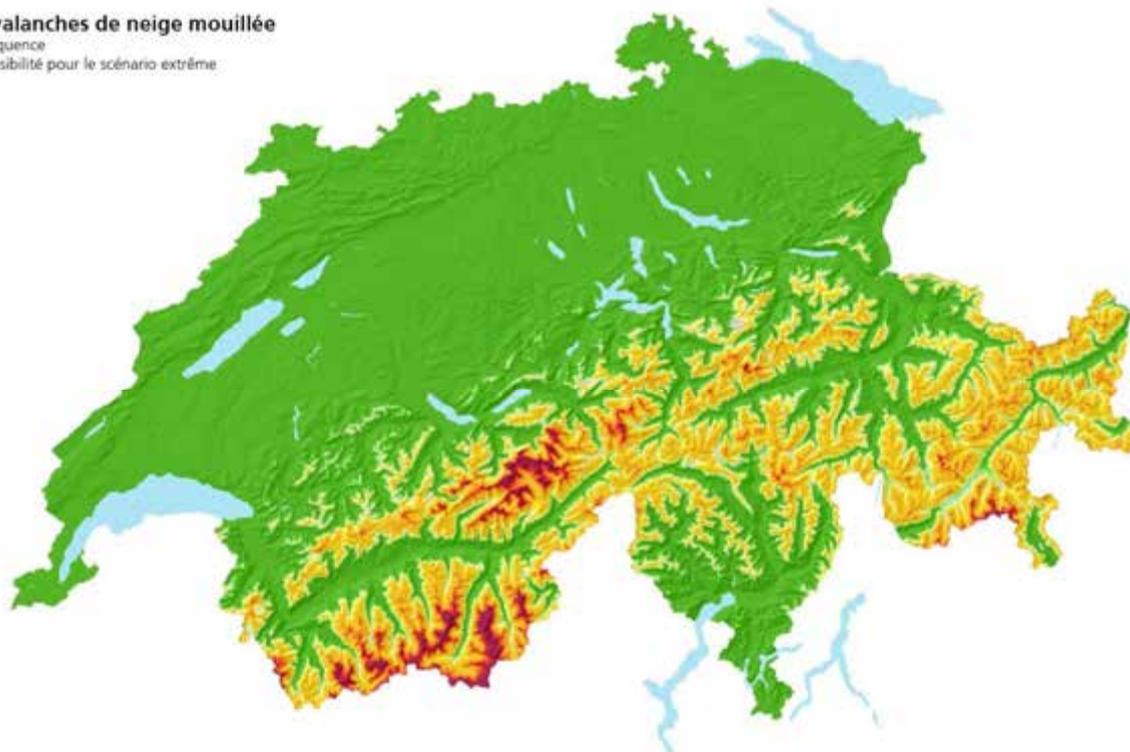
## 5.2 Résultats intermédiaires

**Avalanches de neige mouillée**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 47

**Avalanches de neige mouillée**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 48

**Avalanches de neige mouillée**  
 Magnitude  
 Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 49

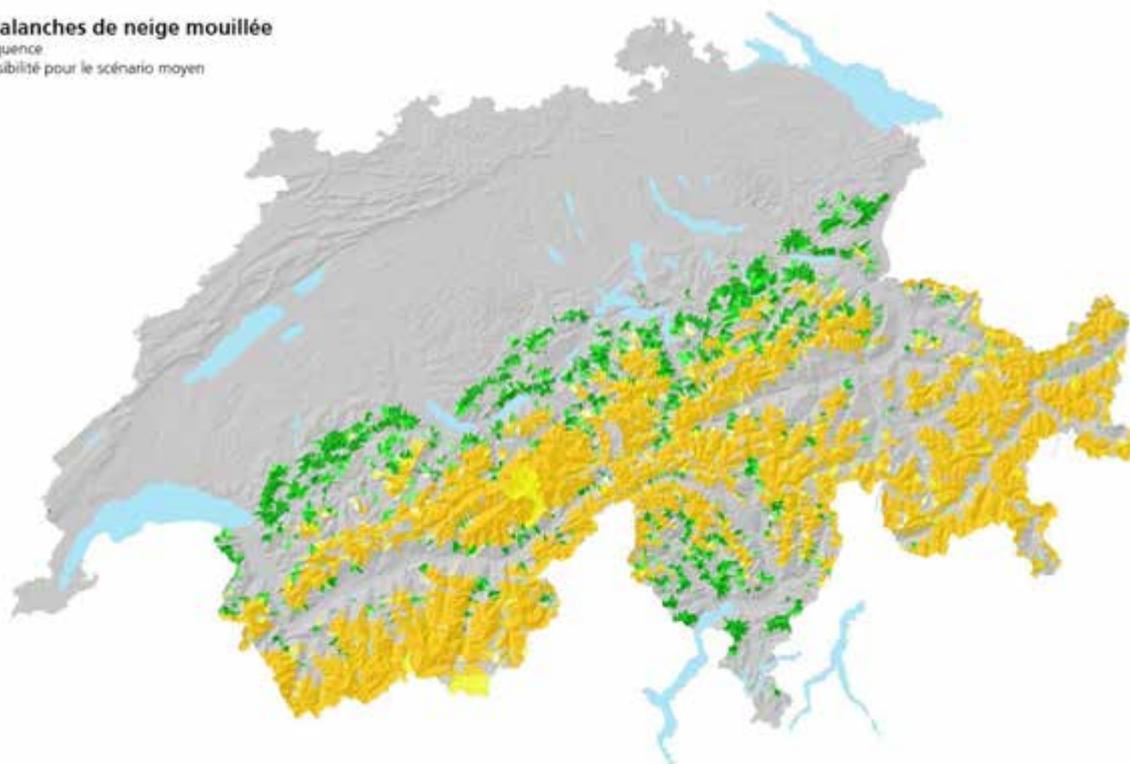
**Avalanches de neige mouillée**  
 Magnitude  
 Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 50

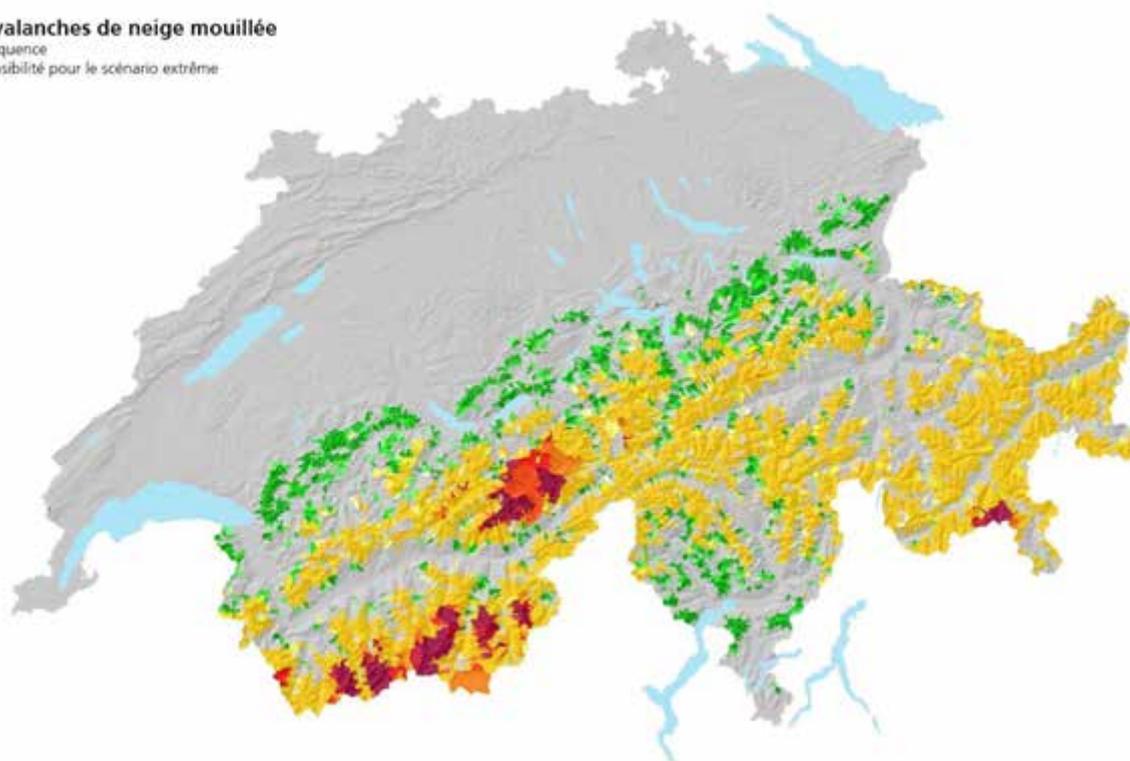
### 5.3 Résultats agrégés

**Avalanches de neige mouillée**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario moyen



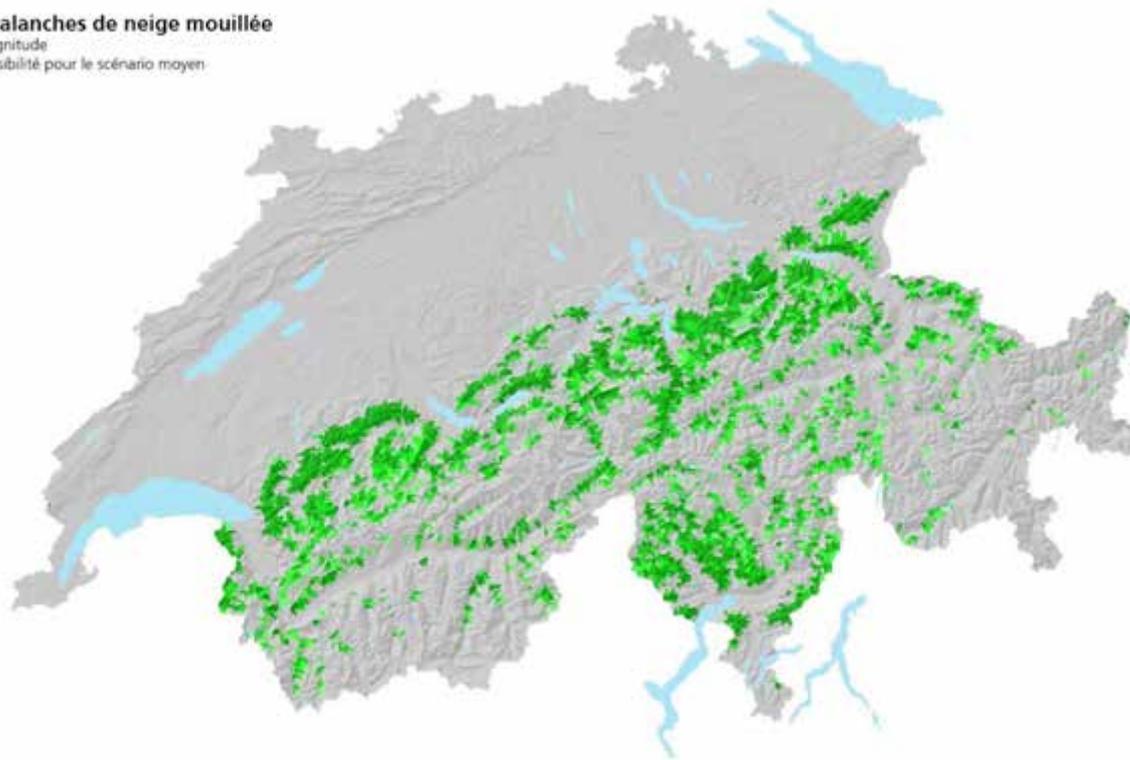
Carte 51

**Avalanches de neige mouillée**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario extrême



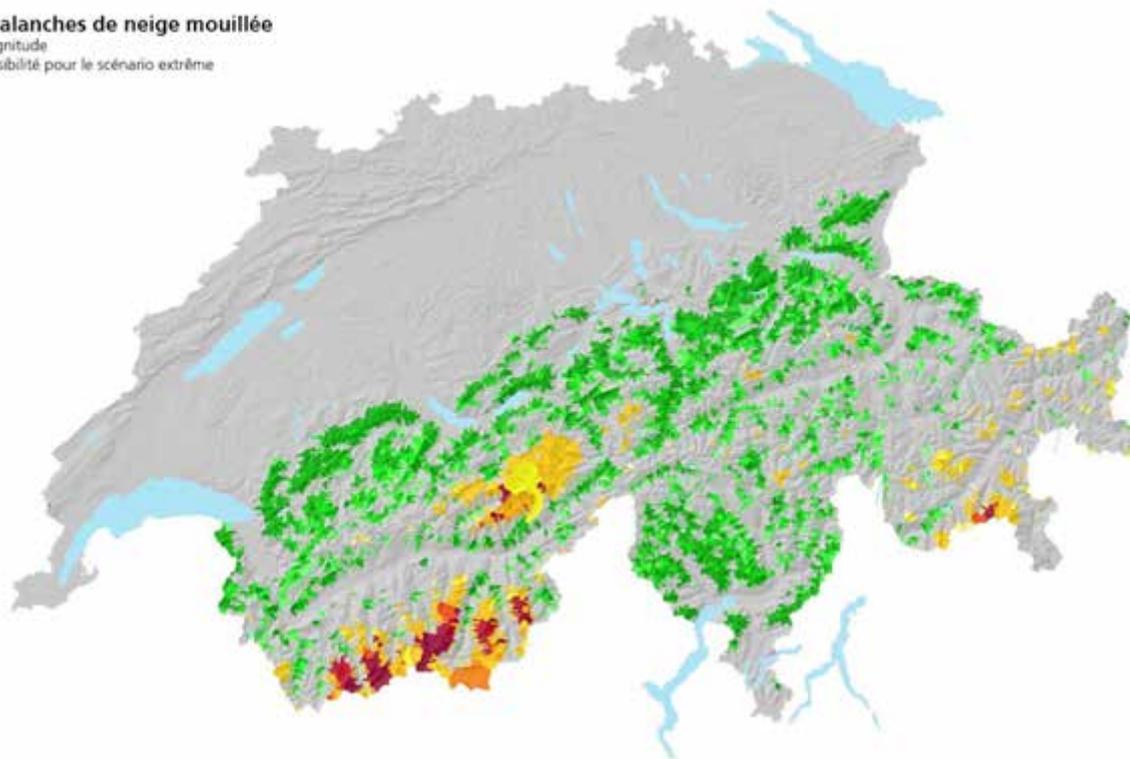
Carte 52

**Avalanches de neige mouillée**  
 Magnitude  
 Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 53

**Avalanches de neige mouillée**  
 Magnitude  
 Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 54

## 6 Coulées boueuses provenant de fortes pentes

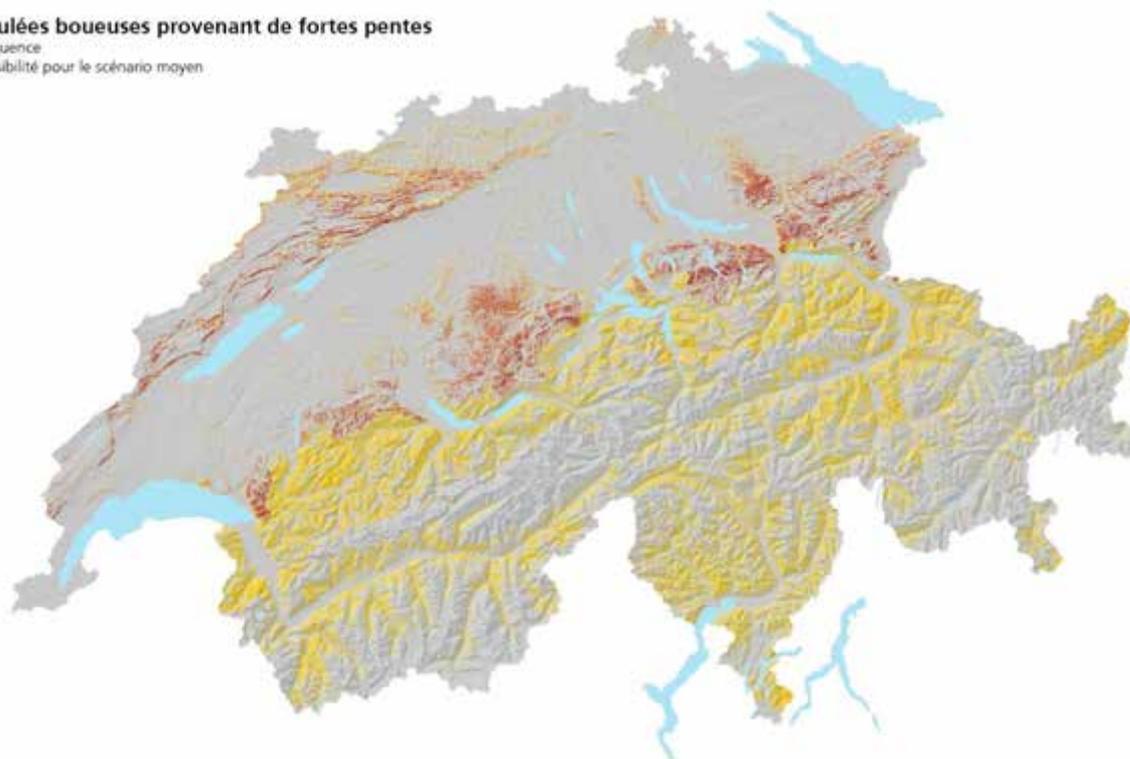
### 6.1 Explications

Seule la fréquence est évaluée pour les coulées boueuses provenant de fortes pentes. Cette évaluation est faite uniquement au niveau des zones de déclenchement. Pour le scénario moyen, cette fréquence augmente dans les Alpes, les Préalpes et le Sud des Alpes. Elle augmente même fortement pour les régions supérieures du Plateau et pour le Jura (Carte 55). Pour le scénario extrême, de grandes régions des Préalpes et des Alpes présentent une forte augmentation (Carte 56). La cause en est principalement une disposition variable plus élevée en automne et en hiver ainsi, qu'en partie, des facteurs déclenchants plus marqués au printemps.

Les résultats agrégés montrent une image comparable (Carte 57 et Carte 58). Pour le scénario extrême, une plus grande partie du Plateau et du Jura démontre une augmentation de la fréquence. De plus, de grandes régions de l'ouest des Préalpes, de Glaris, du Rhin alpin et de la Basse Engadine présentent une forte augmentation.

## 6.2 Résultats intermédiaires

**Coulées boueuses provenant de fortes pentes**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 55

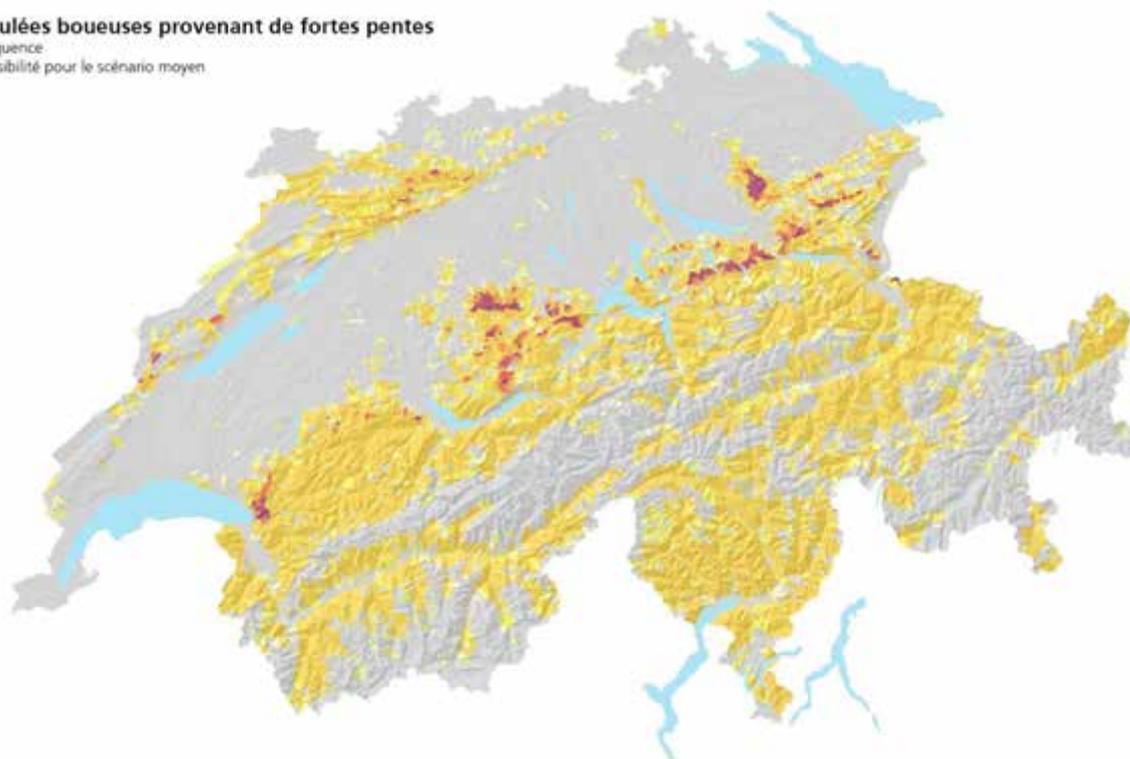
**Coulées boueuses provenant de fortes pentes**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 56

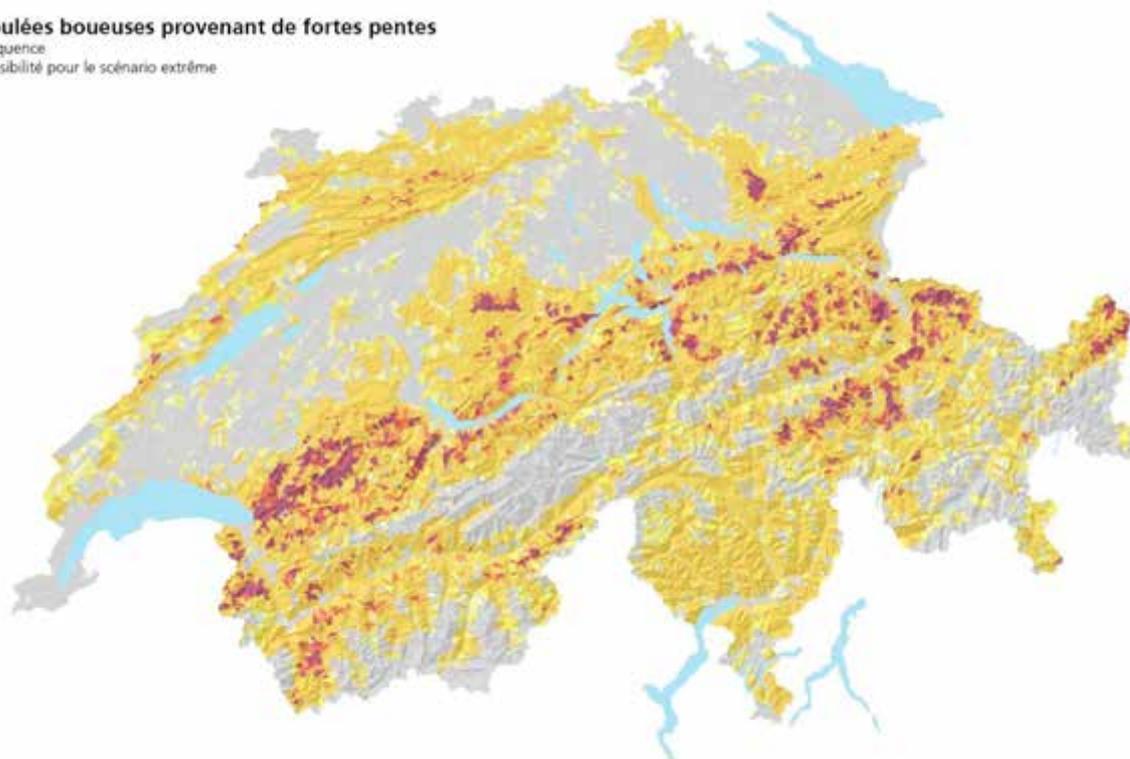
### 6.3 Résultats agrégés

**Coulées boueuses provenant de fortes pentes**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 57

**Coulées boueuses provenant de fortes pentes**  
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 58

## 7 Coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés

### 7.1 Explications

Les coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés sont avant tout un phénomène des Préalpes, des Alpes et des zones de haute altitude du Sud des Alpes. Pour cette raison, la dégradation du permafrost joue un rôle important pour ce processus. Beaucoup moins de régions sont concernées pour le scénario moyen que pour le scénario extrême (Carte 59 et Carte 60). De plus, de grandes surfaces présentent une forte augmentation lors du scénario extrême; le Valais et les Grisons sont particulièrement concernés.

L'apport en eau est le deuxième facteur le plus important ; cette eau peut saturer les éboulis et ainsi les déstabiliser. Une importante quantité d'eau est nécessaire. C'est pourquoi les longues périodes de pluies et les fontes de neiges sont ici pertinentes. Des pluies intensives sont cependant nécessaires pour le déclenchement. La Carte 61 et la Carte 62 montrent l'évaluation combinée de l'apport en eau sous l'angle de la saturation et en tant que facteur déclenchant. Pour le scénario moyen, il faut compter avec une augmentation dans les régions de haute altitude des Alpes, des Préalpes et du Sud de la Suisse, et avec une diminution pour les zones de basse altitude du Sud des Alpes. Pour le scénario extrême, il faut compter sur une augmentation et par endroit sur une forte augmentation pour toute la Suisse à l'exception du Sud des Alpes. A cet endroit, seules les plus hautes régions devraient connaître une augmentation, tandis que dans les vallées une diminution devrait être observée.

La fréquence des coulées boueuses d'éboulis peu consolidés est principalement dépendante de l'apport en eau, ce que montre la carte correspondante pour le scénario moyen (Carte 63). Pour le scénario extrême, moins de régions montrent une forte augmentation en comparaison avec l'apport en eau (Carte 64).

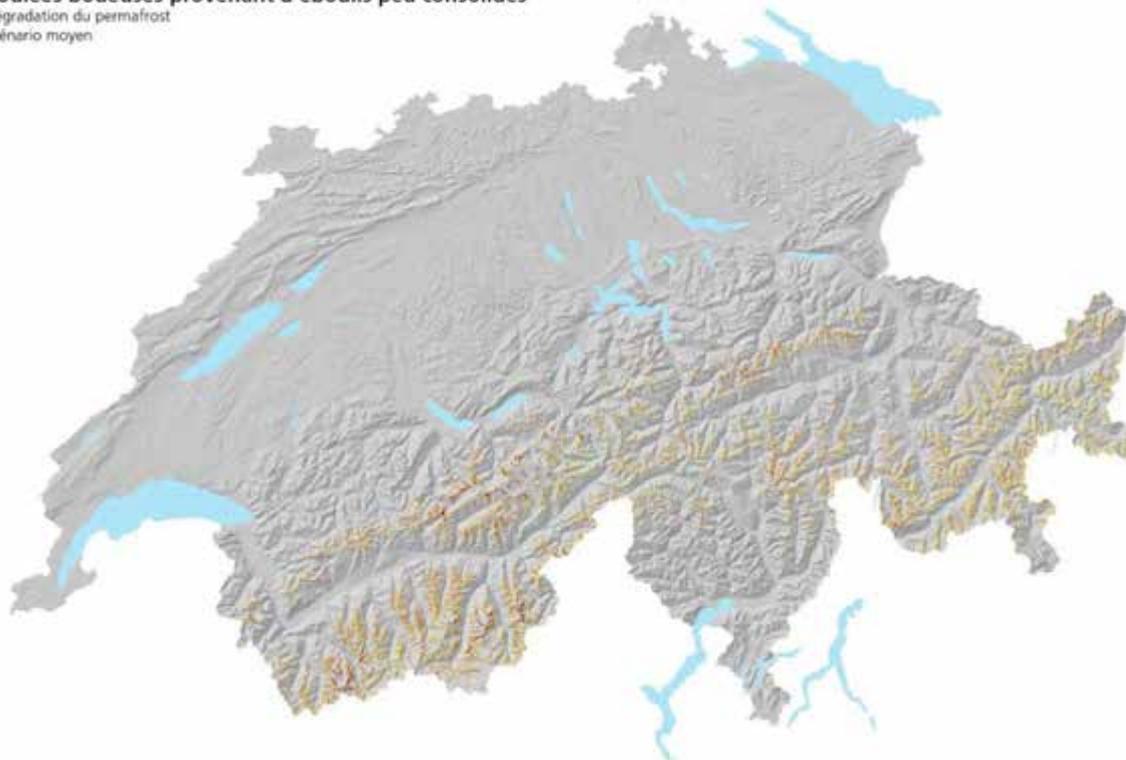
La dégradation du permafrost est le facteur décisif pour la magnitude. Cela se manifeste principalement pour le scénario moyen (Carte 65). De plus grandes régions montrent une diminution pour le scénario extrême (Carte 66). Cela s'explique par le fait que si la fréquence augmente lors d'un changement mineur dans la dégradation du permafrost, la quantité de matériaux meubles disponibles diminue et par conséquent la magnitude aussi.

Pour le scénario moyen, les résultats agrégés montrent une augmentation de la fréquence dans les hautes régions des Préalpes, dans les Alpes et au Sud de la Suisse (Carte 67). Une diminution est visible pour quelques régions au Sud des Alpes. Pour le scénario extrême, plusieurs régions du Valais et des Grisons présentent une forte augmentation de la fréquence (Carte 68). Au Sud de la Suisse, une diminution est relevée pour la plupart des régions.

Pour le scénario moyen, la magnitude ne présente que peu de régions avec un changement (Carte 69). Pour le scénario extrême, il en résulte une image très hétérogène (Carte 70). Au nord des Alpes, une grande partie des régions montrent une diminution. Dans les Alpes valaisannes et grisonnes, des régions présentent à la fois une diminution, mais beaucoup une augmentation et quelques-unes, une forte augmentation.

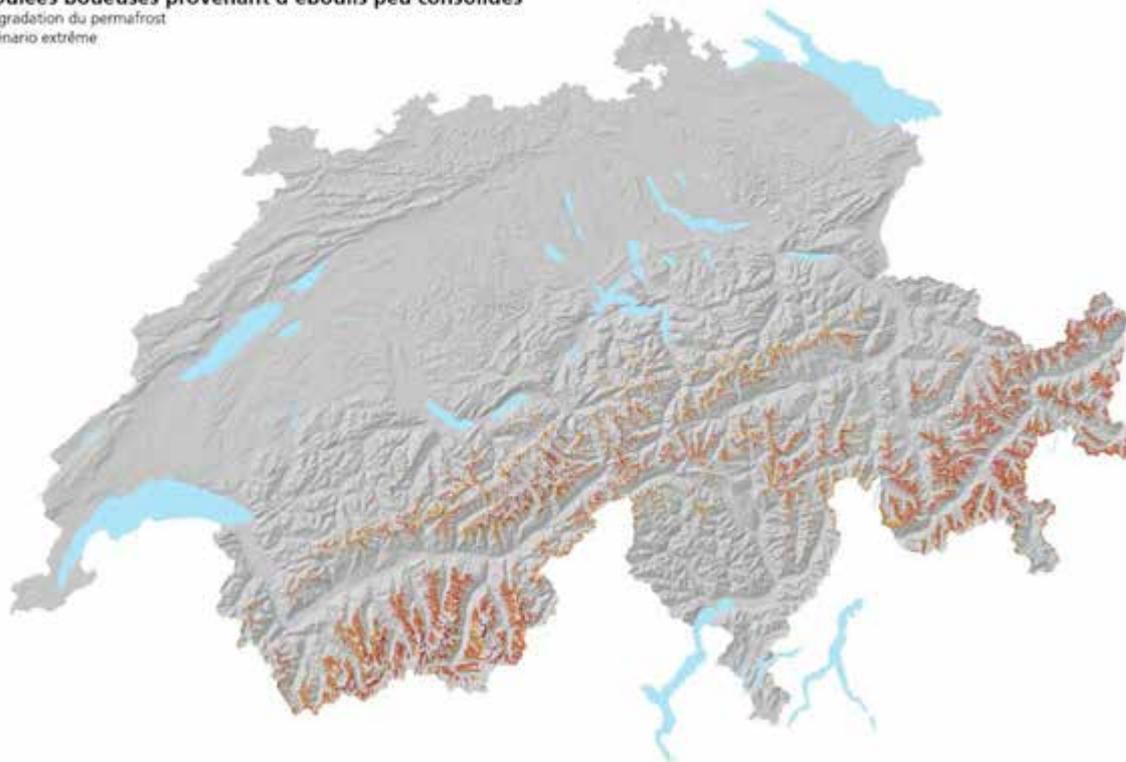
## 7.2 Résultats intermédiaires

**Coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés**  
 Dégradation du permafrost  
 Scénario moyen



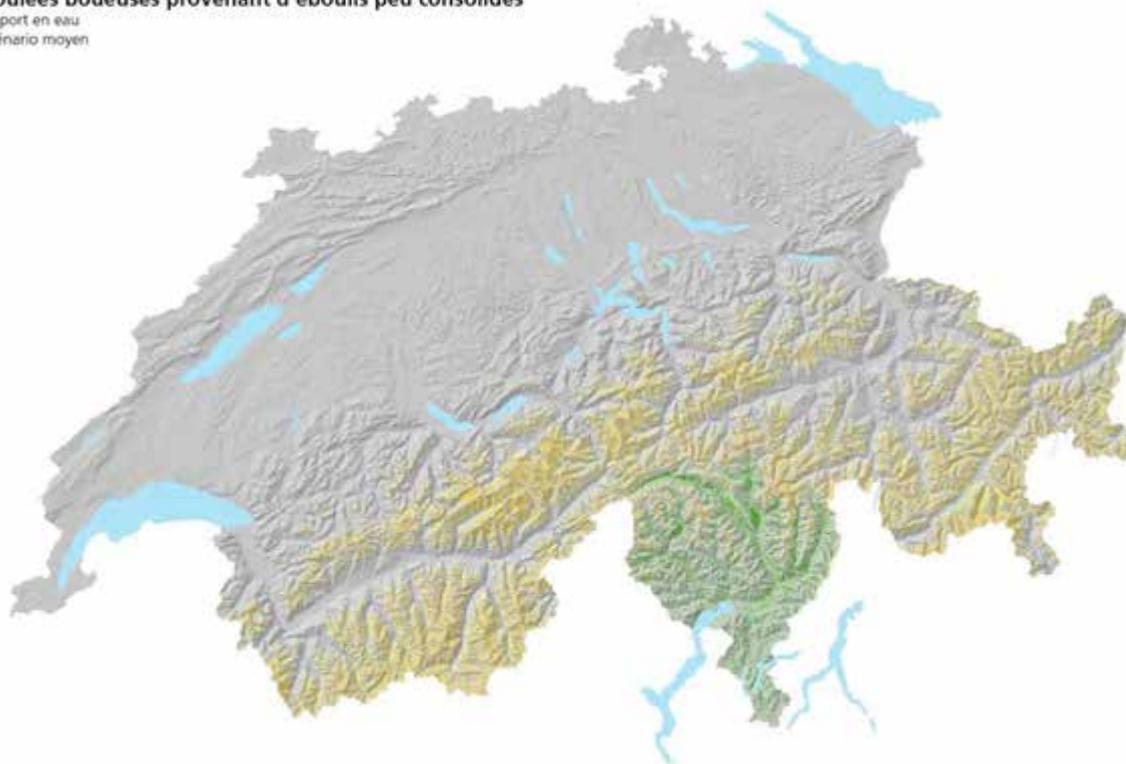
Carte 59

**Coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés**  
 Dégradation du permafrost  
 Scénario extrême



Carte 60

**Coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés**  
 Apport en eau  
 Scénario moyen



Carte 61

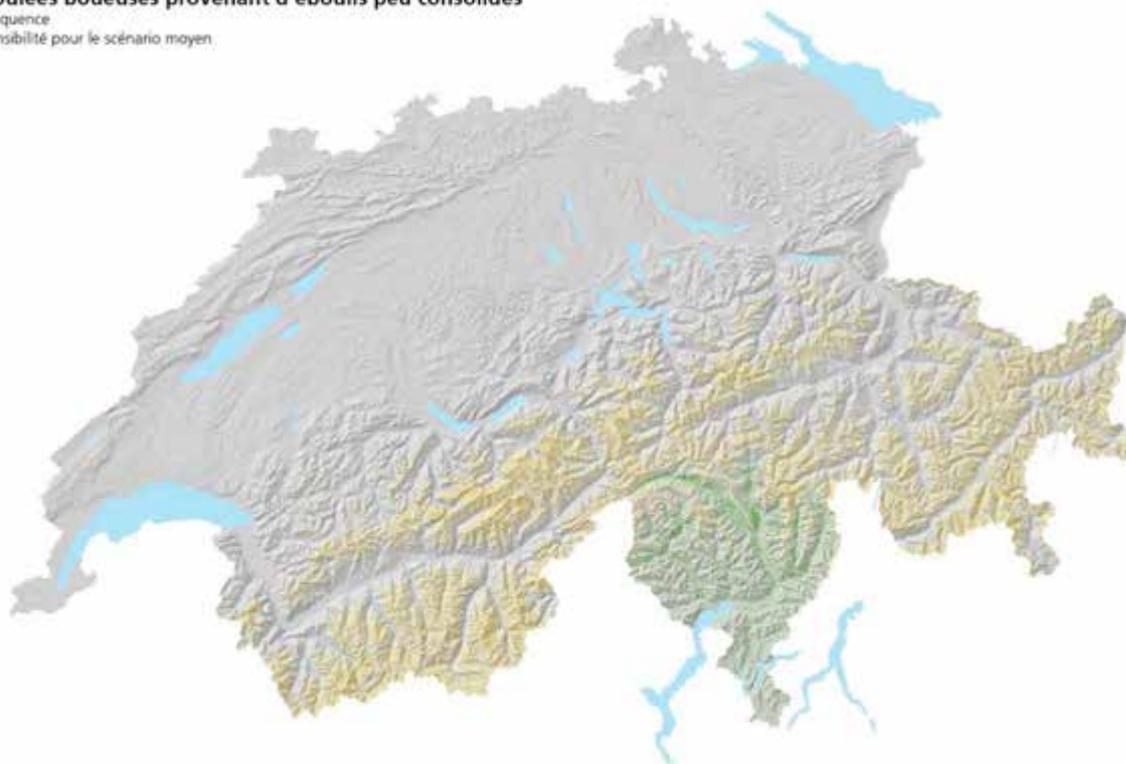
**Coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés**  
 Apport en eau  
 Scénario extrême



Carte 62

**Coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés**

Fréquence  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 63

**Coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés**

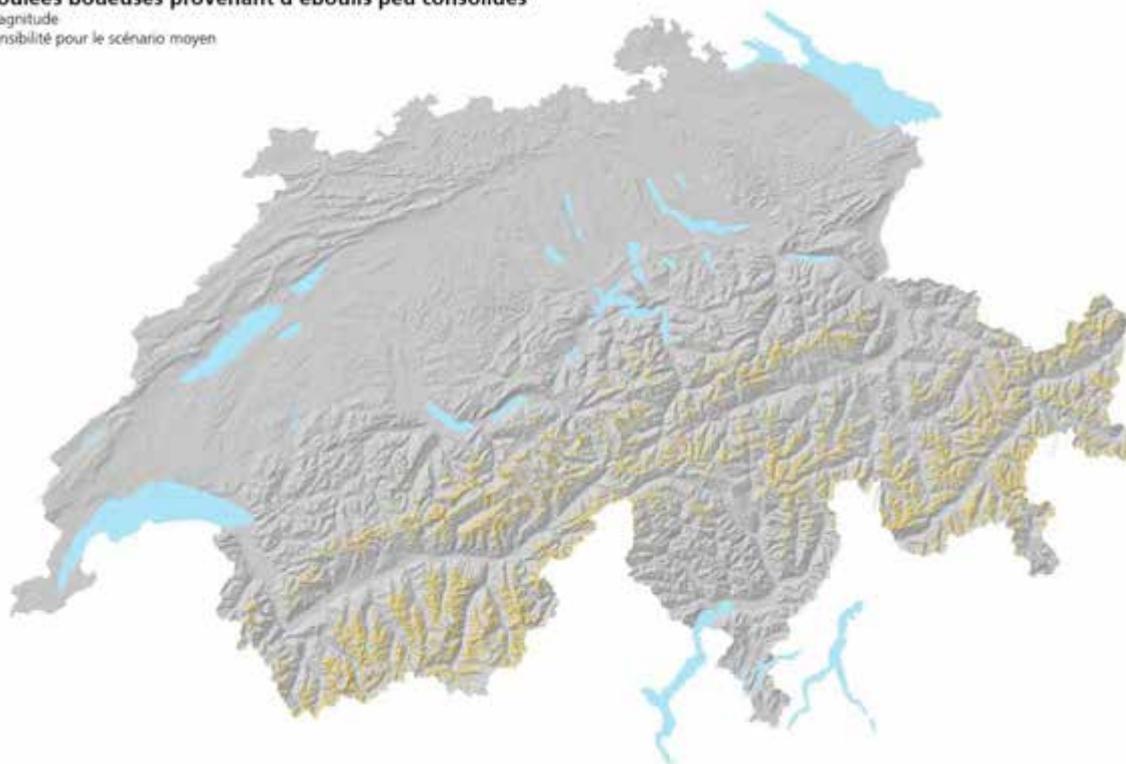
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 64

**Coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés**

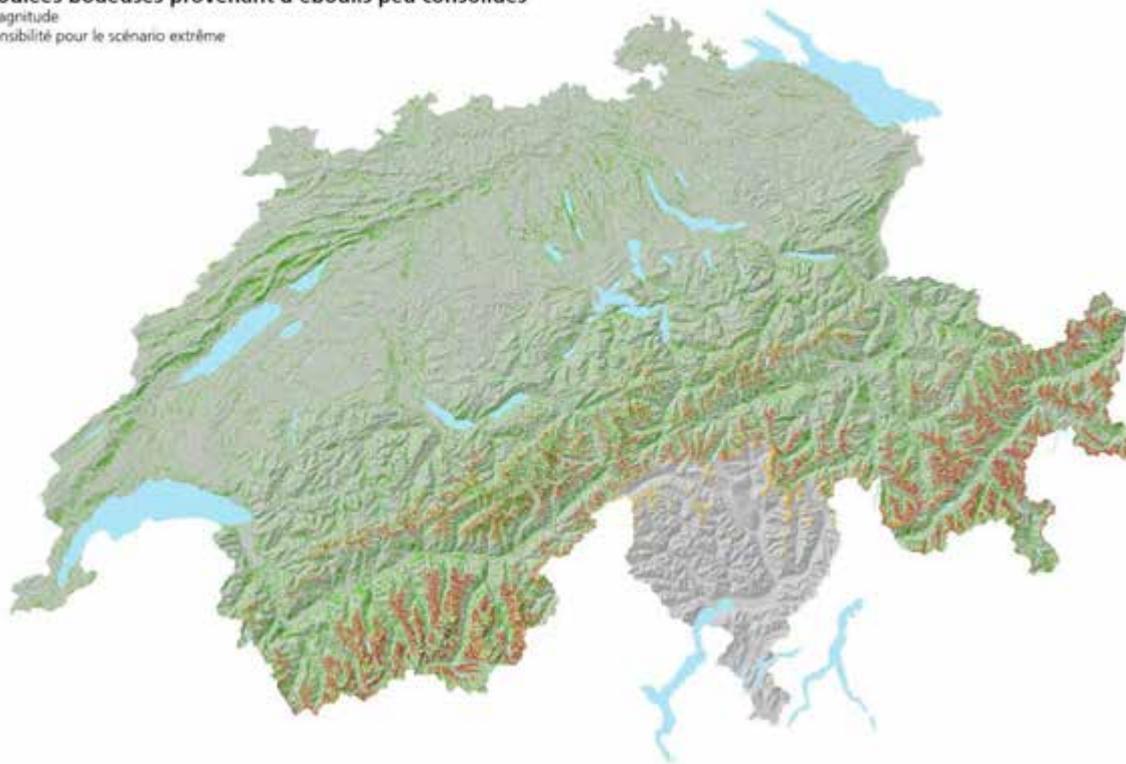
Magnitude  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 65

**Coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés**

Magnitude  
Sensibilité pour le scénario extrême

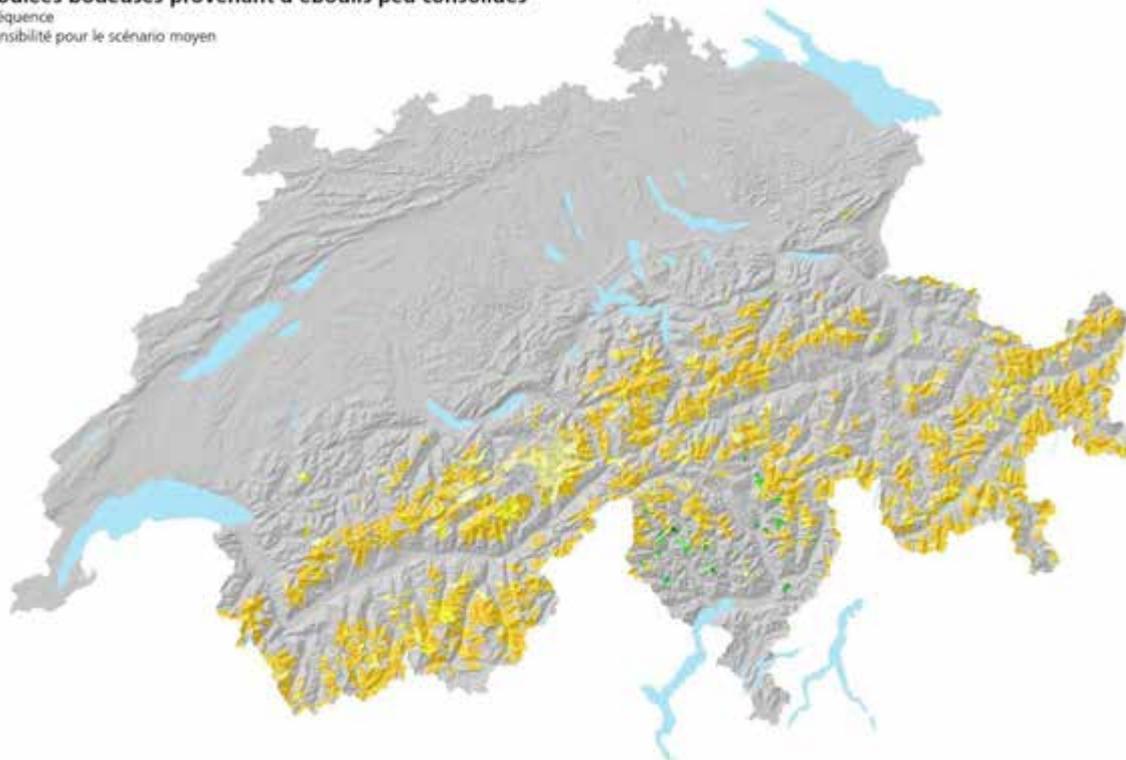


Carte 66

### 7.3 Résultats agrégés

**Coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés**

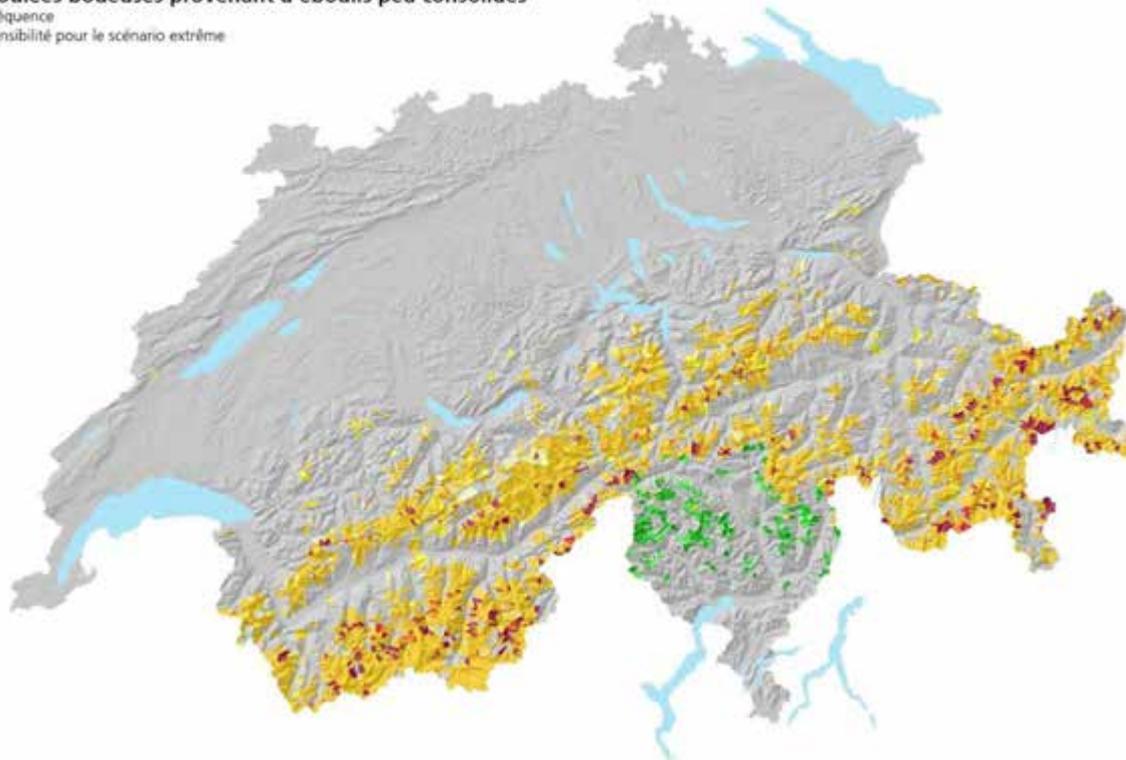
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 67

**Coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés**

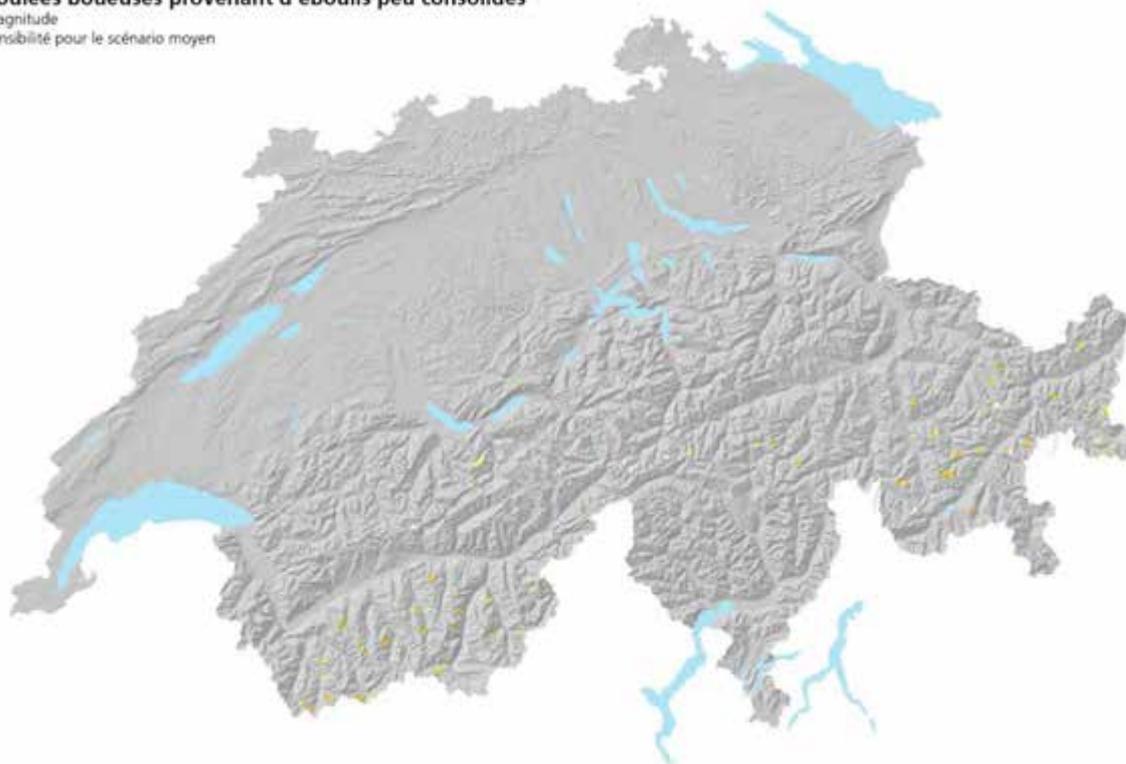
Fréquence  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 68

**Coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés**

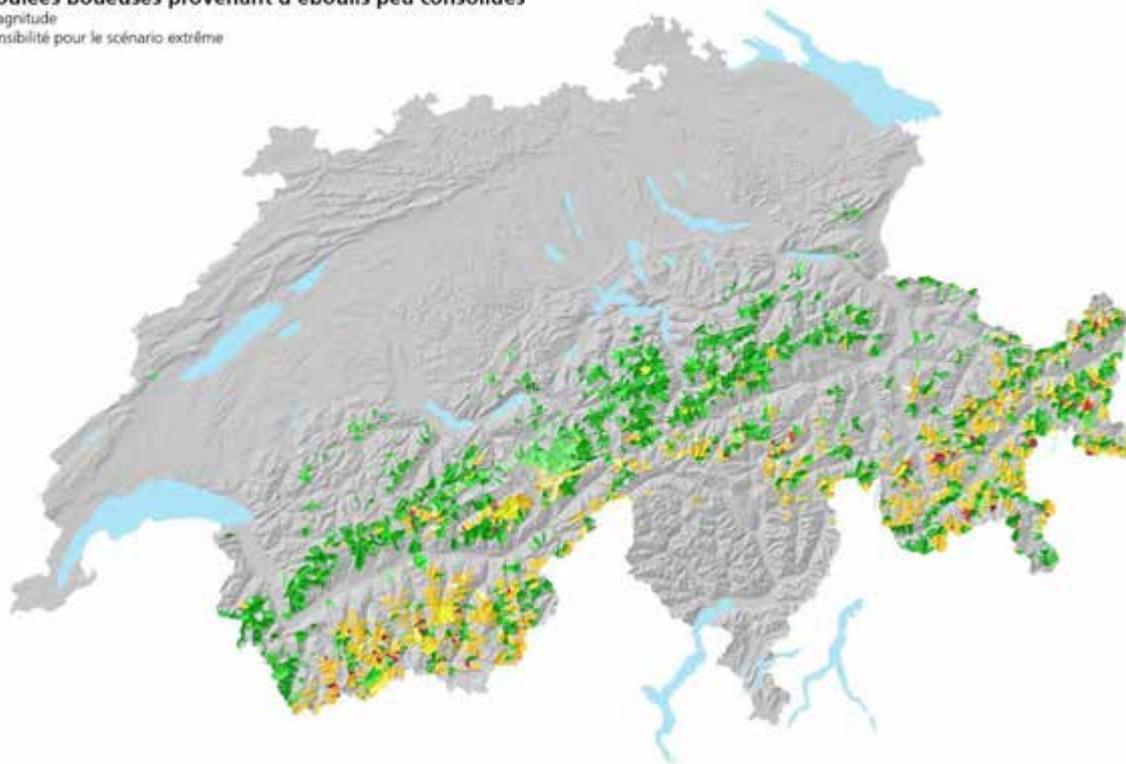
Magnitude  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 69

**Coulées boueuses provenant d'éboulis peu consolidés**

Magnitude  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 70

## 8 Torrents

### 8.1 Explications

Pour évaluer l'apport en charriage provenant de régions de dépôts récents, l'évaluation des différents processus de pente a été agrégée. Pour le scénario moyen, une forte augmentation est présente dans les hautes régions des Alpes, mais aussi dans les régions de flysch et de molasse des Préalpes (Carte 71). Dans les autres régions des Préalpes, du Jura et du Sud de la Suisse, il en résulte majoritairement une augmentation de l'apport en charriage provenant des régions de dépôts récents. Pour le scénario extrême, encore un plus grand nombre de surfaces des Préalpes, de la région de Glaris et du Rhin antérieur présentent une forte augmentation (Carte 72). Dans le Jura, de grandes régions présentent une augmentation ; cela est aussi valable pour quelques zones du Plateau.

En plus de la sensibilité de l'apport en charriage, la sensibilité des facteurs déclenchants est aussi évaluée. Une augmentation uniforme est présente dans les Alpes, les Préalpes et une grande partie du Sud de la Suisse pour le scénario moyen (Carte 73). Pour les régions de haute altitude du Plateau et du Jura, une forte augmentation est prévisible, alors que pour les régions de basse altitude, une augmentation moyenne est attendue. Pour le scénario extrême, une forte augmentation des facteurs déclenchants est enregistrée pour presque toute la Suisse (Carte 74).

Grâce à la combinaison de l'évaluation de l'apport de charriage et des facteurs déclenchants, la fréquence des petits, grands et très grands événements torrentiels est évaluée. Pour les petits événements et le scénario moyen, il en résulte une augmentation dans toute la Suisse à l'exception de petites régions du Tessin (Carte 75). Les régions de haute altitude située dans les Alpes, mais aussi les secteurs de flysch et de molasse, présentent même une forte augmentation. Dans le cas du scénario extrême, une forte augmentation de la fréquence est valable pour une grande partie des Alpes, des Préalpes, du Sud de la Suisse et du Jura (Carte 76). Pour les deux scénarios, l'augmentation doit principalement être attribuée à l'augmentation de la fréquence des événements déclenchants.

De la fréquence des grands événements découle une image différenciée (Carte 77). Dans les régions alpines de haute altitude, l'évaluation produit une forte augmentation. Dans les zones alpines de basse altitude, sans les vallées, et dans les Préalpes, seule une augmentation moyenne est présente. Pour les parties de l'ouest et du centre du Jura et pour les régions élevées du Plateau, il en résulte une diminution. Finalement, dans les vallées des Alpes et pour les régions de basse altitude du Plateau, la situation reste inchangée.

Pour le scénario extrême, seules quelques régions présentent encore une forte augmentation. Cela est dû à la fréquence importante des événements déclencheurs (Carte 78) ; là, l'apport en charriage dans les zones d'accumulation récente est limité. Des vastes parties des Alpes et des Préalpes présentent une augmentation, cette dernière étant moins marquée dans le Jura et au Sud des Alpes. La fréquence de grands événements est majoritairement en diminution sur le Plateau.

La fréquence de très grands événements diminue dans le Jura et les régions élevées du Plateau pour le scénario moyen (Carte 79). Pour les hautes régions des Alpes et du Sud de la Suisse, il en résulte une augmentation. La situation reste en grande partie inchangée dans les zones de basse altitude des Alpes, du Sud des Alpes, des Préalpes et du bas Plateau.

Pour le scénario extrême, une diminution de la fréquence de très grands événements est présente sur le Plateau et sur de vastes parties du Sud de la Suisse. (Carte 80). Cette diminution est aussi relevée dans les basses régions des Alpes et des Préalpes. Une augmentation est par contre prévisible dans les régions de haute altitude.

Un autre domaine à évaluer est l'apport en charriage à partir d'anciennes zones d'accumulation. Cet apport contient d'une part l'érosion des berges provenant de ces zones et d'autre part les matériaux abandonnés par le retrait des glaciers. Dans une première étape, l'importance relative de l'érosion des berges est évaluée, indépendamment des scénarios climatiques. La signification de l'érosion des berges est considérée comme faible pour le Plateau, le Jura et les régions avec des glaciers importants (Carte 81). Dans les Préalpes et les régions de basse altitude des Alpes, cette signification est importante à très importante.

L'évaluation de l'apport en charriage provenant du retrait glaciaire contient, dans une première étape, l'évaluation du potentiel de charriage des nouvelles zones libérées par les glaces à partir de l'index érosion-sédimentation (IES). Un potentiel important de matériaux provient plutôt de petits glaciers situés en contrebas de nombreuses parois rocheuses. De telles zones se situent essentiellement dans les Grisons, dans les régions de Glaris et d'Uri, dans la vallée de Conches et dans la partie ouest des Alpes bernoises (Carte 82). Ce potentiel est moindre dans les secteurs des grandes vallées glaciaires en Valais et dans les Alpes bernoises.

Dans une deuxième étape, le pourcentage de surfaces résultant du retrait glaciaire est mis en relation avec l'ensemble du bassin versant, puis inclus dans l'évaluation. Une image inversée par rapport aux résultats ci-dessus est observée. Les grandes zones glaciaires des Alpes bernoises et valaisannes mais aussi de la Haute Engadine et du Val Bregaglia présentent un grand pourcentage de zones libérées par les glaciers; ceci est visible pour le scénario moyen (Carte 83), mais encore plus pour le scénario extrême (Carte 84).

Pour le scénario moyen, la combinaison des deux évaluations présente une augmentation dans la plupart des régions et pour quelques régions une forte augmentation (Carte 85). Pour le scénario extrême, encore plus de régions présentent une forte augmentation; il n'est toutefois pas possible de déduire des tendances générales (Carte 86).

La combinaison entre l'importance de l'érosion des berges et le charriage de matériaux provenant du retrait des glaciers représente le potentiel de matériaux pour les dépôts anciens. Cela figure à la Carte 87 pour le scénario moyen et à la Carte 88 pour le scénario extrême. Ce potentiel est faible sur le Plateau et dans le Jura pour les deux scénarios.

Comme pour les dépôts récents, les fréquences sont évaluées dans une seconde étape pour les petits, les grands et les très grands événements provenant des dépôts anciens. De plus, le potentiel de charriage est combiné avec les facteurs de déclenchement. Dans les zones de dépôts anciens, la règle veut qu'une augmentation des facteurs déclenchants conduit aussi à une augmentation de la fréquence des événements, pour toutes les tailles d'événements; en effet, il y a là une disponibilité en matériaux de charriage quasiment illimitée.

Lors de petits événements et pour le scénario moyen, il faut compter avec une augmentation, souvent avec une forte augmentation, dans une grande partie des Préalpes et des Alpes, ainsi qu'au Sud des Alpes (Carte 89). Pour le scénario extrême, une forte augmentation se dessine de façon généralisée (Carte 90), ceci en raison de la forte augmentation des facteurs déclenchants. Pour le Plateau et le Jura, seules quelques régions sont concernées par un changement, cela pour les deux scénarios.

Lors de grands événements, une grande partie des Alpes et des Préalpes présente une augmentation pour le scénario moyen (Carte 91). Au bord nord des Alpes, il y a plus de régions avec une très forte augmentation. Pour le scénario extrême, une grande partie des zones connaissent une forte augmentation (Carte 92).

Lors de très grands événements, l'évaluation indique seulement pour quelques régions du nord des Alpes une forte augmentation pour le scénario moyen (Carte 93). Pour les autres régions, il en résulte juste une augmentation. Pour le scénario extrême, plus de régions présentent à nouveau une forte augmentation, sans qu'une règle générale puisse en être déduite (Carte 94).

Pour l'estimation finale, les évaluations des zones de dépôts anciens et récents sont réunies. Il en résulte ainsi, pour les petits événements, une forte augmentation dans une grande partie des Alpes, des Préalpes et du Sud de la Suisse, aussi bien pour le scénario moyen (Carte 95) que pour le scénario extrême (Carte 96). Une simple augmentation est présente sur le Plateau. Dans le Jura, et pour le scénario extrême, de nombreuses régions atteignent le niveau de forte augmentation.

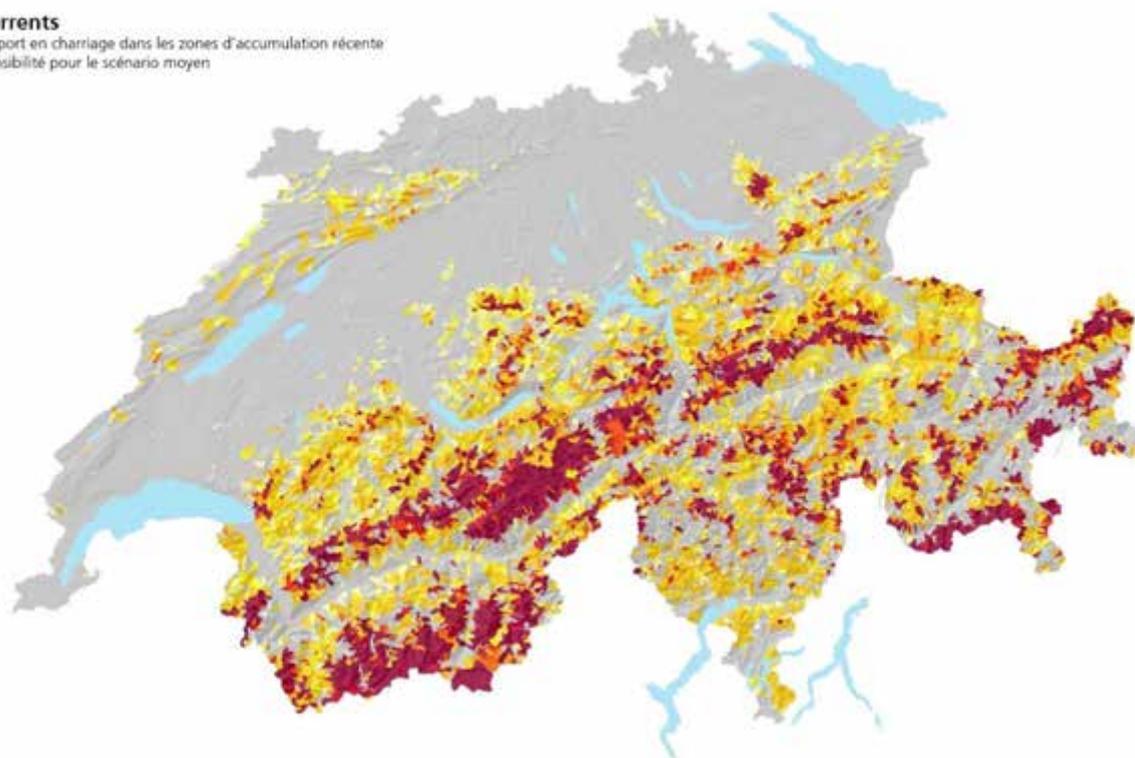
Pour les grands événements, une forte augmentation est à prévoir dans les régions de haute altitude des Préalpes et des Alpes, mais une simple augmentation pour les vallées lors du scénario moyen (Carte 97). Dans le Jura et en bordure du Plateau, une diminution se dessine. Sur le Plateau lui-même, il n'y a pas de changement. Dans le scénario extrême, une diminution est présente sur le Plateau (Carte 98). Au Sud de la Suisse, une augmentation des régions avec la valeur «diminution» apparaît. Par contre, un peu plus de régions des Alpes affichent un niveau de «forte augmentation».

Pour les très grands événements et le scénario moyen, une diminution est attendue pour le Jura et les régions de haute altitude du Plateau, tandis que le Plateau lui-même ne subit aucun changement (Carte 99). Dans les Alpes et les Préalpes, une grande partie est évaluée en augmentation, parfois partiellement en forte augmentation. Lors du scénario extrême, l'évaluation du Plateau et d'une partie du Jura et du Sud de la Suisse donne une diminution (Carte 100). Dans les Alpes et les Préalpes, l'évaluation peut aller d'une diminution à une forte augmentation ; cependant, les diminutions proviennent essentiellement des régions de basse altitude.

## 8.2 Résultats intermédiaires

### Torrents

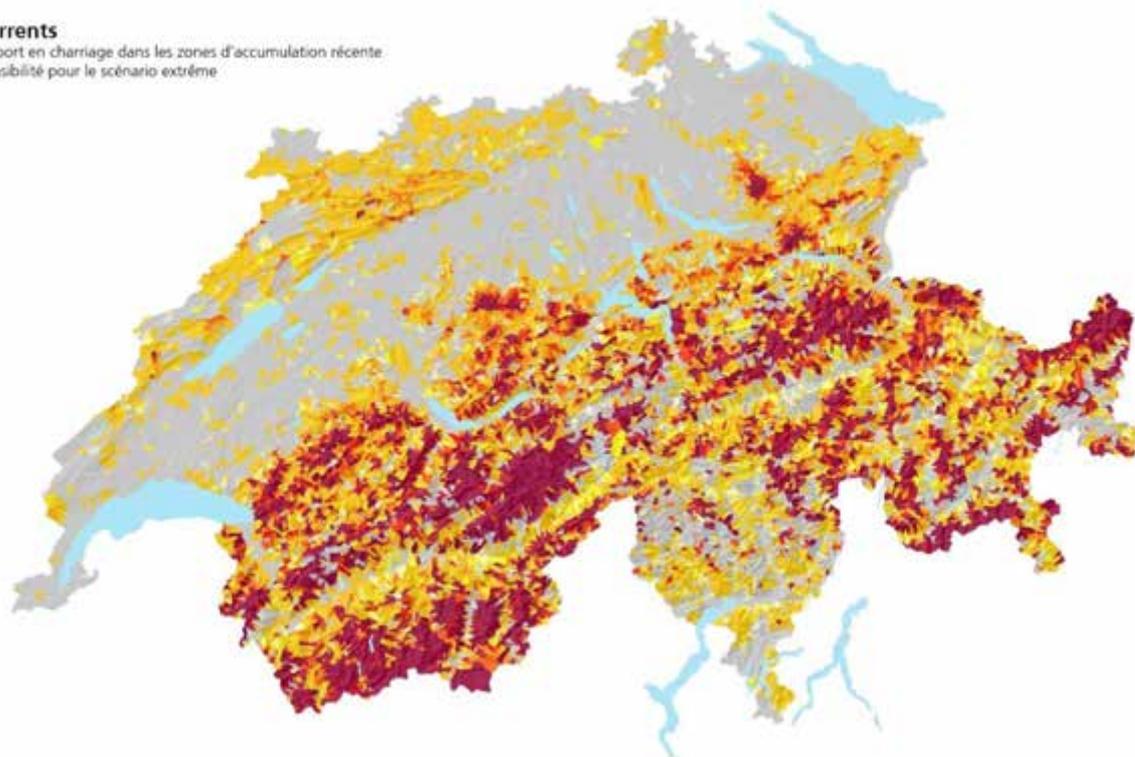
Apport en charriage dans les zones d'accumulation récente  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 71

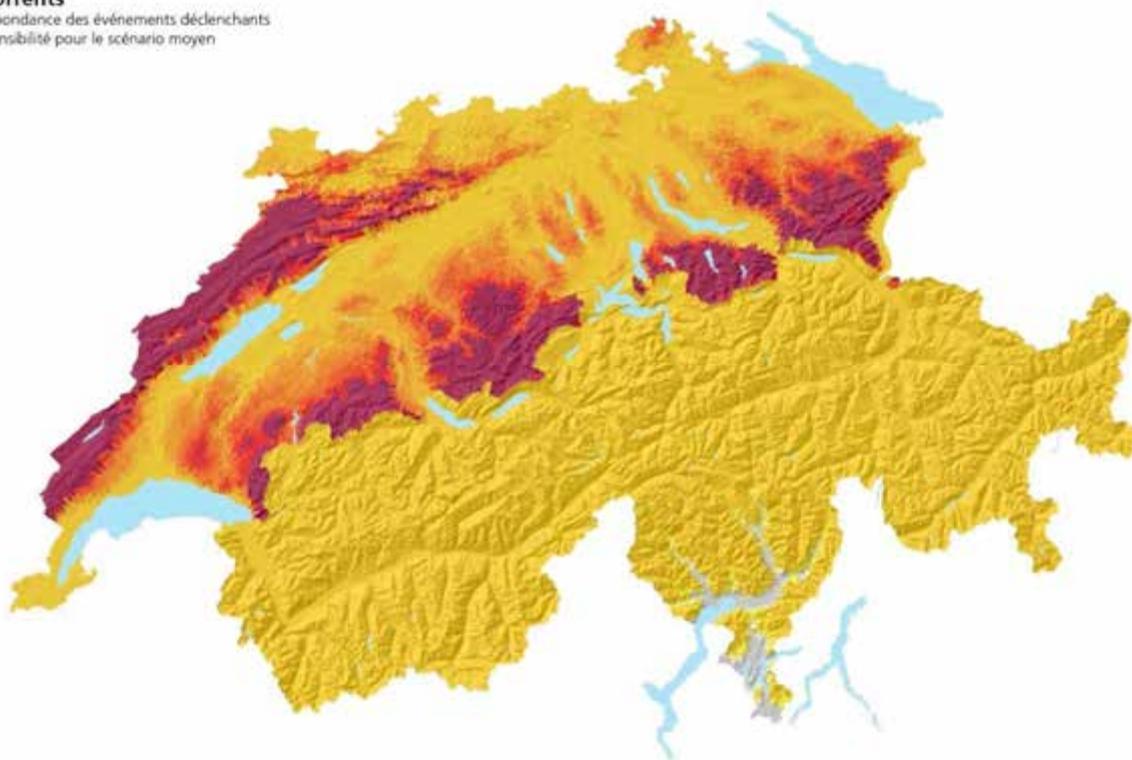
### Torrents

Apport en charriage dans les zones d'accumulation récente  
Sensibilité pour le scénario extrême



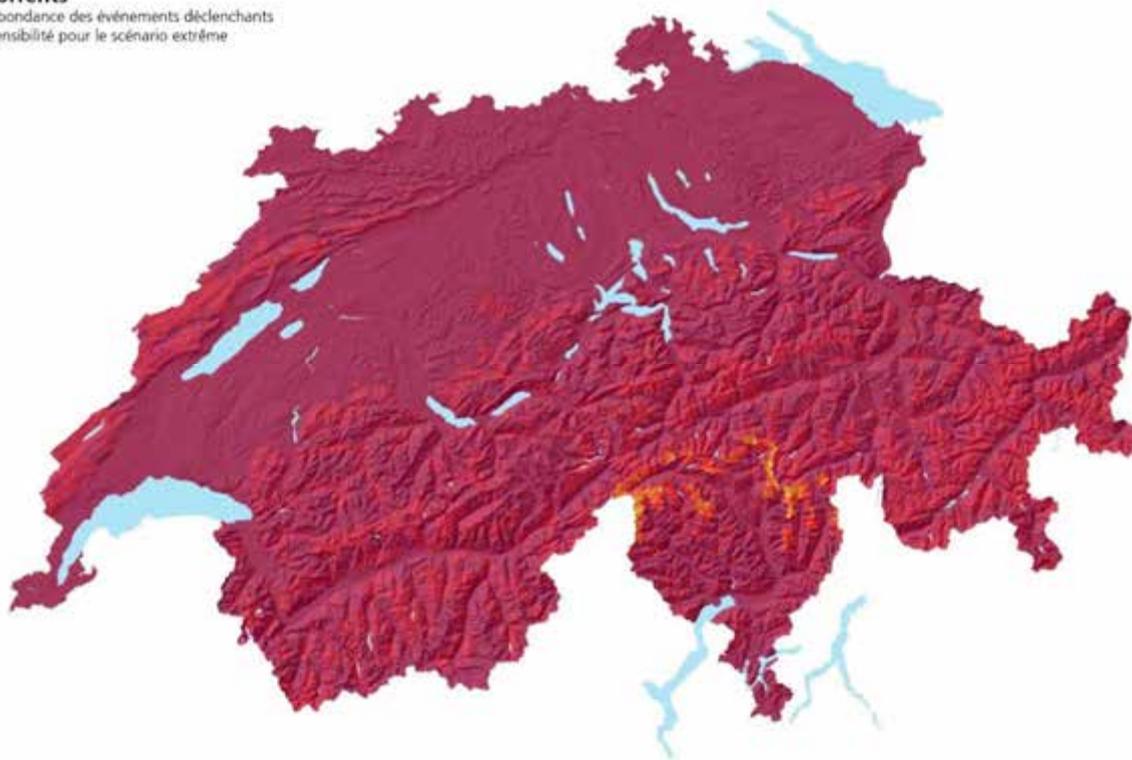
Carte 72

**Torrents**  
Abondance des événements déclenchant  
Sensibilité pour le scénario moyen



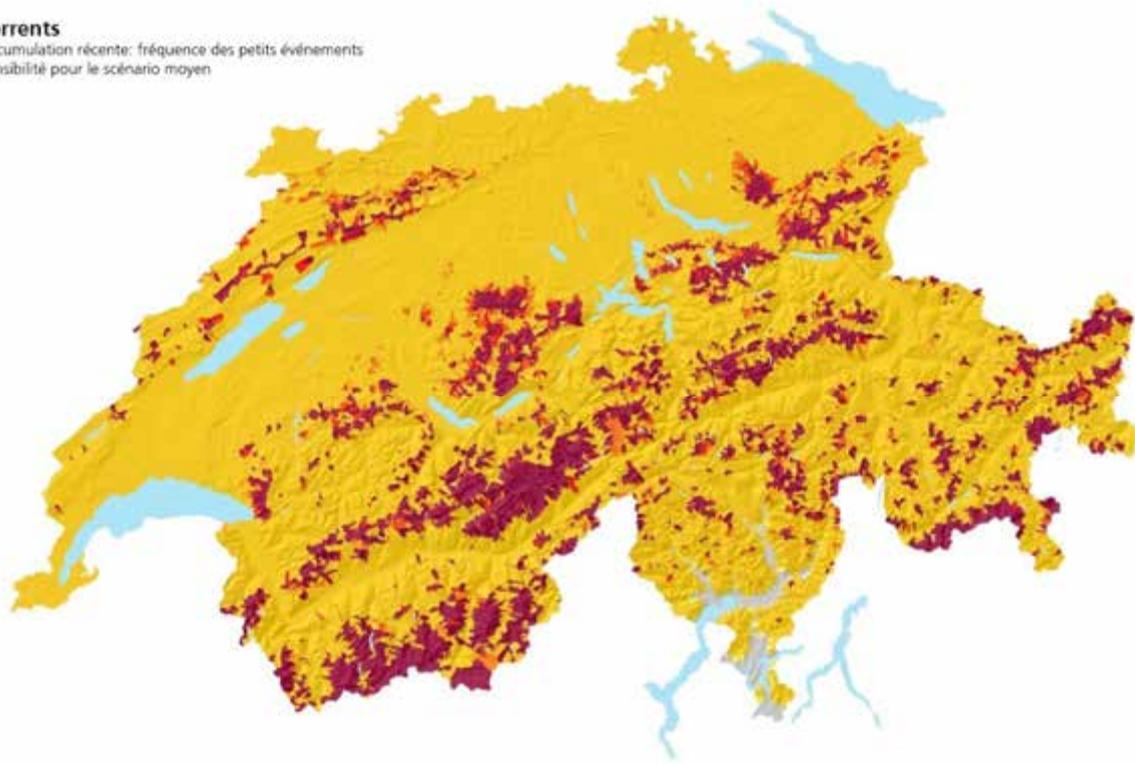
Carte 73

**Torrents**  
Abondance des événements déclenchant  
Sensibilité pour le scénario extrême



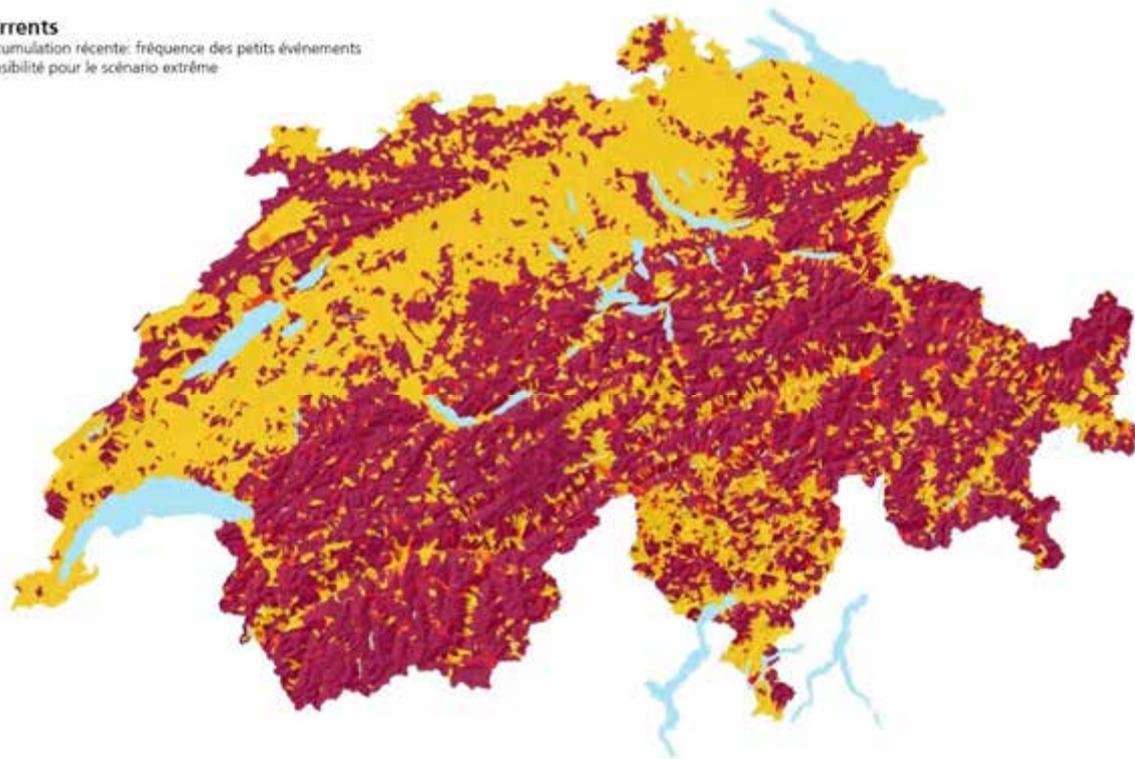
Carte 74

**Torrents**  
 Accumulation récente: fréquence des petits événements  
 Sensibilité pour le scénario moyen



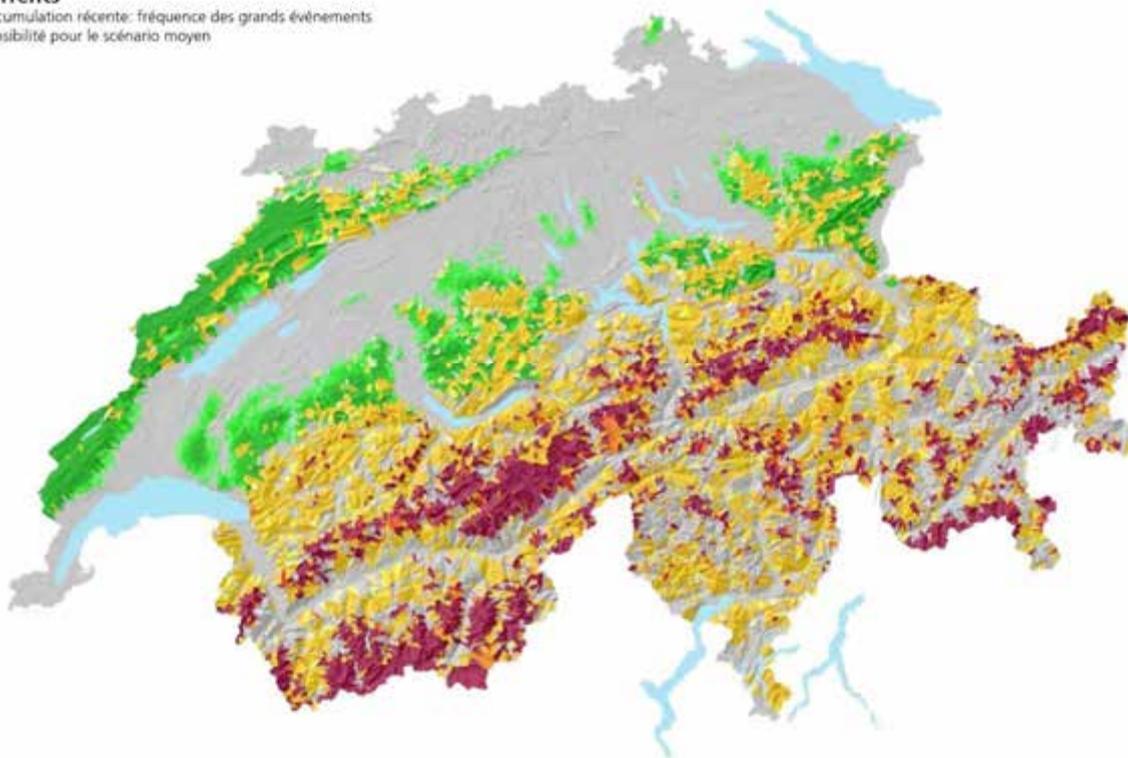
Carte 75

**Torrents**  
 Accumulation récente: fréquence des petits événements  
 Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 76

**Torrents**  
 Accumulation récente: fréquence des grands événements  
 Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 77

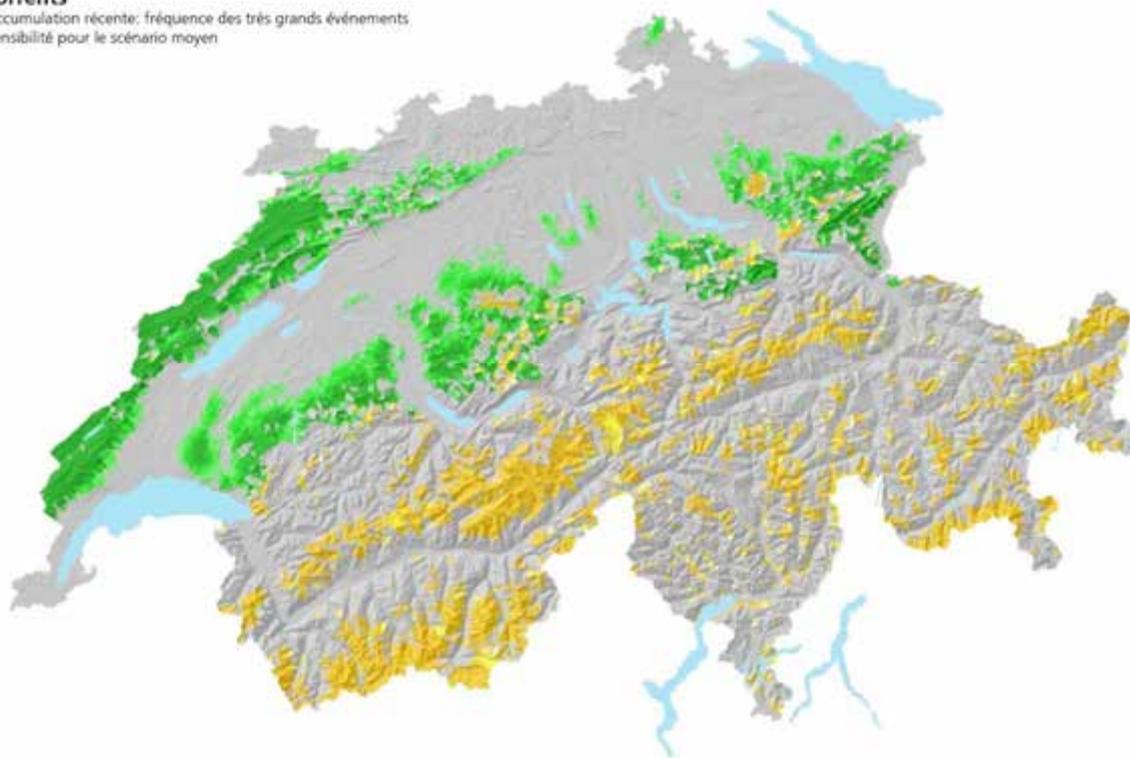
**Torrents**  
 Accumulation récente: fréquence des grands événements  
 Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 78

**Torrents**

Accumulation récente: fréquence des très grands événements  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 79

**Torrents**

Accumulation récente: fréquence des très grands événements  
Sensibilité pour le scénario extrême



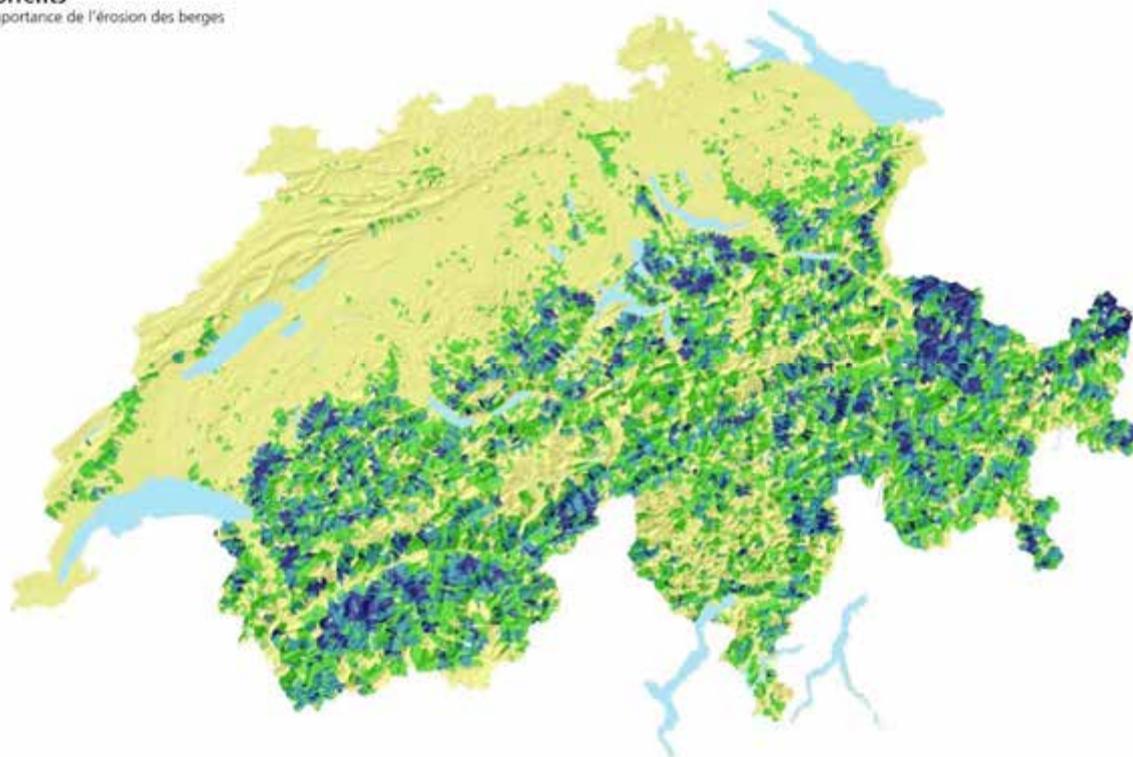
Carte 80

Légende pour la Carte 81: Importance de l'érosion des berges.



**Torrents**

Importance de l'érosion des berges

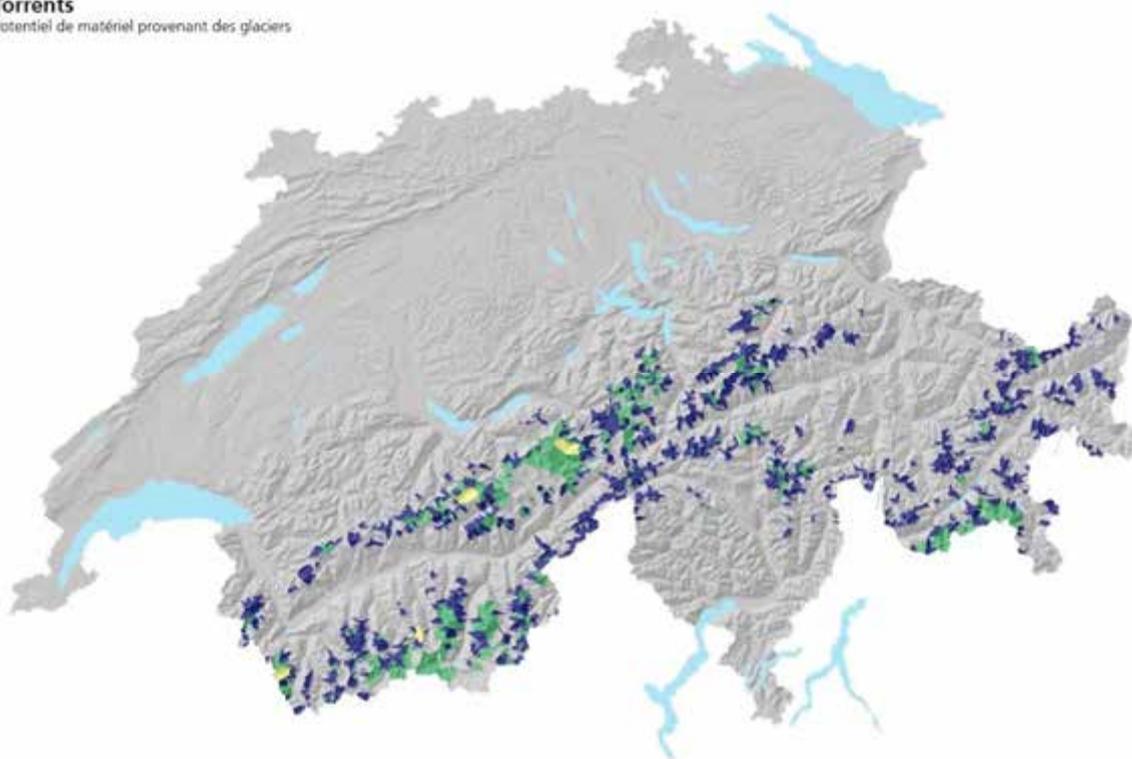


Carte 81

<p>Légende de la Carte 82: Potentiel de matériel provenant des glaciers</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #cccccc; margin-right: 5px;"></span> pas de retrait glaciaire</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #ffff00; margin-right: 5px;"></span> faible</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #008000; margin-right: 5px;"></span> moyen</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #000080; margin-right: 5px;"></span> important</li> </ul>	<p>Légende de la Carte 83 et de la Carte 84: Pourcentage de surface provenant du retrait des glaciers [%]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #cccccc; margin-right: 5px;"></span> pas de retrait glaciaire</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #ffff00; margin-right: 5px;"></span> 0 - 5</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #00ff00; margin-right: 5px;"></span> 5 - 25</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #008080; margin-right: 5px;"></span> 25 - 50</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #000080; margin-right: 5px;"></span> 50 - 100</li> </ul>
--	--

**Torrents**

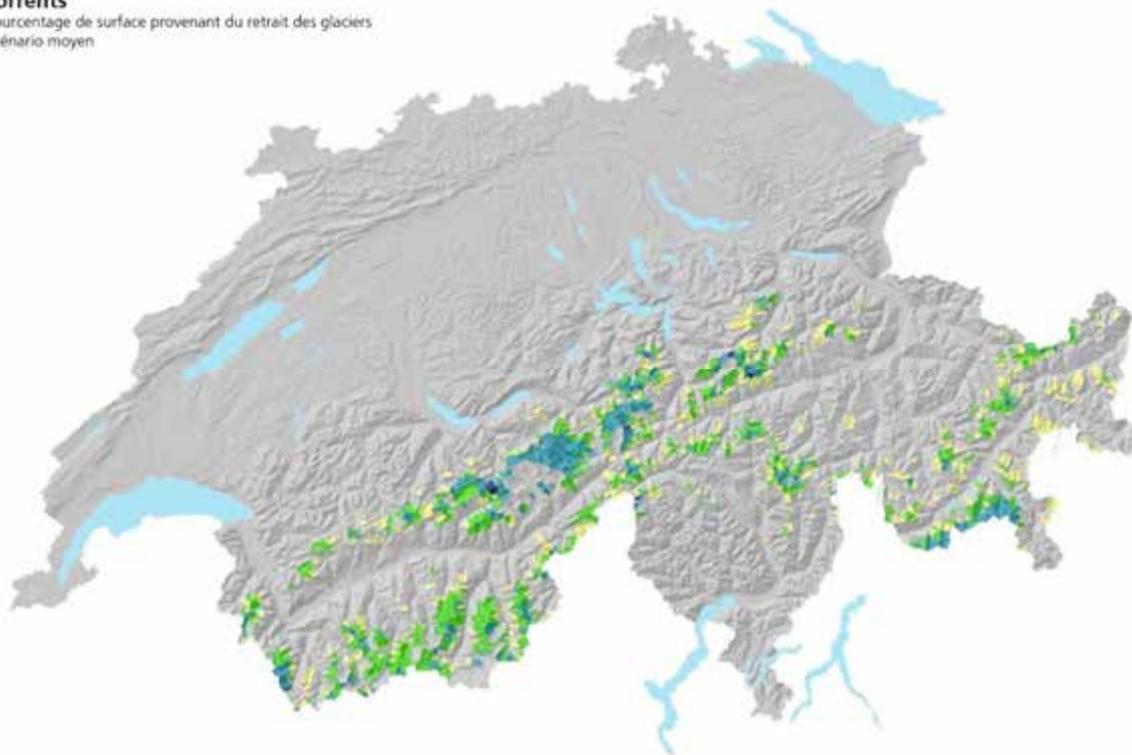
Potentiel de matériel provenant des glaciers



Carte 82

**Torrents**

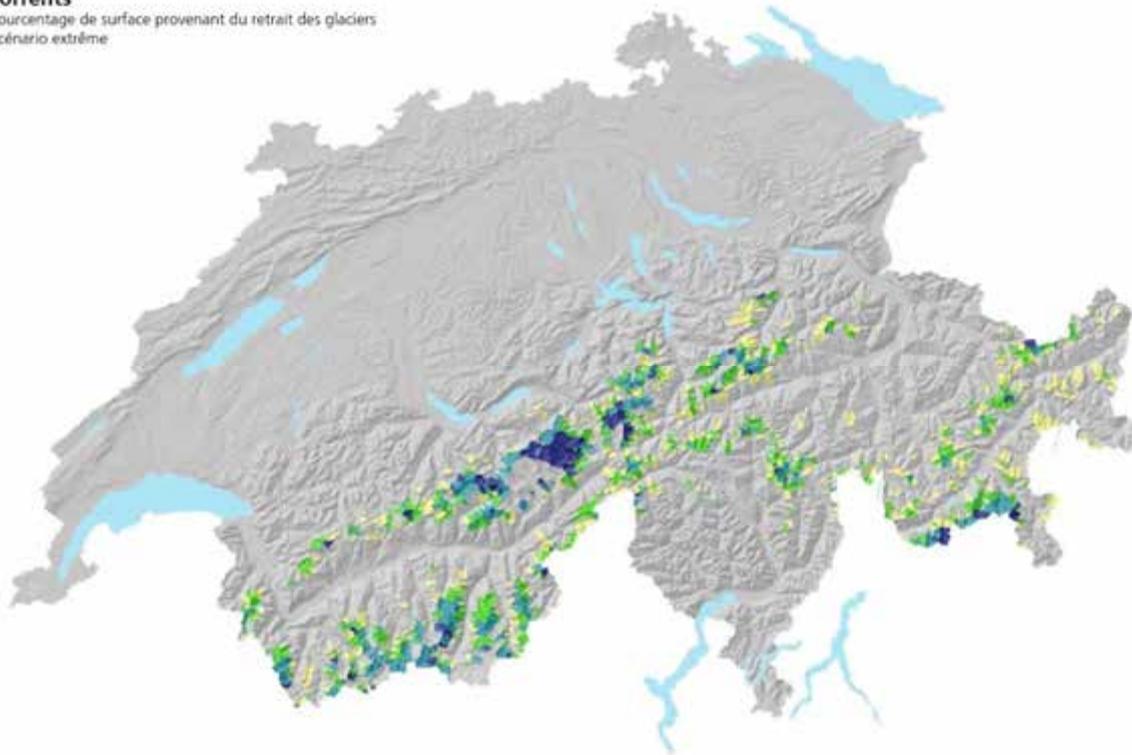
Pourcentage de surface provenant du retrait des glaciers  
Scénario moyen



Carte 83

**Torrents**

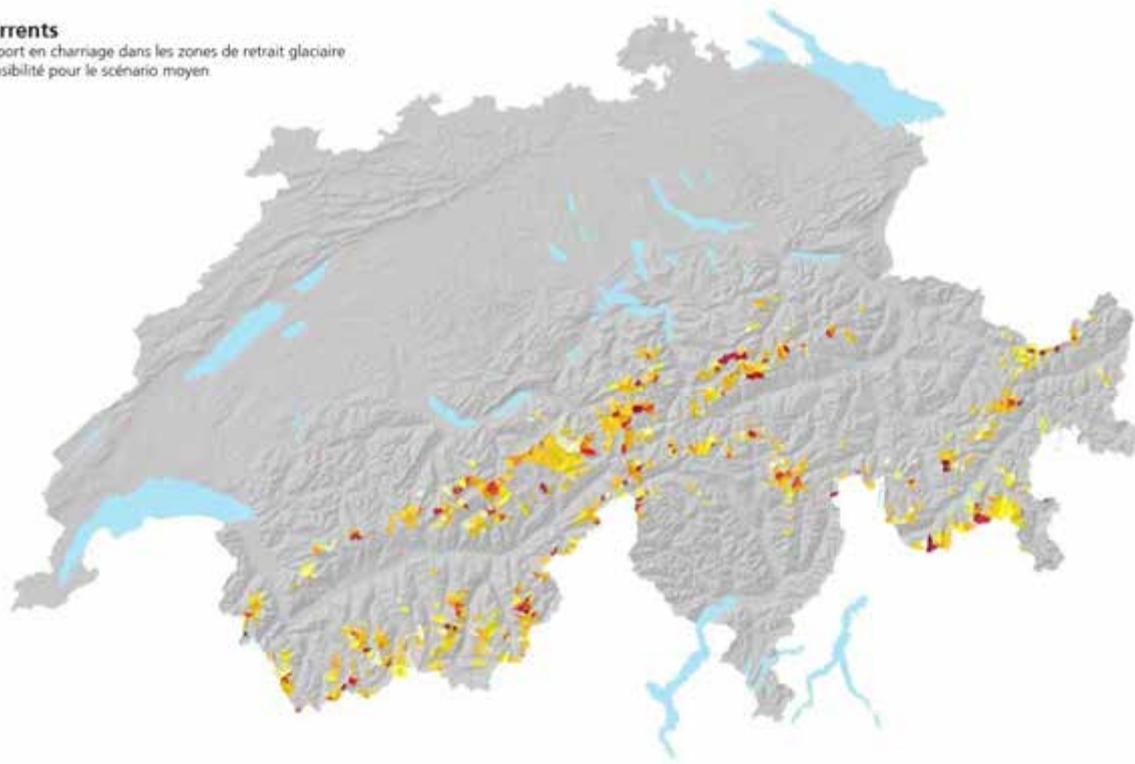
Pourcentage de surface provenant du retrait des glaciers  
Scénario extrême



Carte 84

**Torrents**

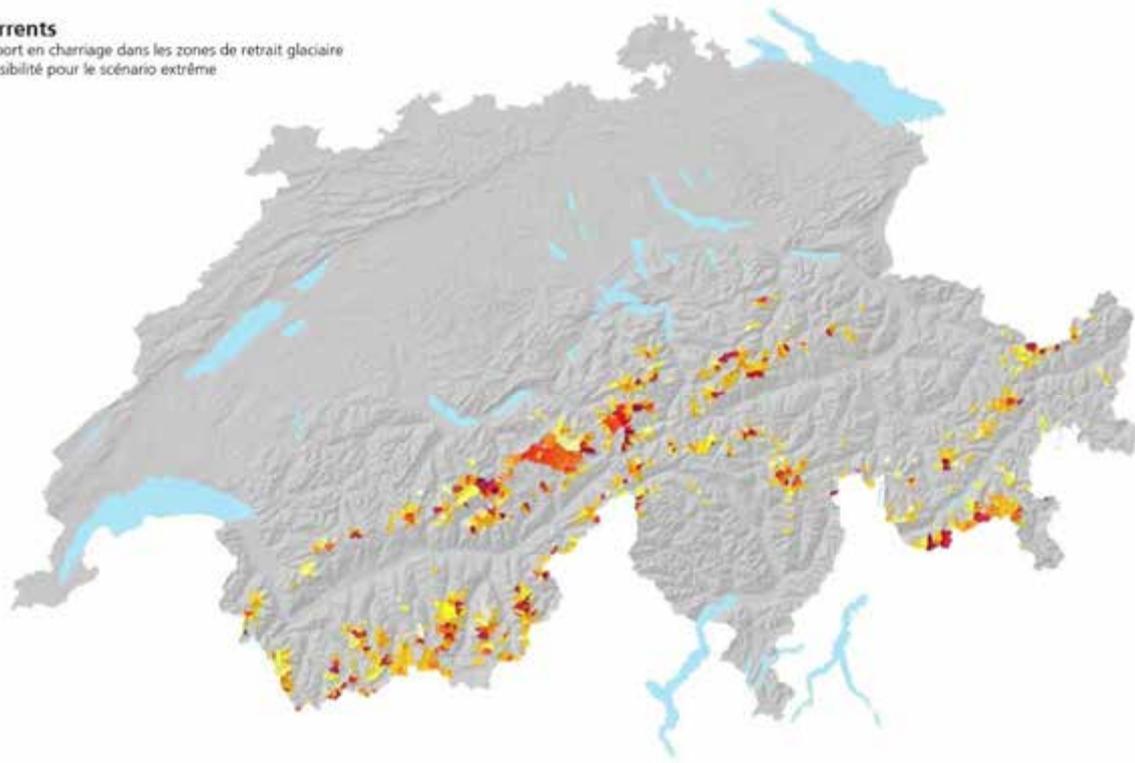
Apport en charriage dans les zones de retrait glaciaire  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 85

**Torrents**

Apport en charriage dans les zones de retrait glaciaire  
Sensibilité pour le scénario extrême

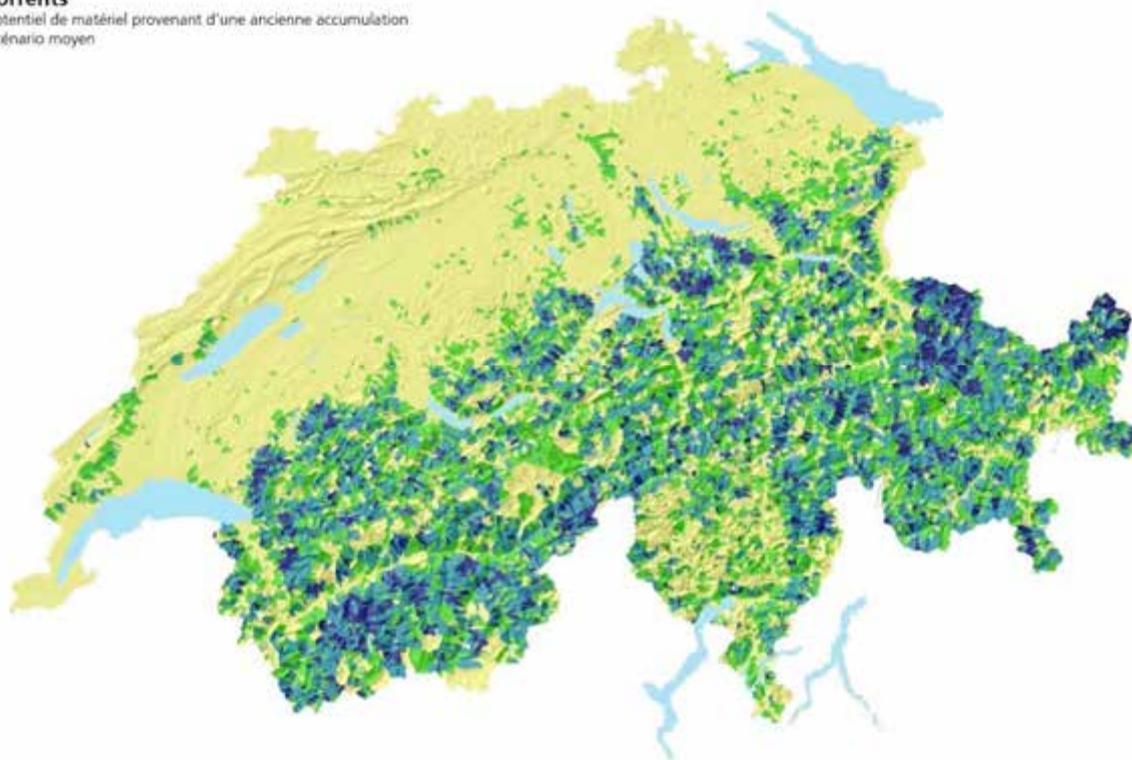


Carte 86

Légende de la Carte 87 et de la Carte 88: Potentiel de matériel provenant d'une ancienne accumulation

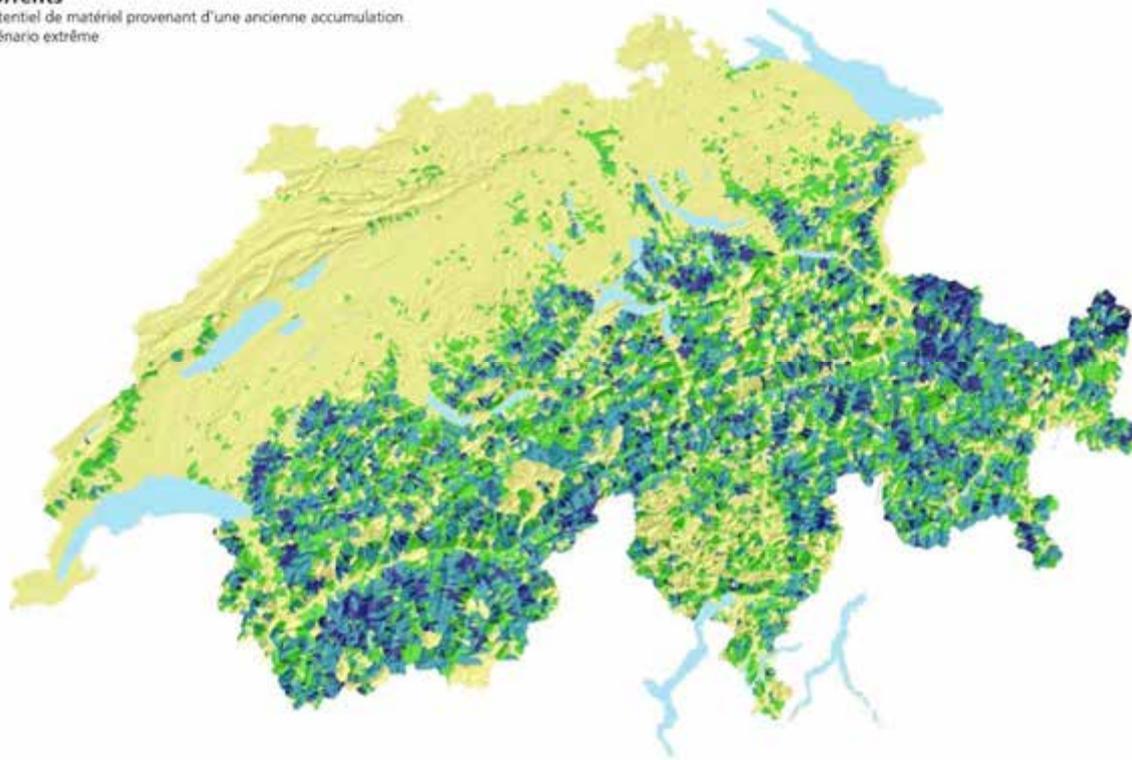


**Torrents**  
 Potentiel de matériel provenant d'une ancienne accumulation  
 Scénario moyen



Carte 87

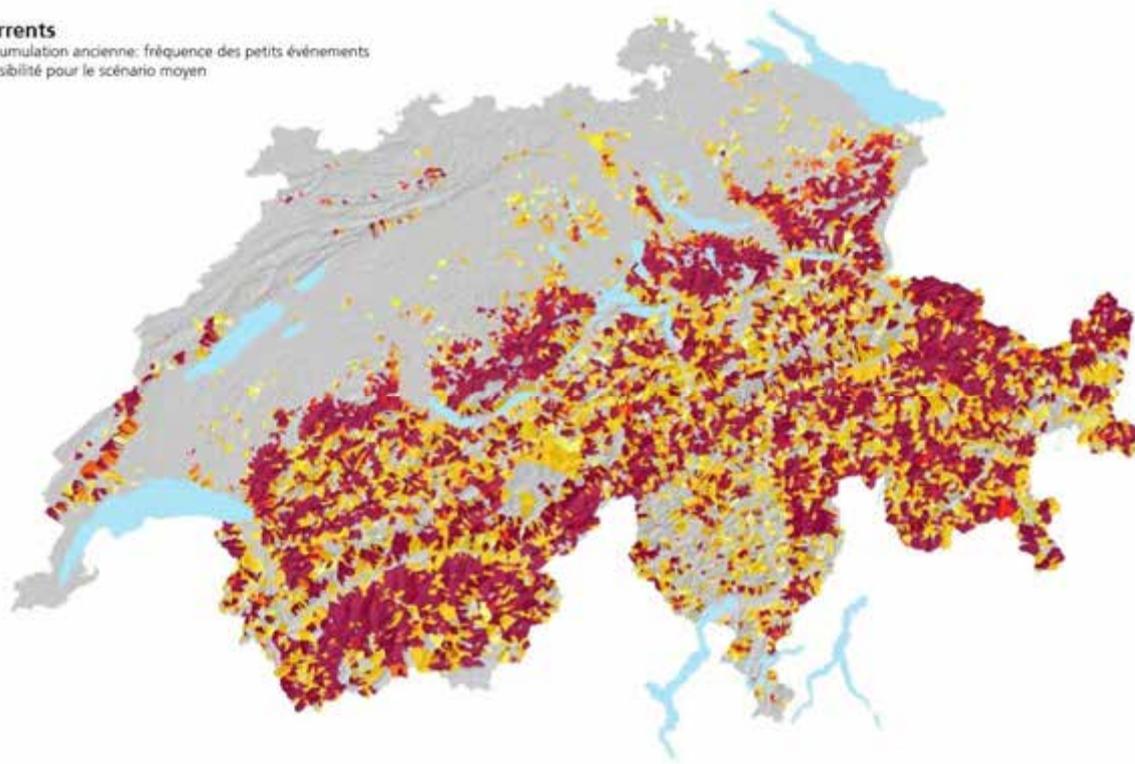
**Torrents**  
 Potentiel de matériel provenant d'une ancienne accumulation  
 Scénario extrême



Carte 88

**Torrents**

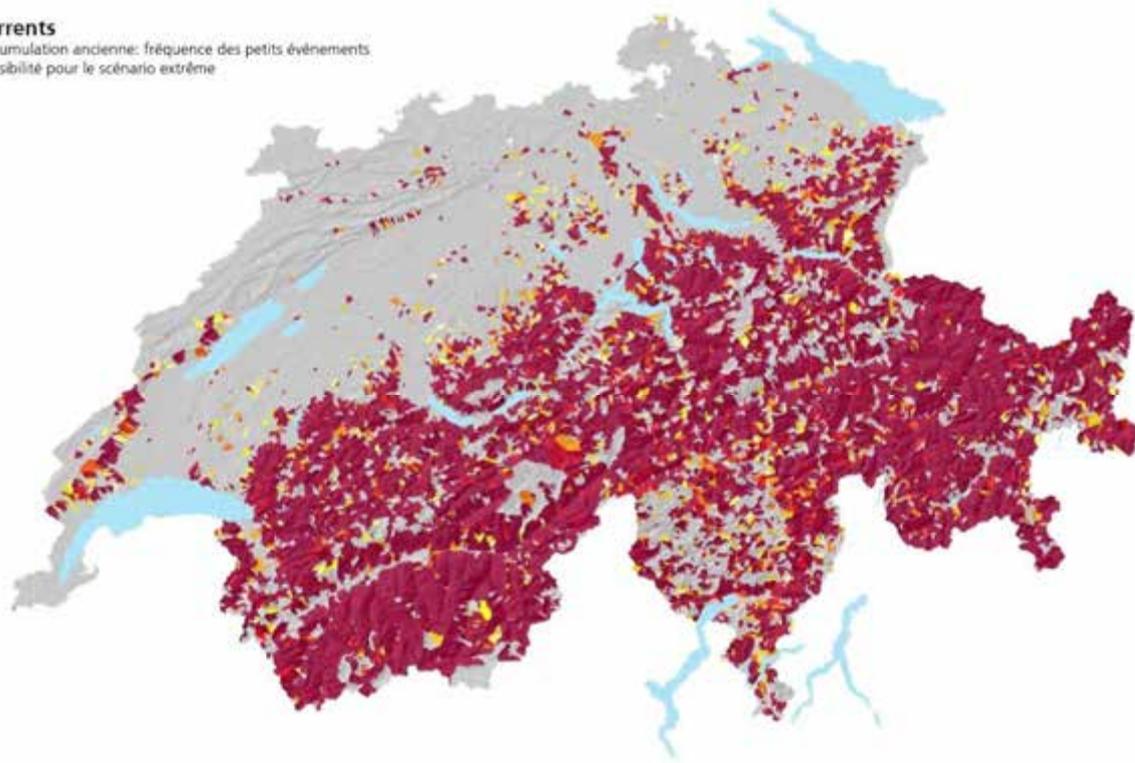
Accumulation ancienne: fréquence des petits événements  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 89

**Torrents**

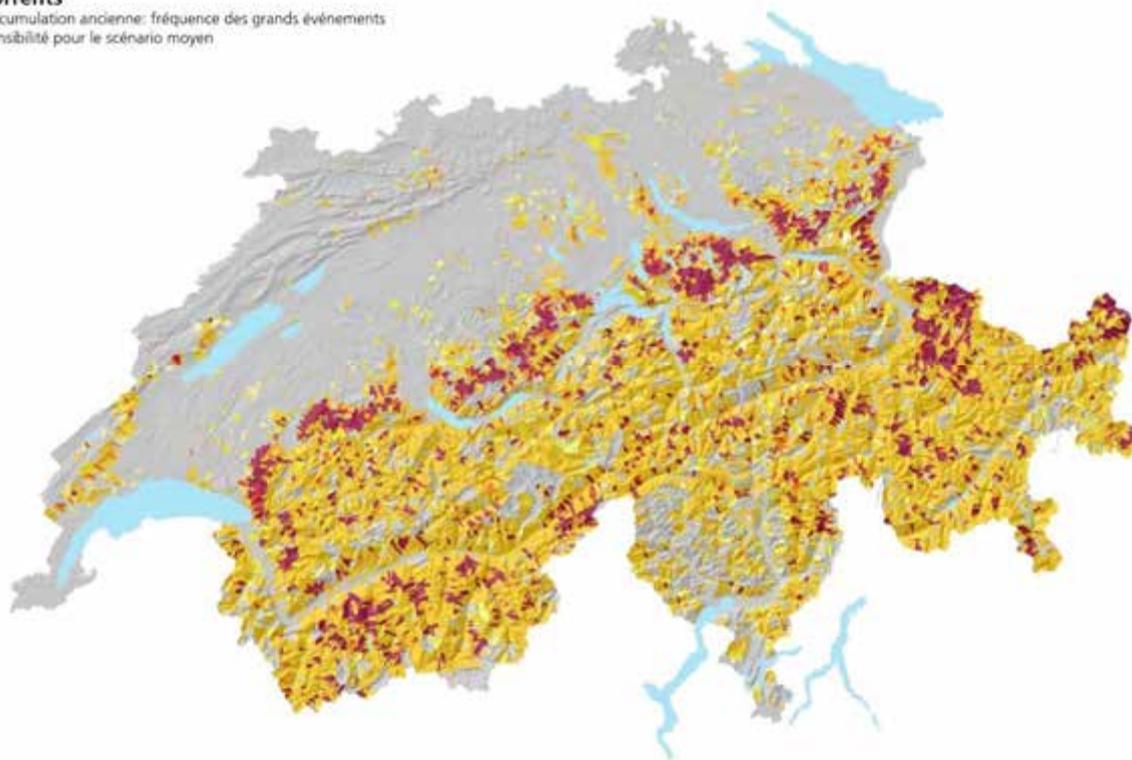
Accumulation ancienne: fréquence des petits événements  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 90

**Torrents**

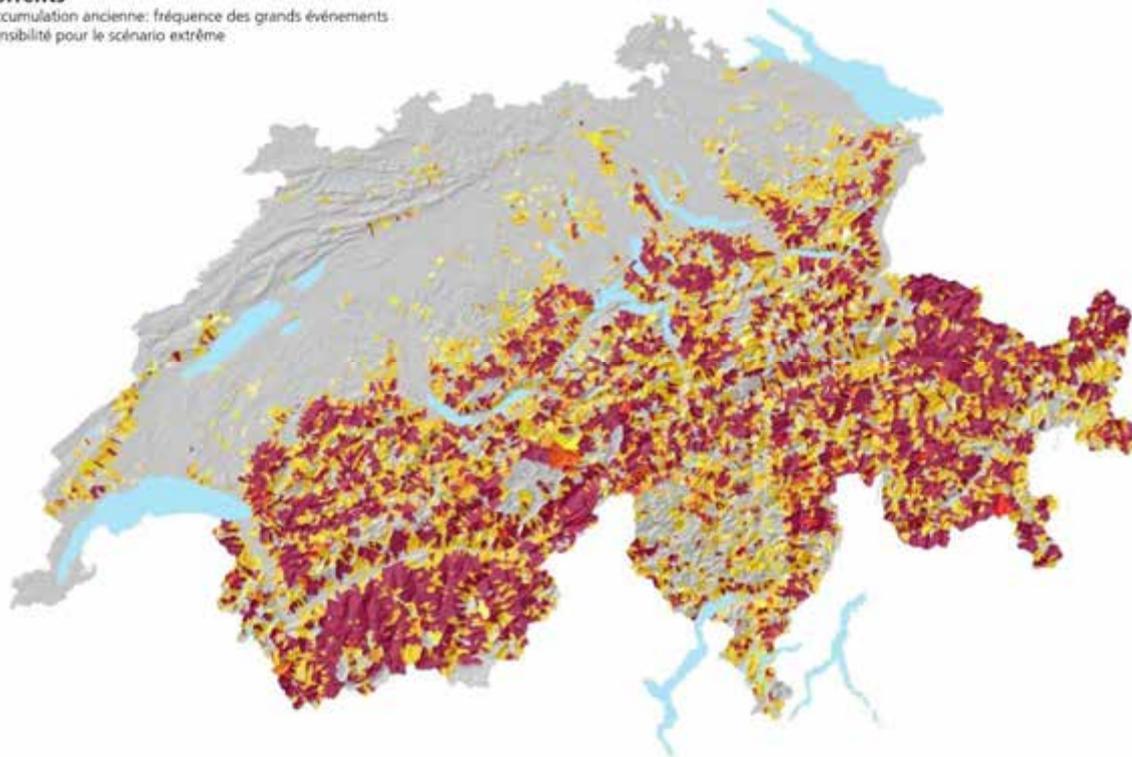
Accumulation ancienne: fréquence des grands événements  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 91

**Torrents**

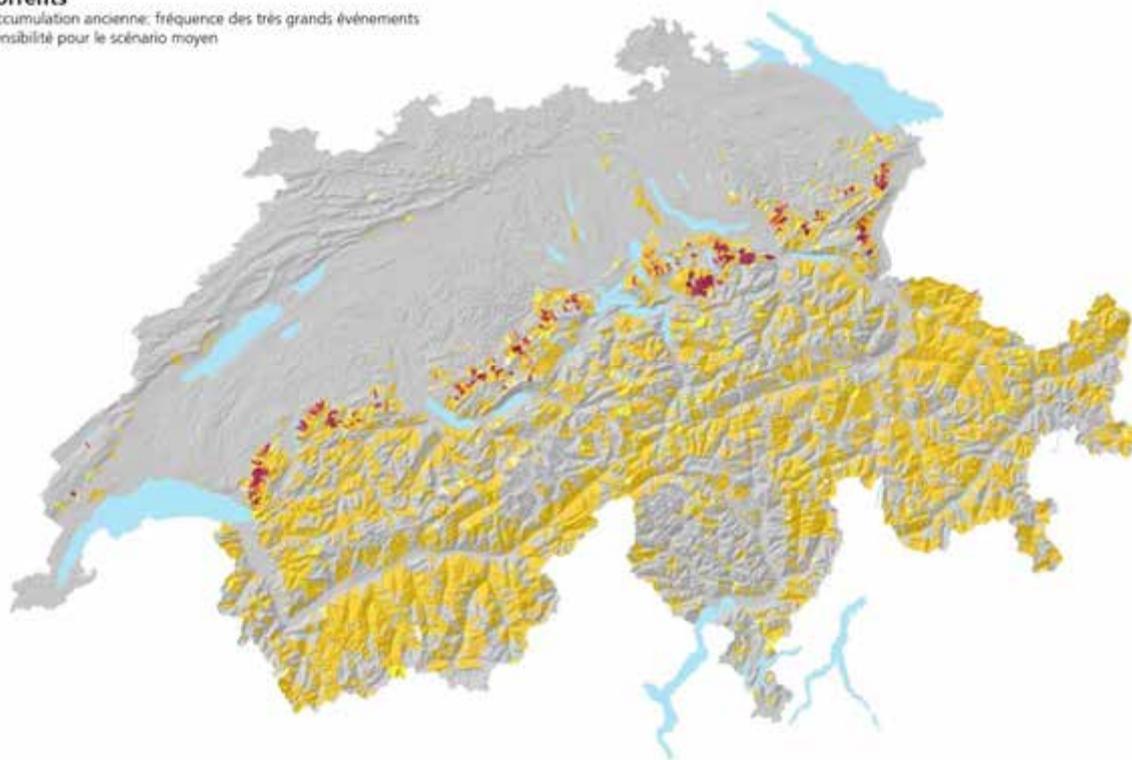
Accumulation ancienne: fréquence des grands événements  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 92

**Torrents**

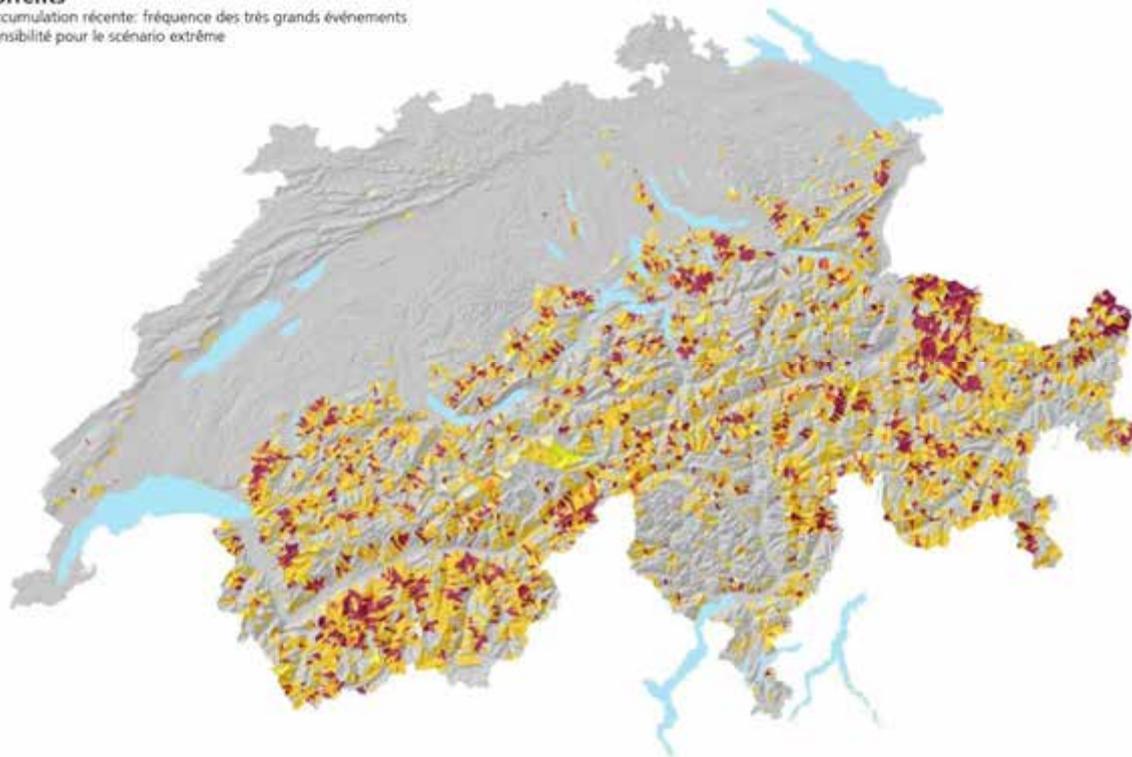
Accumulation ancienne: fréquence des très grands événements  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 93

**Torrents**

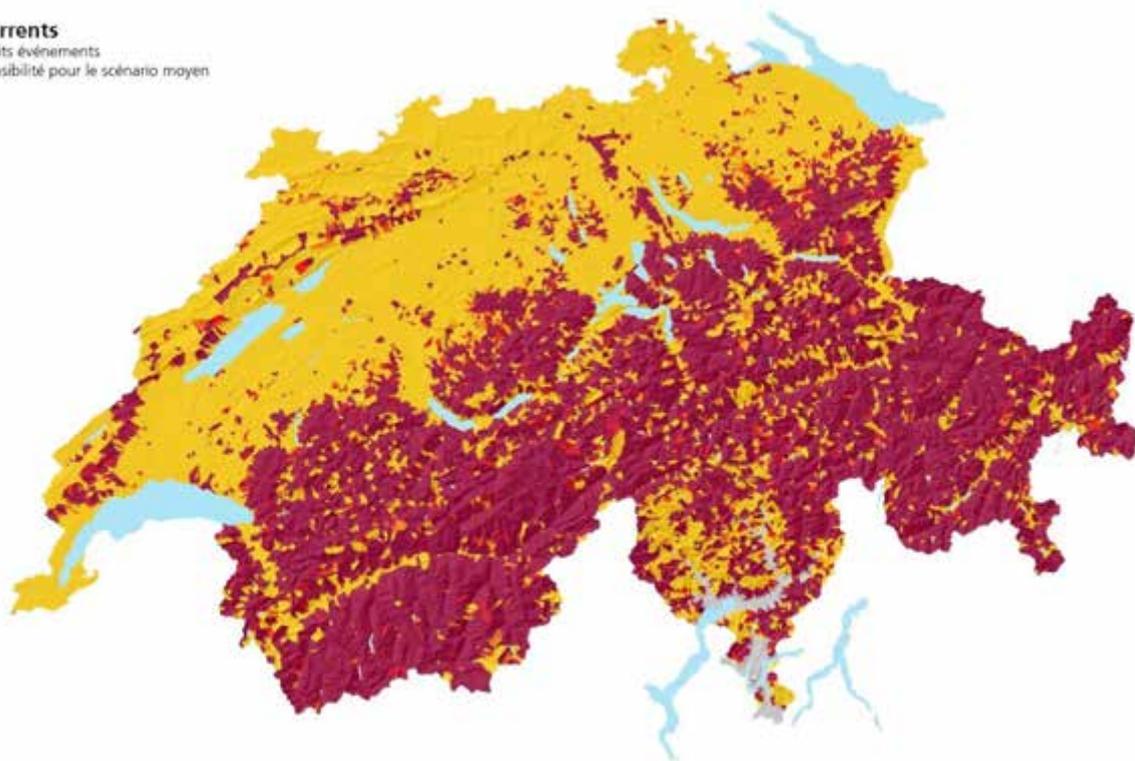
Accumulation récente: fréquence des très grands événements  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 94

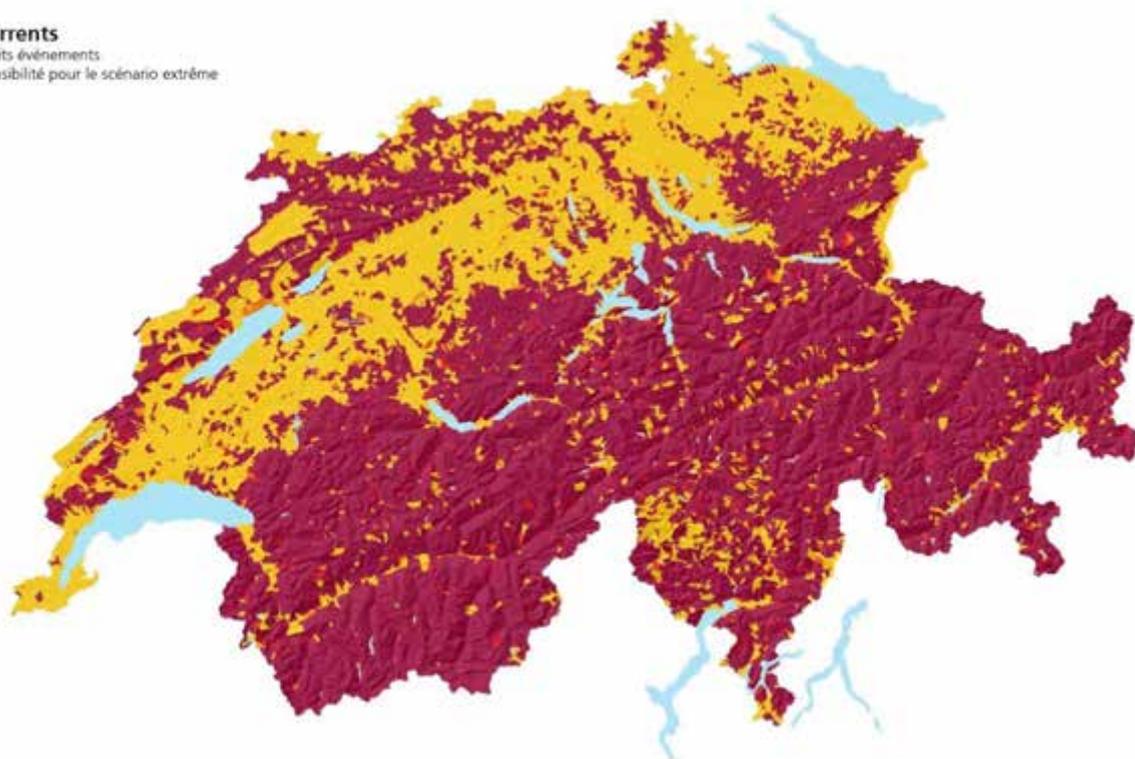
### 8.3 Résultats agrégés

**Torrents**  
Petits événements  
Sensibilité pour le scénario moyen



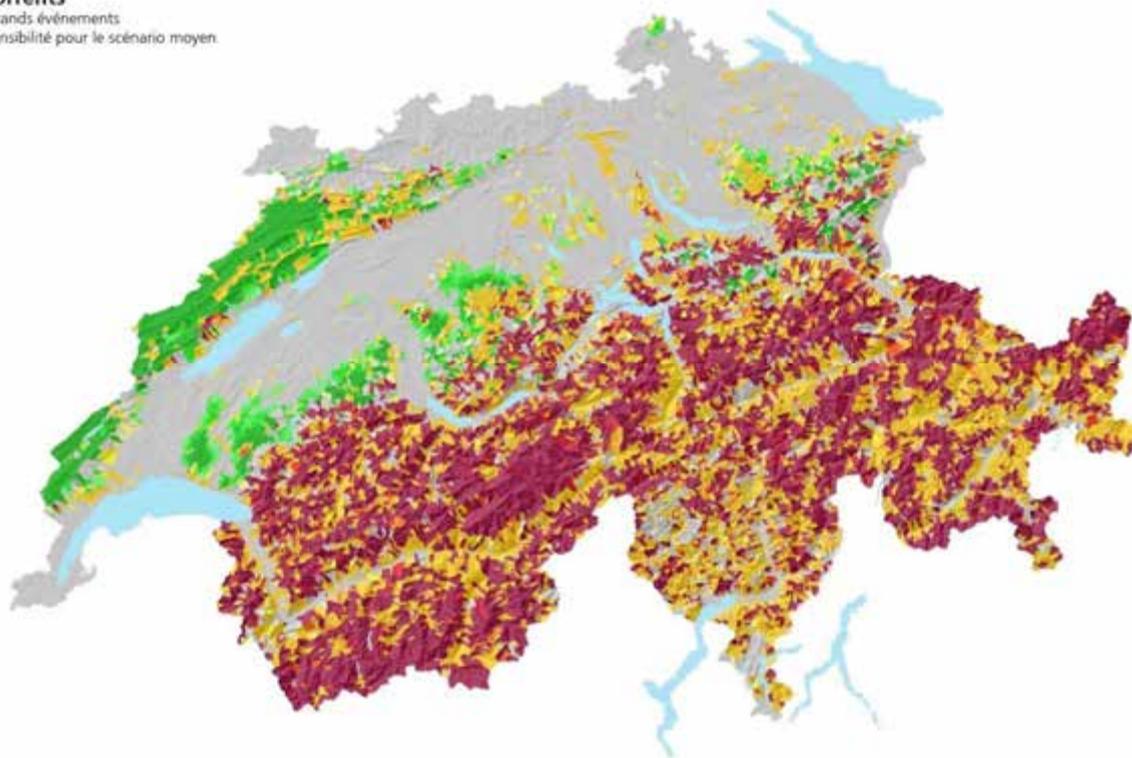
Carte 95

**Torrents**  
Petits événements  
Sensibilité pour le scénario extrême



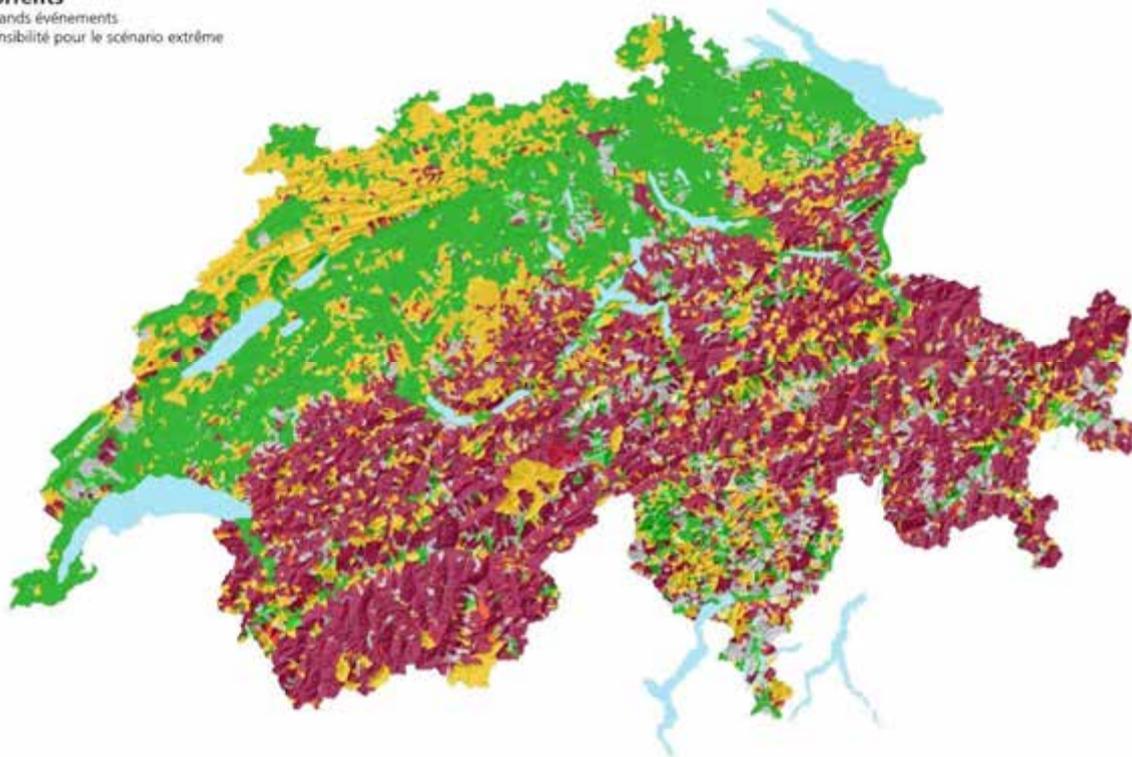
Carte 96

**Torrents**  
Grands événements  
Sensibilité pour le scénario moyen



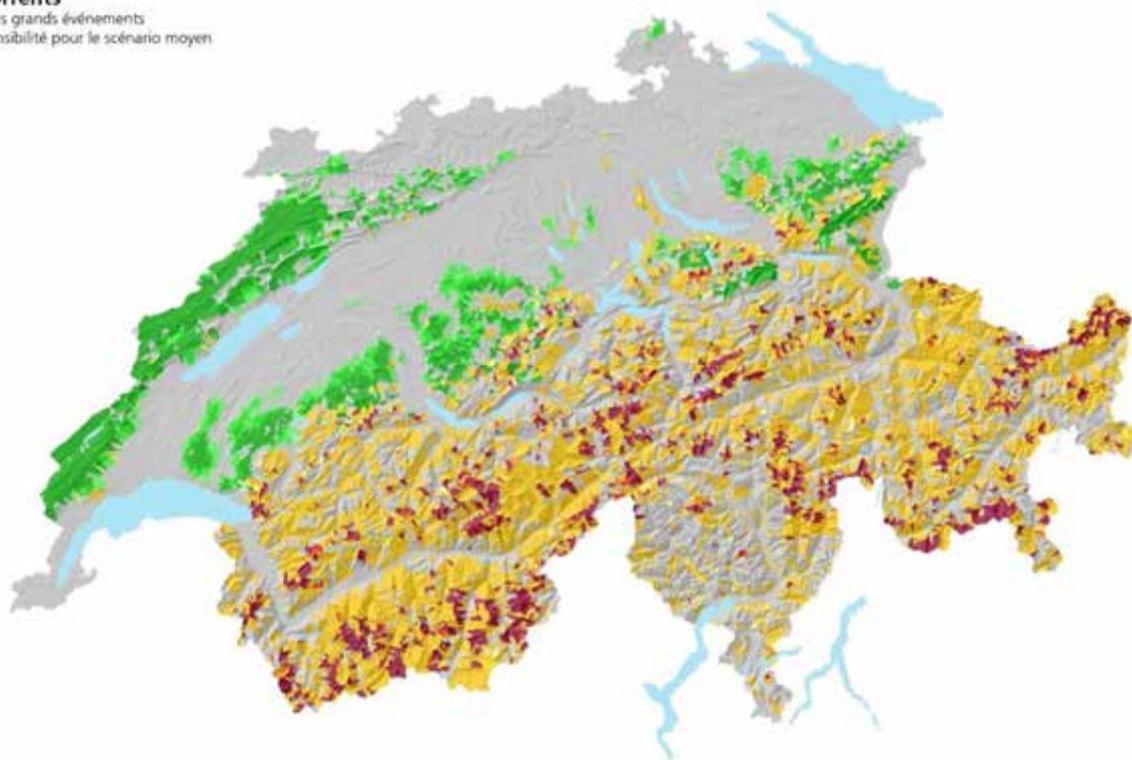
Carte 97

**Torrents**  
Grands événements  
Sensibilité pour le scénario extrême



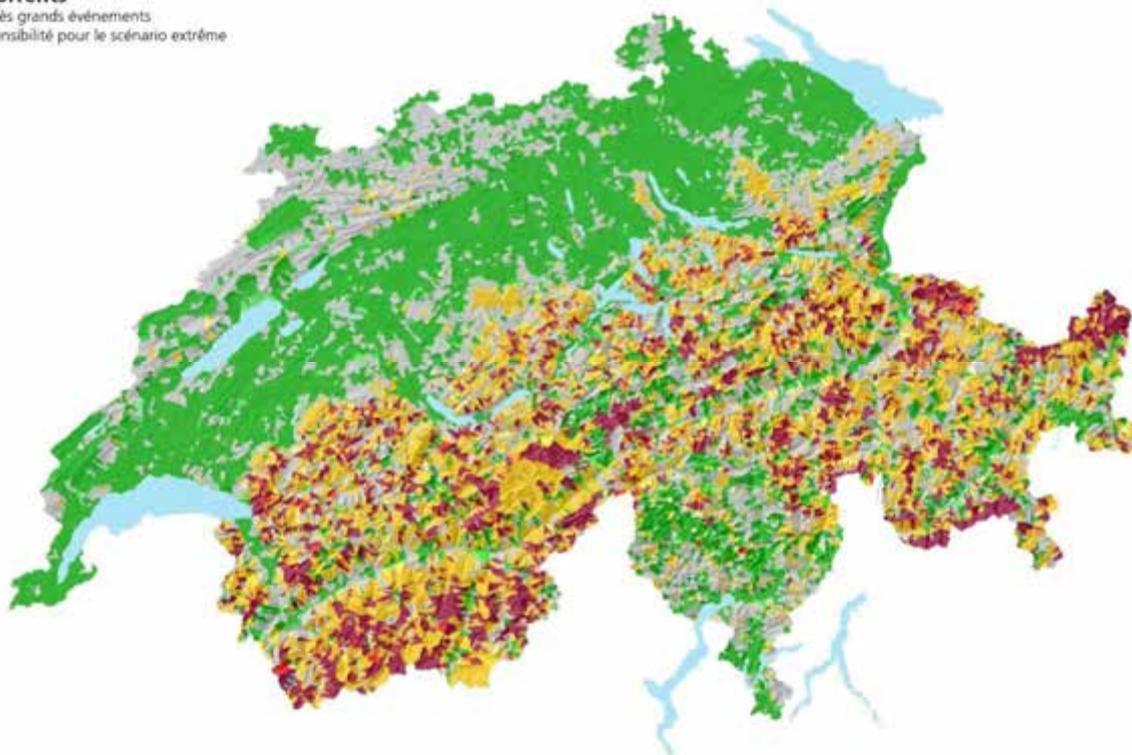
Carte 98

**Torrents**  
Très grands événements  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 99

**Torrents**  
Très grands événements  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 100

## 9 Rivière à caractère torrentiel

### 9.1 Explications

L'apport en eau joue un rôle important pour les rivières à caractère torrentiel. Les Alpes et les Préalpes, mais aussi une grande partie du Sud de la Suisse présentent une augmentation de cet apport pour le scénario moyen (Carte 101). La situation reste inchangée dans les zones de basse altitude du Plateau et une diminution de l'apport d'eau est à prévoir pour les vallées du Tessin. Pour le scénario extrême, le Plateau, le Jura et les régions de haute altitude des Alpes présentent une forte augmentation (Carte 102). Les autres régions des Alpes, les Préalpes et le Sud de la Suisse, sans les vallées, montrent une simple augmentation.

En plus de l'apport d'eau, la formation de l'écoulement joue un rôle significatif. L'évaluation de la carte des types d'écoulement indique qu'une grande partie des Préalpes et du Sud de la Suisse, ainsi que les zones de basse et de moyenne altitude des Alpes montrent un grand pourcentage de surfaces réagissant rapidement (Carte 103). Ce pourcentage est moindre sur le Plateau, à l'exception des régions ayant une grande densité de population. Celles-ci ne doivent pas être directement comparées avec les autres surfaces ; en effet, l'évacuation des eaux est décisive à ces endroits.

Les surfaces pouvant conduire à des processus de seuil, en raison d'une réaction d'écoulement très retardée, sont aussi pertinentes pour la formation de cet écoulement. Une grande partie de ces surfaces se situent dans les zones de glaciers des Alpes (Carte 104). Une autre partie de ces surfaces à grande capacité de stockage se trouve dans quelques régions de l'ouest et du centre du Plateau. Là, ce sont les importants dépôts de moraine qui causent une forte réaction de retardement.

Pour le scénario moyen, la sensibilité des débits de crue démontre une forte augmentation due à la rapide réaction d'écoulement dans une grande partie des Préalpes et du Sud de la Suisse (Carte 105). Moins frappante est l'augmentation en Valais, dans les Grisons et dans le Jura. La situation reste inchangée sur le Plateau et dans les régions de haute altitude des Alpes. Pour le scénario extrême, presque toutes les régions montrent une augmentation (Carte 106). Cette augmentation est forte dans le Jura et dans les Préalpes ; dans ces régions, la forte augmentation de l'apport en eau joue un rôle. La situation reste inchangée uniquement pour les vallées du Sud de la Suisse.

Pour les débits de crue provoqués par les processus de seuil, la sensibilité augmente dans les régions de haute altitude des Alpes dans le scénario moyen (Carte 107). Pour une grande partie de la Suisse, il n'y a pas de changement. Pour le scénario extrême, les Alpes bernoises centrales et orientales ainsi que les Alpes valaisannes et les zones de haute altitude des Alpes grisonnes présentent une forte augmentation, mais aussi les paysages morainiques du Plateau central et occidental (Carte 108).

La combinaison de ces deux processus est présentée pour le scénario moyen sur la Carte 109 et pour le scénario extrême sur la Carte 110. Les deux montrent une forte augmentation pour les Préalpes et le Sud de la Suisse. Les régions de haute altitude des Alpes et du Jura tombent aussi dans cette catégorie lors du scénario extrême. Sur le Plateau, aucun changement n'est à attendre pour le scénario moyen alors qu'une augmentation se dessine pour le scénario extrême. Dans les vallées du Sud de la Suisse, une diminution est relevée pour le scénario moyen, la situation restant inchangée pour le scénario extrême.

Pour les événements purement hydrologiques, les résultats provenant des bassins versants détaillés sont agrégés en bassins versants variant de 40 à 150 km<sup>2</sup> (niveau 40, voir image 3 de la Méthode). Pour les deux scénarios, cette évaluation donne une forte augmentation dans une grande partie de la Suisse. Seul le Plateau en est exempté pour le scénario moyen (Carte 114). Pour le scénario extrême, de grandes parties du Plateau sont évaluées comme « forte augmentation » (Carte 115).

En plus des seuls débits de crue, le charriage et l'érosion peuvent aussi jouer un rôle important dans les rivières à caractère torrentiel. L'évaluation de l'érosion des berges pour les rivières de faible pente provient directement des bassins versants agrégés au niveau 40. L'interprétation des segments de cours d'eau possédant potentiellement une berge concave montre une image hétérogène (Carte 111). Les zones les plus marquées pour ce critère se situent uniquement dans les régions orientales des Préalpes et dans un secteur compris entre les Préalpes romandes et la terminaison occidentale du Jura. Pour l'évaluation globale de la sensibilité, la sensibilité du débit de crue est en plus considérée (Carte 114 et Carte 115). Pour le scénario moyen, les régions du Jura occidental, des Préalpes, du Sud de la Suisse et des Grisons présentent une augmentation de l'érosion des berges (Carte 116). Seuls quelques secteurs montrent une forte augmentation. Sur le Plateau et pour une grande partie des Alpes valaisannes, la situation reste inchangée. Pour le scénario extrême (Carte 117), les régions situées au nord du Lac Léman présentent une forte augmentation due à une grande densité de segments présentant une berge concave. En outre, une augmentation est visible pour la partie orientale du Jura pour les deux scénarios. De plus, plusieurs régions du Plateau montrent aussi une augmentation, provoquée principalement par la forte augmentation de l'apport en eau.

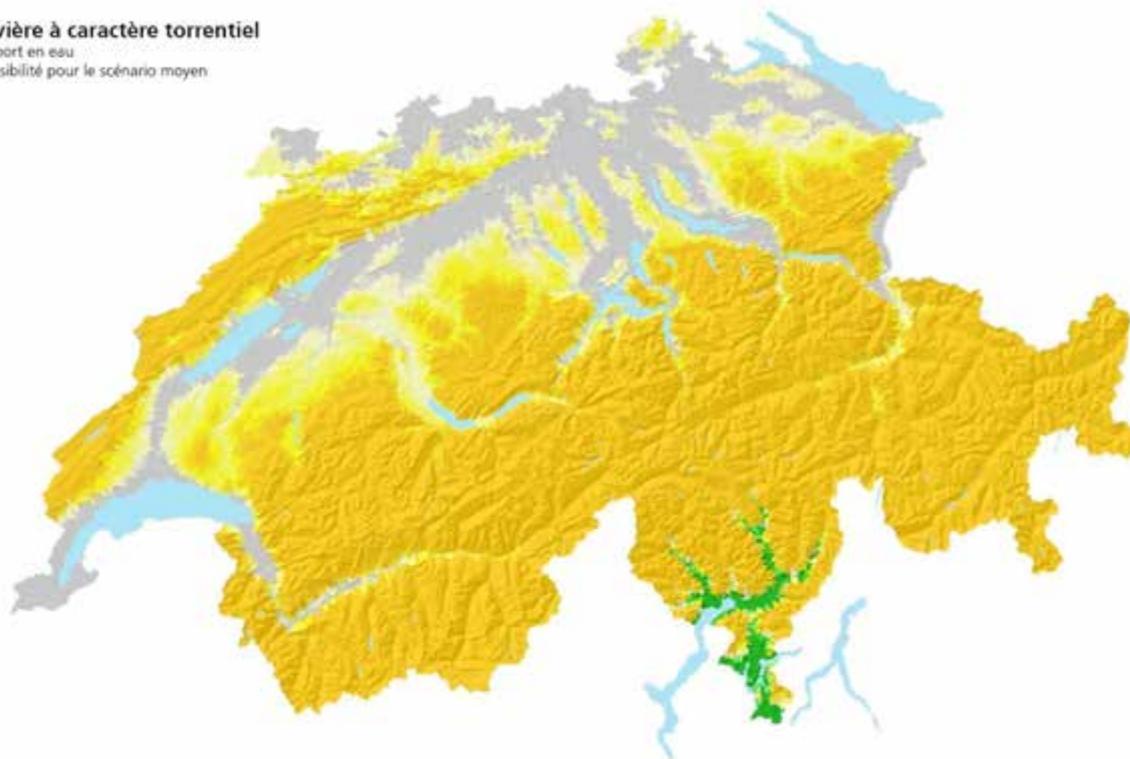
Les proportions de surfaces très sensibles au charriage, d'une part, et, d'autre part la sensibilité du débit de crue sont prises en compte pour l'évaluation de la sensibilité des événements de charriage. La proportion de surfaces ayant un fort pourcentage de matériaux charriés avec une augmentation ou une forte augmentation est présentée sur la Carte 112 pour le scénario moyen et sur la Carte 113 pour le scénario extrême. Les deux cartes montrent un grand pourcentage de régions ayant une sensibilité importante au charriage ; les valeurs supérieures à 40% se situent dans les Préalpes, les Alpes et le Sud de la Suisse. Pour le scénario extrême, de telles régions abondent aussi dans le Jura et sur le Plateau.

L'évaluation finale des événements de charriage dans les rivières à caractère torrentiel est présentée dans la Carte 118 et la Carte 119. Pour le scénario moyen, il en résulte une forte augmentation dans une grande partie des Préalpes, des Alpes et du Sud de la Suisse. Dans le Jura, quelques régions présentent une augmentation, voir une forte augmentation. Pour les autres parties du Jura et pour le Plateau, aucun changement n'est relevé pour ce scénario. Pour le scénario extrême, une grande partie du Jura est par contre évaluée avec une « forte augmentation » ; cette tendance est causée aussi bien par la forte augmentation du débit en eau que par l'augmentation de la sensibilité au charriage. Par ailleurs, plusieurs régions de haute altitude du Plateau présentent également une augmentation. Ici aussi, les augmentations de la sensibilité au charriage et du débit en eau sont à l'origine de cette tendance.

L'évaluation des événements de charriage est aussi valable pour l'évaluation de la sensibilité de l'érosion des berges pour les rivières de forte pente. Cela est déclenché principalement par les courants transversaux et le déplacement du charriage.

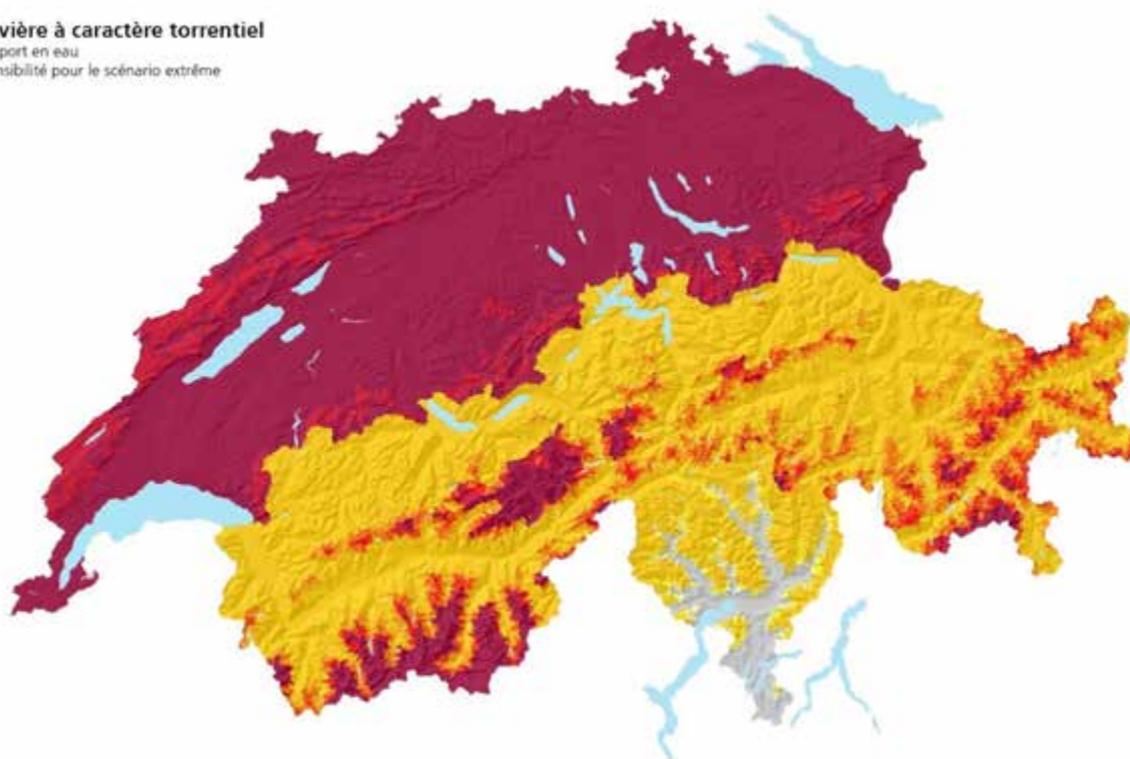
## 9.2 Résultats intermédiaires

**Rivière à caractère torrentiel**  
 Apport en eau  
 Sensibilité pour le scénario moyen



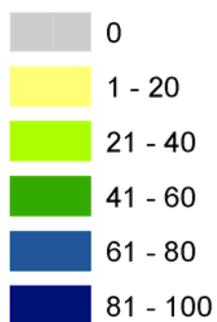
Carte 101

**Rivière à caractère torrentiel**  
 Apport en eau  
 Sensibilité pour le scénario extrême

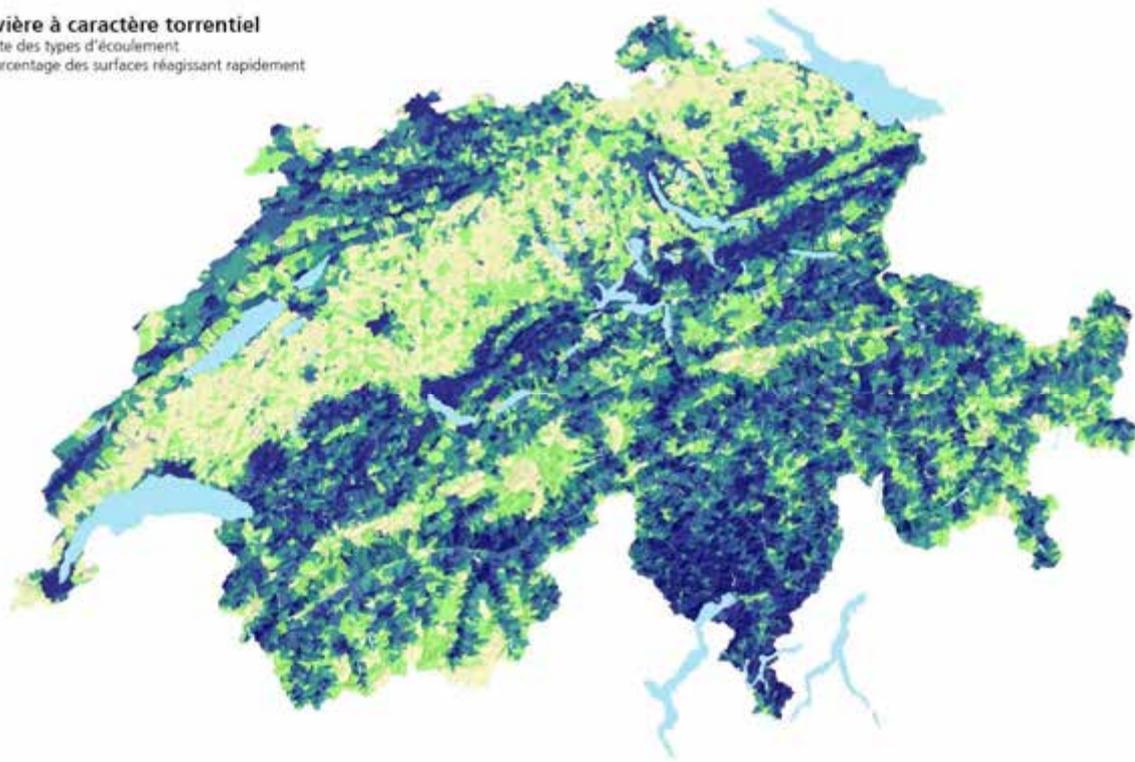


Carte 102

Légende de la Carte 103 et de la Carte 104: Proportion de surfaces en pourcent.

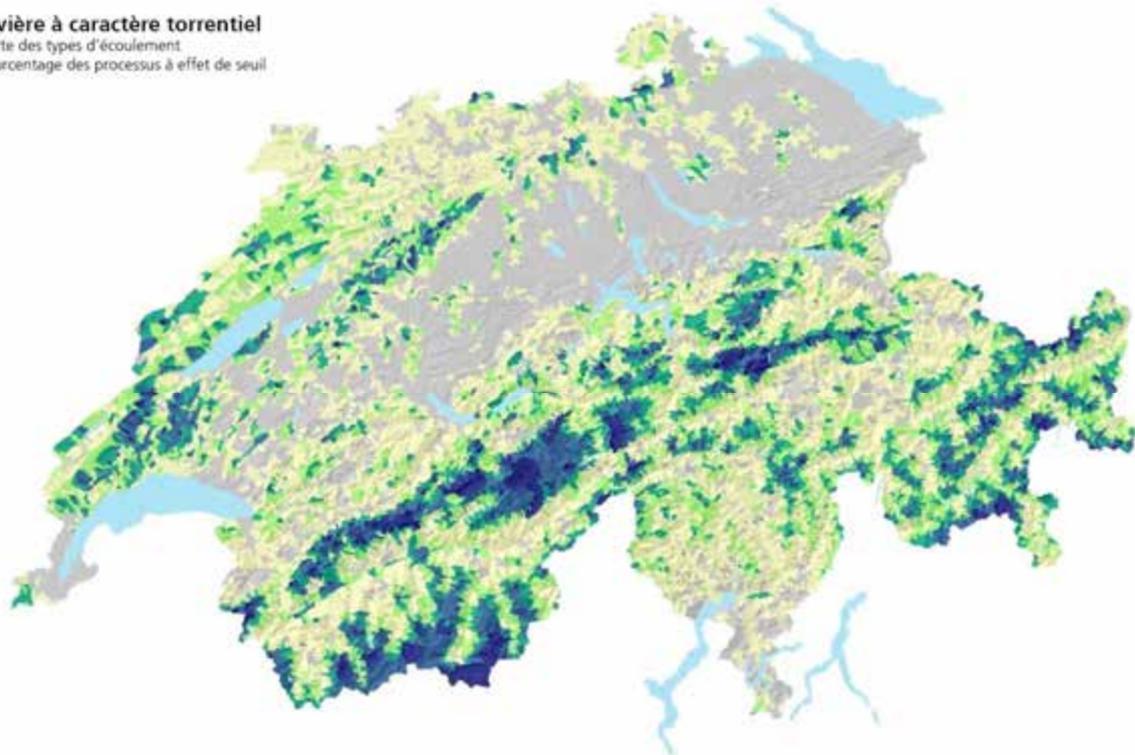


**Rivière à caractère torrentiel**  
Carte des types d'écoulement  
Pourcentage des surfaces réagissant rapidement



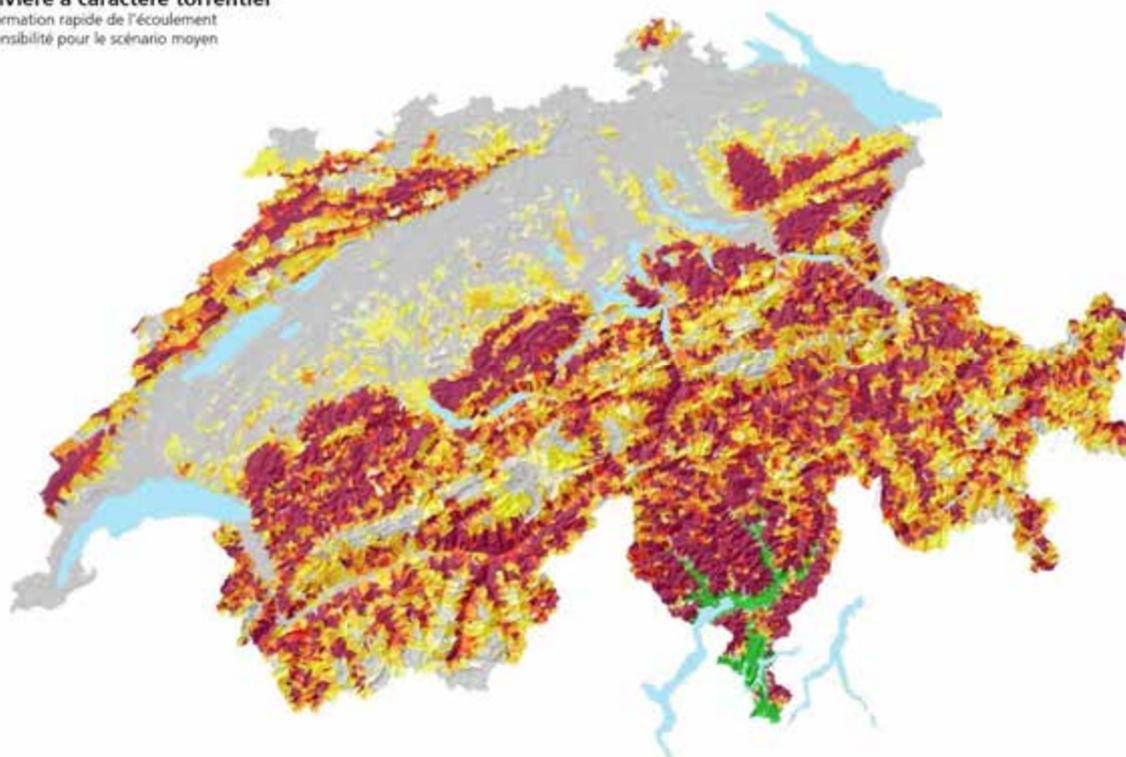
Carte 103

**Rivière à caractère torrentiel**  
Carte des types d'écoulement  
Pourcentage des processus à effet de seuil



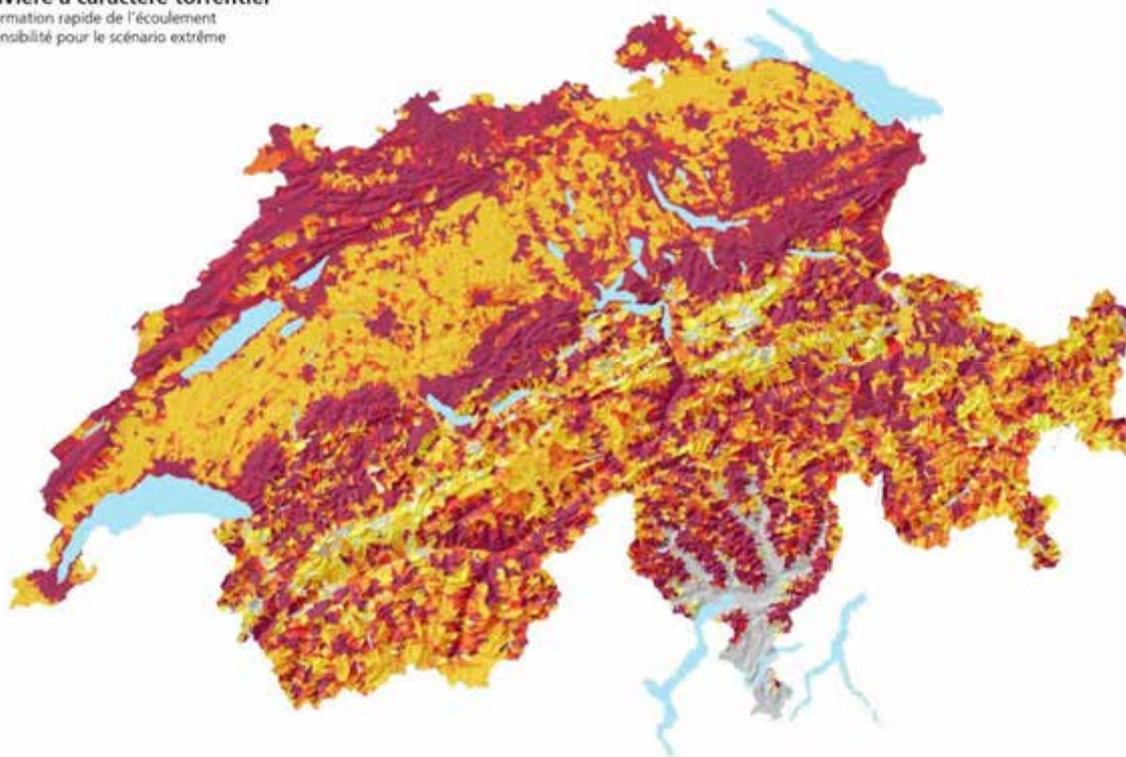
Carte 104

**Rivière à caractère torrentiel**  
 Formation rapide de l'écoulement  
 Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 105

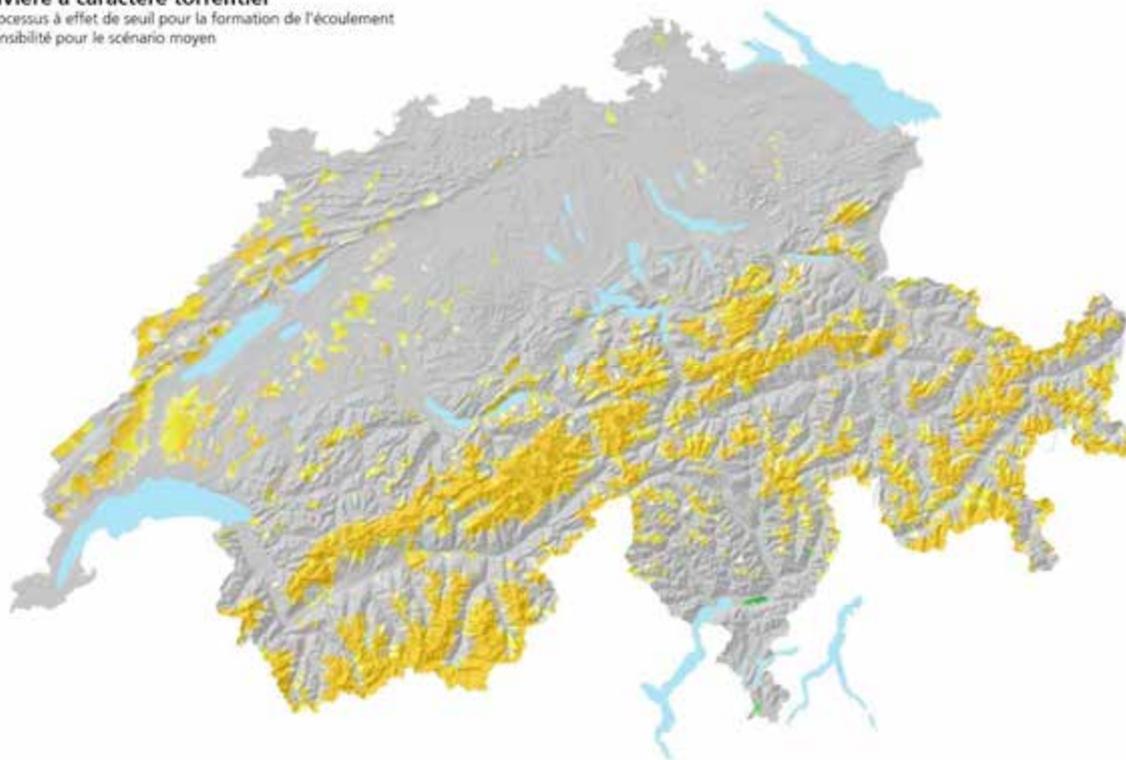
**Rivière à caractère torrentiel**  
 Formation rapide de l'écoulement  
 Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 106

**Rivière à caractère torrentiel**

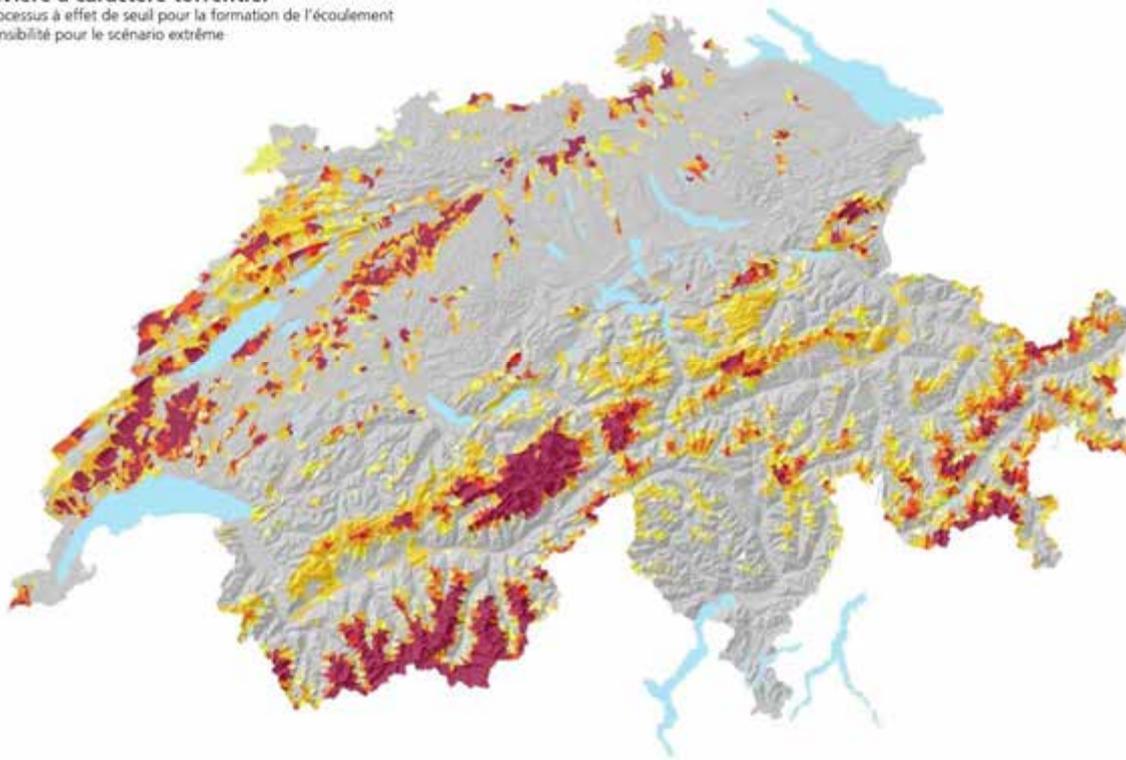
Processus à effet de seuil pour la formation de l'écoulement  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 107

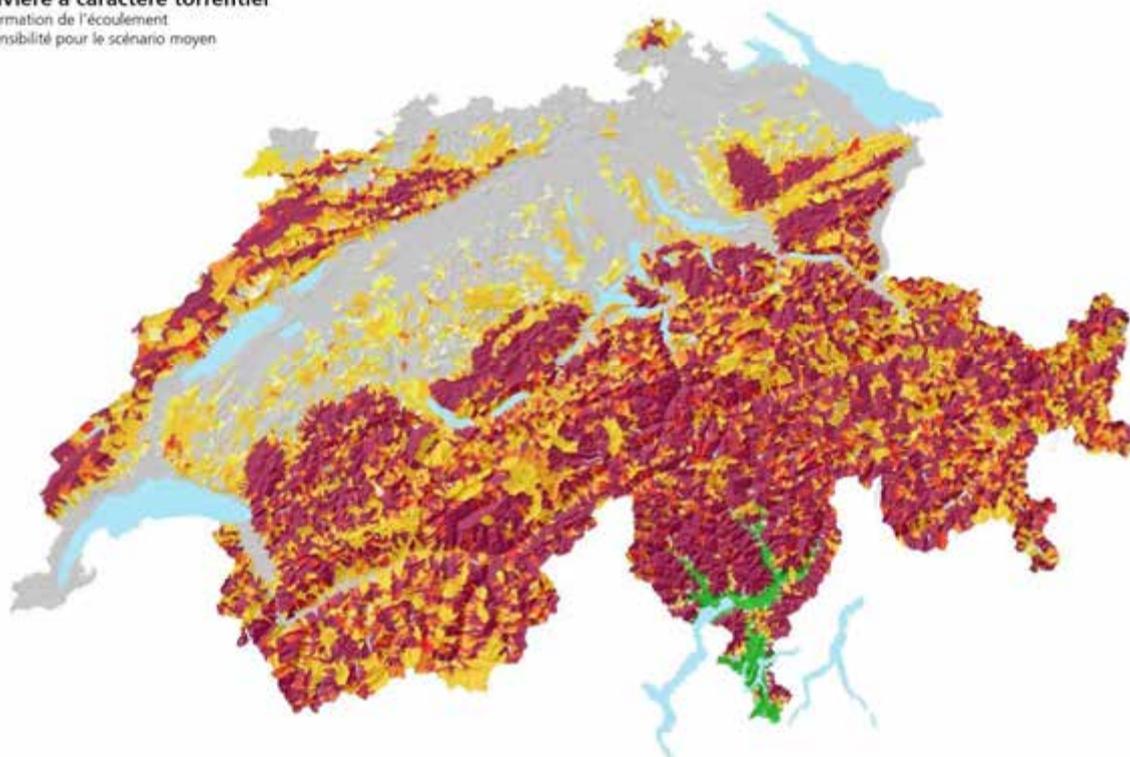
**Rivière à caractère torrentiel**

Processus à effet de seuil pour la formation de l'écoulement  
Sensibilité pour le scénario extrême



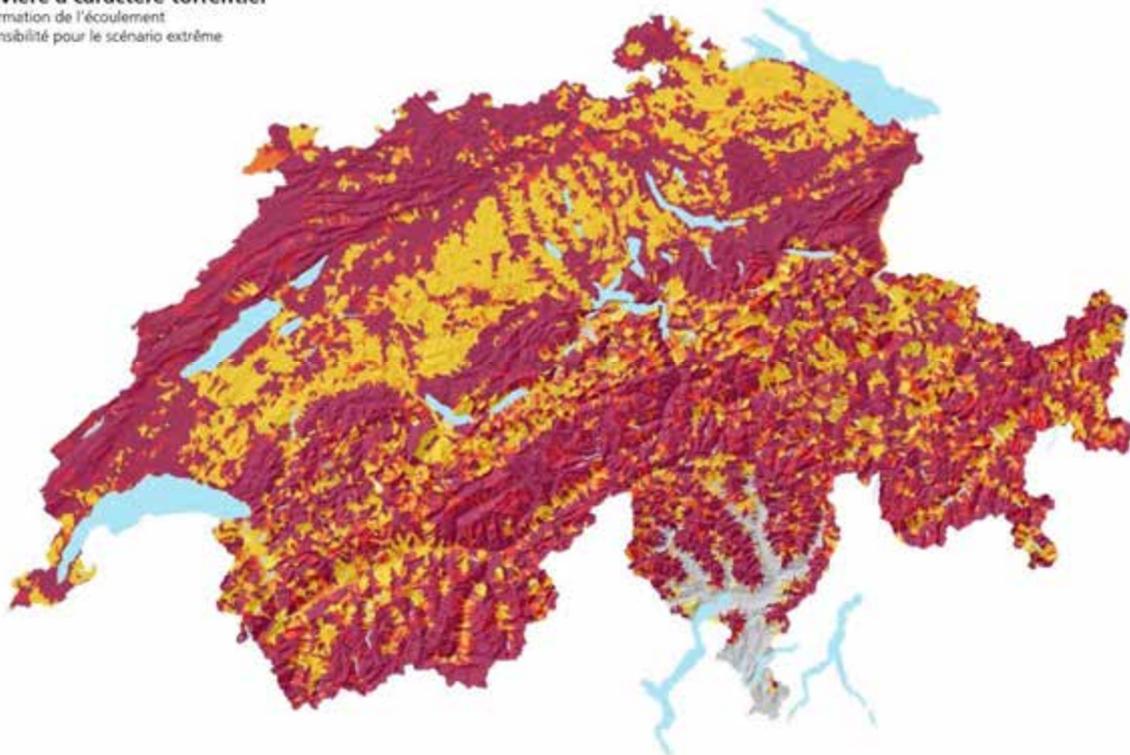
Carte 108

**Rivière à caractère torrentiel**  
 Formation de l'écoulement  
 Sensibilité pour le scénario moyen



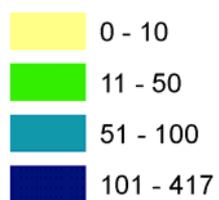
Carte 109

**Rivière à caractère torrentiel**  
 Formation de l'écoulement  
 Sensibilité pour le scénario extrême

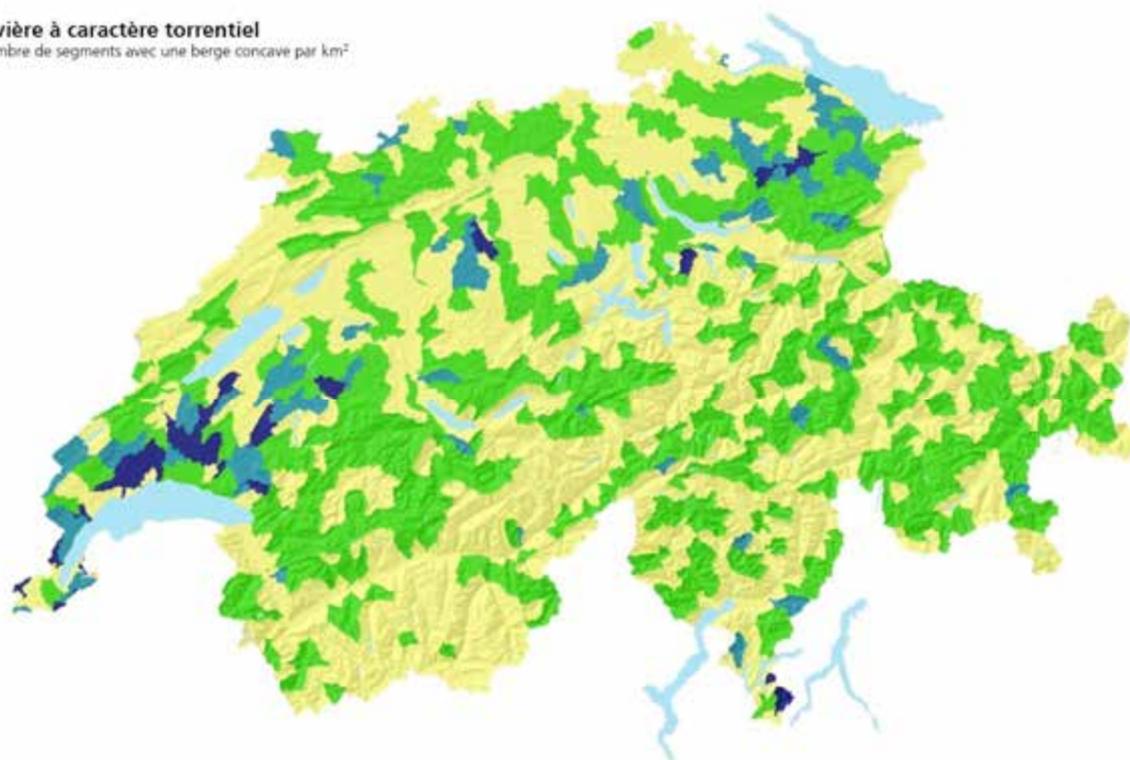


Carte 110

Légende pour la Carte 111: Nombre de segments avec une berge concave par km<sup>2</sup>.

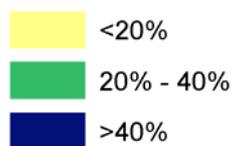


**Rivière à caractère torrentiel**  
 Nombre de segments avec une berge concave par km<sup>2</sup>

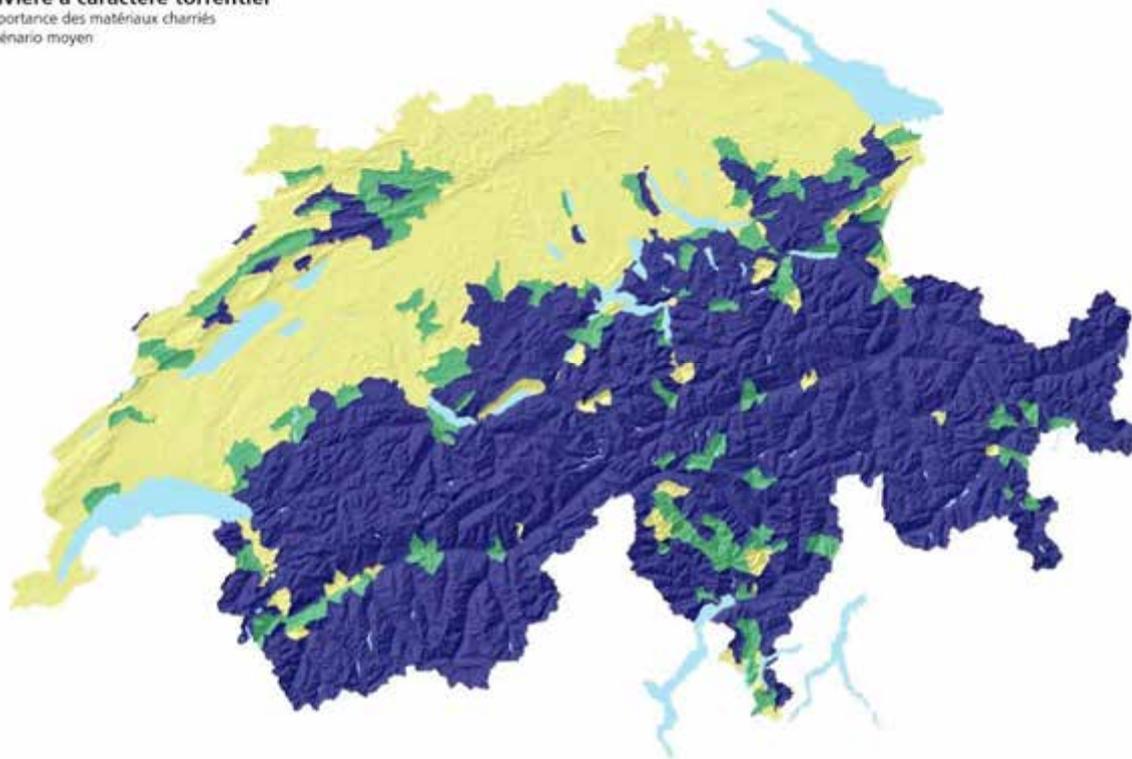


Carte 111

Légende pour la Carte 112 et la Carte 113: Proportion de surface ayant une importante sensibilité de matériaux charriés.

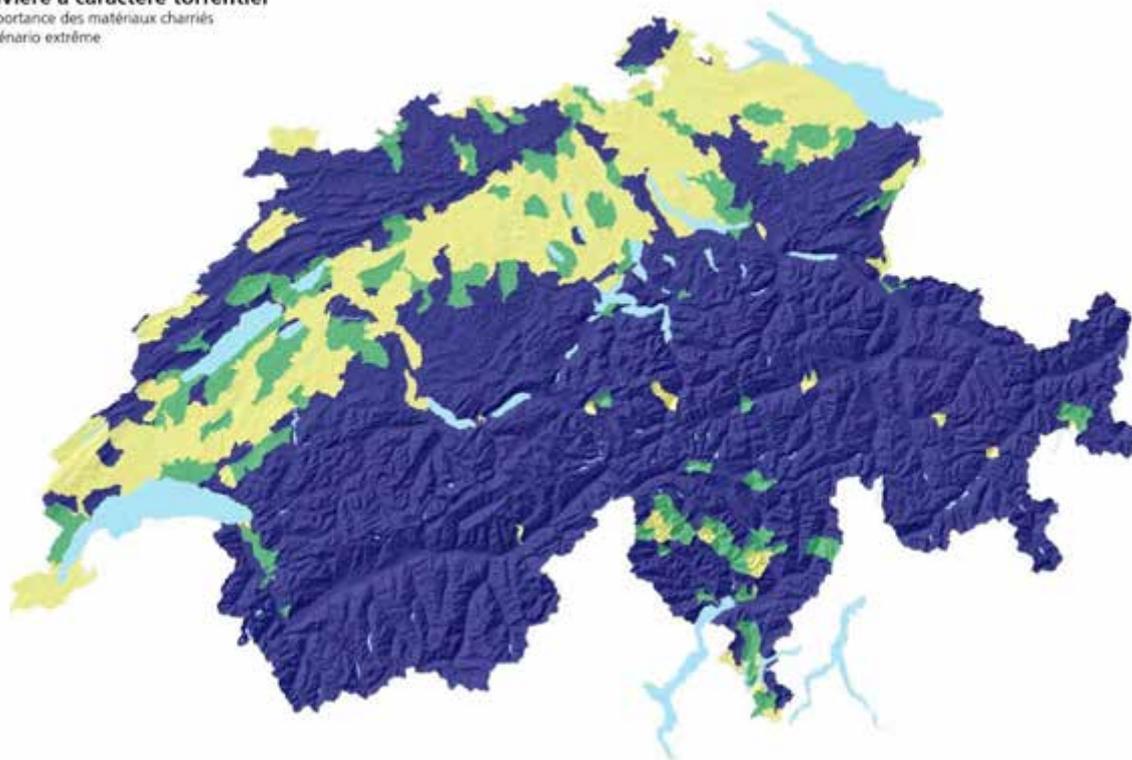


**Rivière à caractère torrentiel**  
Importance des matériaux charriés  
Scénario moyen



Carte 112

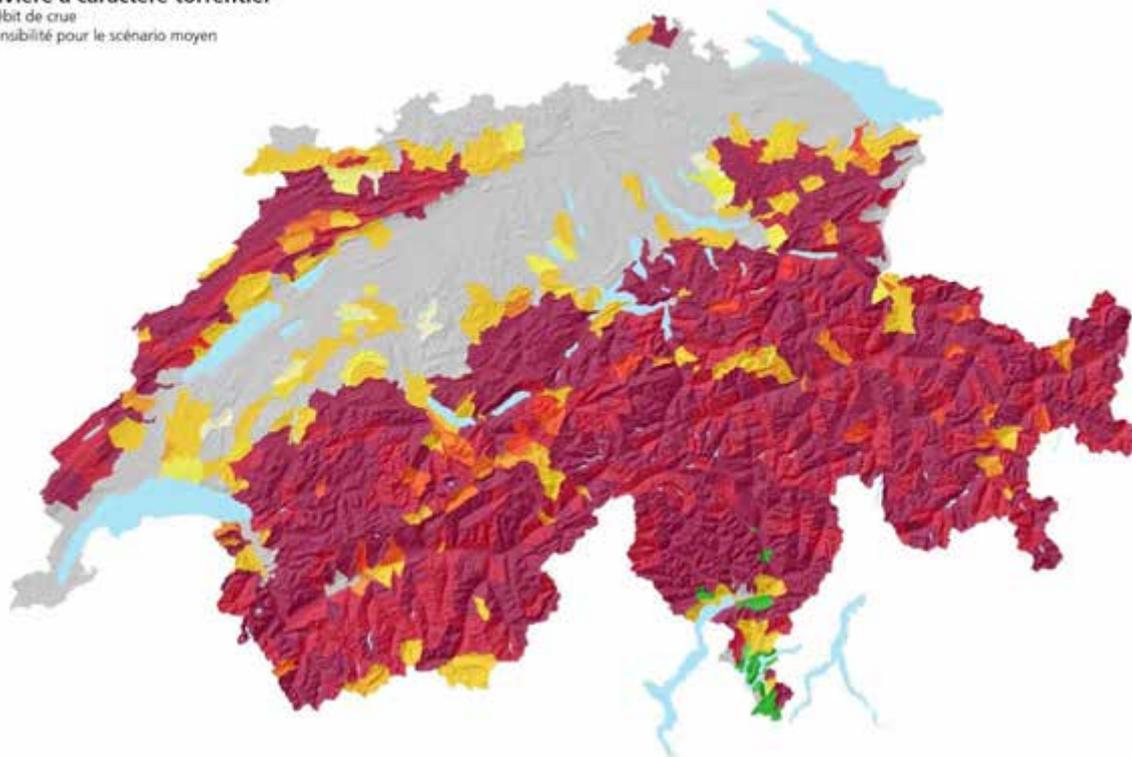
**Rivière à caractère torrentiel**  
Importance des matériaux charriés  
Scénario extrême



Carte 113

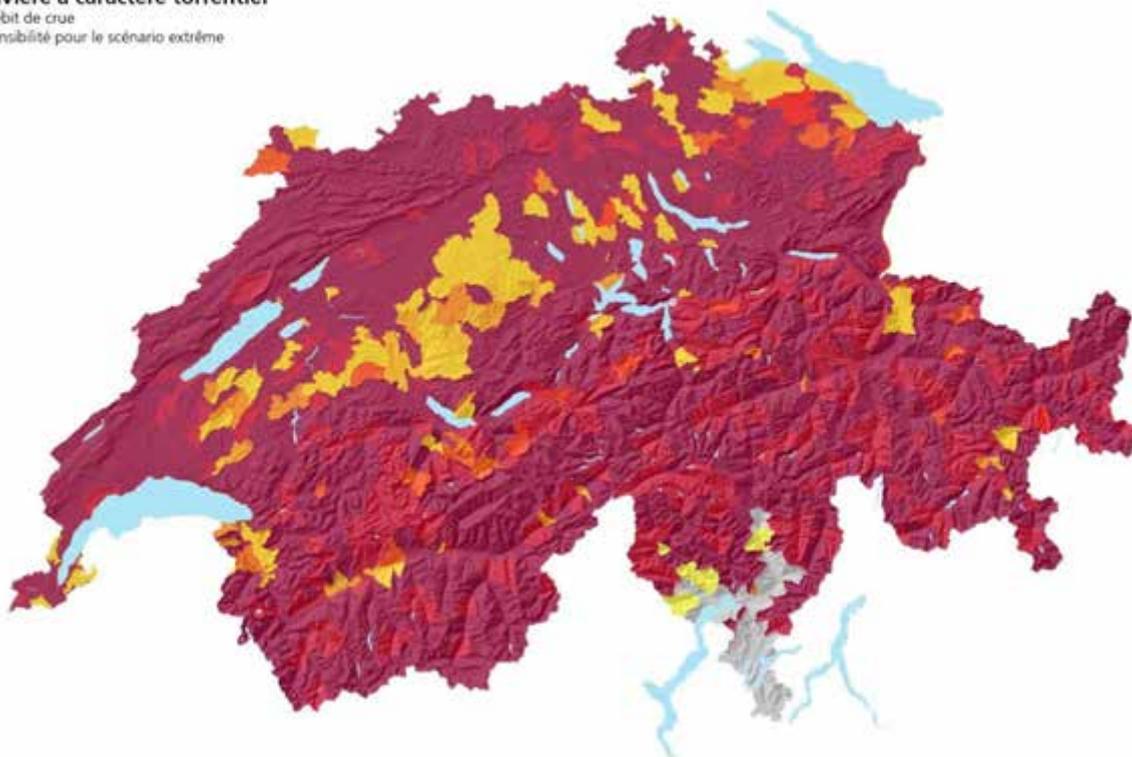
### 9.3 Résultats agrégés

**Rivière à caractère torrentiel**  
 Débit de crue  
 Sensibilité pour le scénario moyen



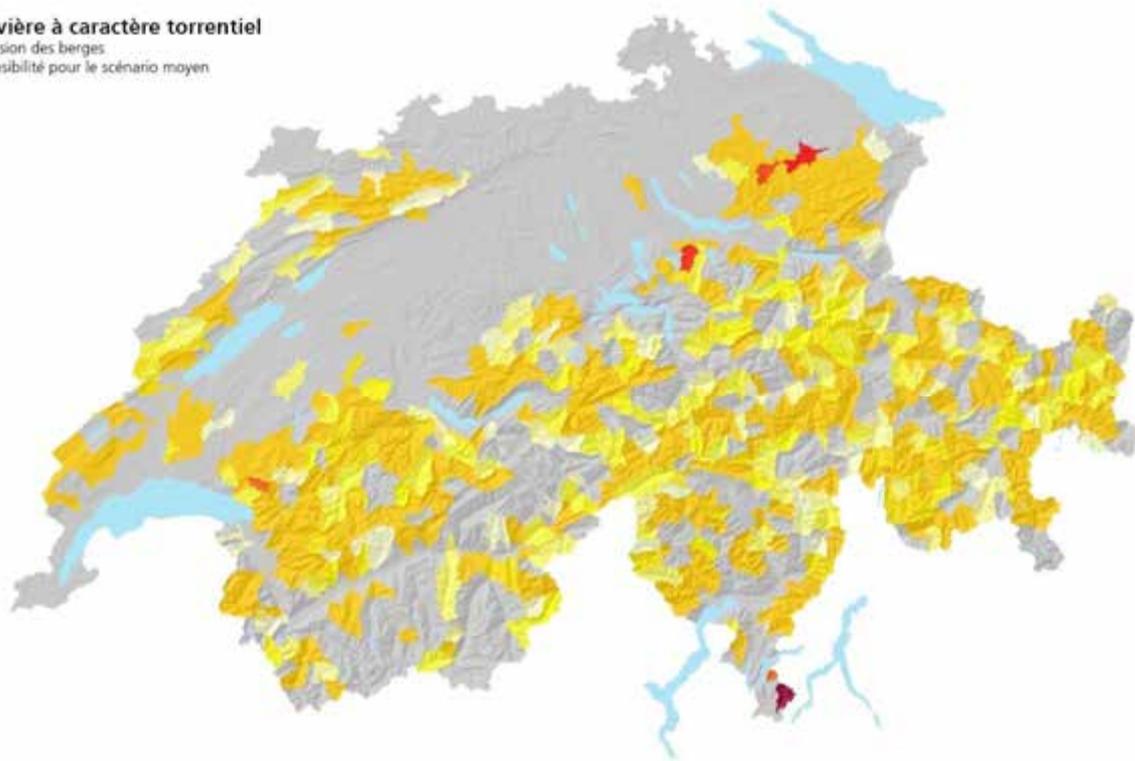
Carte 114

**Rivière à caractère torrentiel**  
 Débit de crue  
 Sensibilité pour le scénario extrême



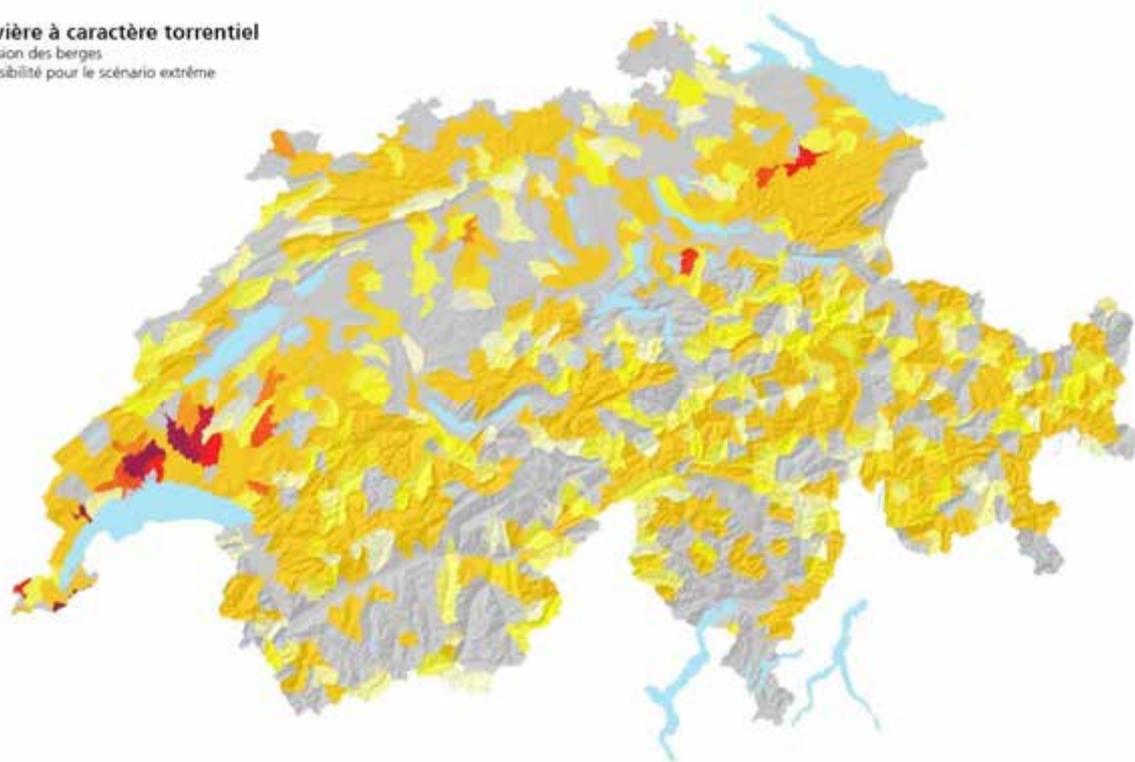
Carte 115

**Rivière à caractère torrentiel**  
Erosion des berges  
Sensibilité pour le scénario moyen



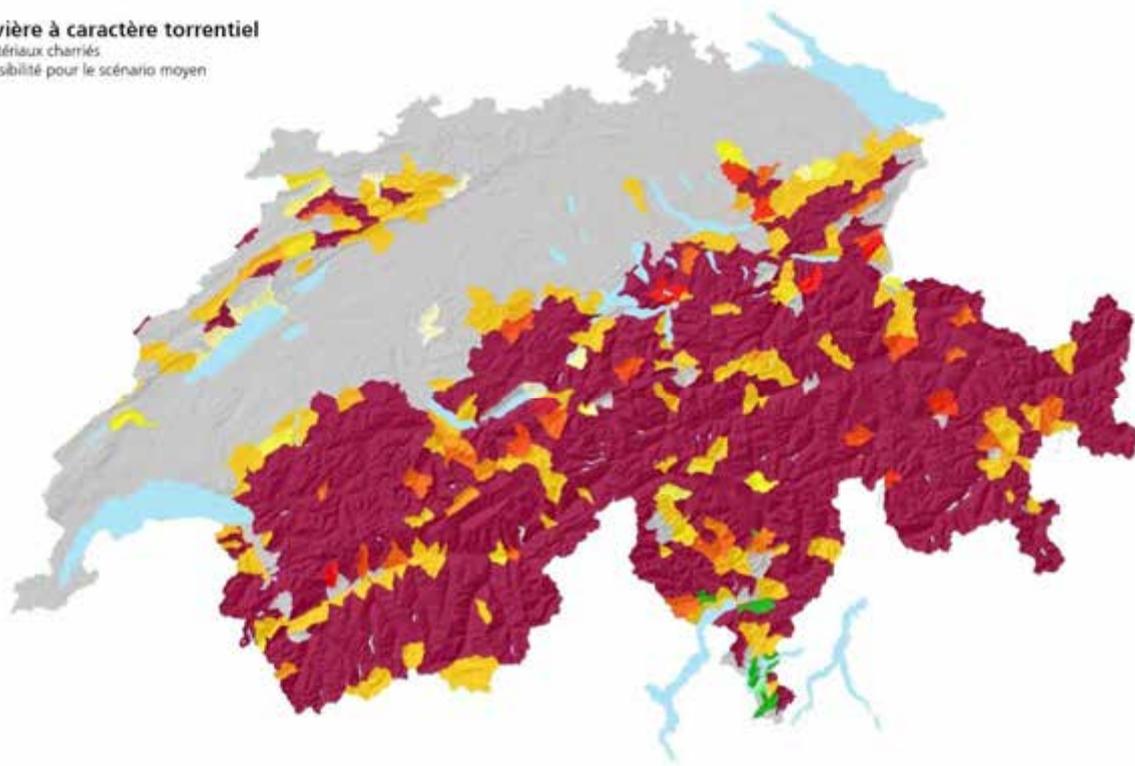
Carte 116

**Rivière à caractère torrentiel**  
Erosion des berges  
Sensibilité pour le scénario extrême



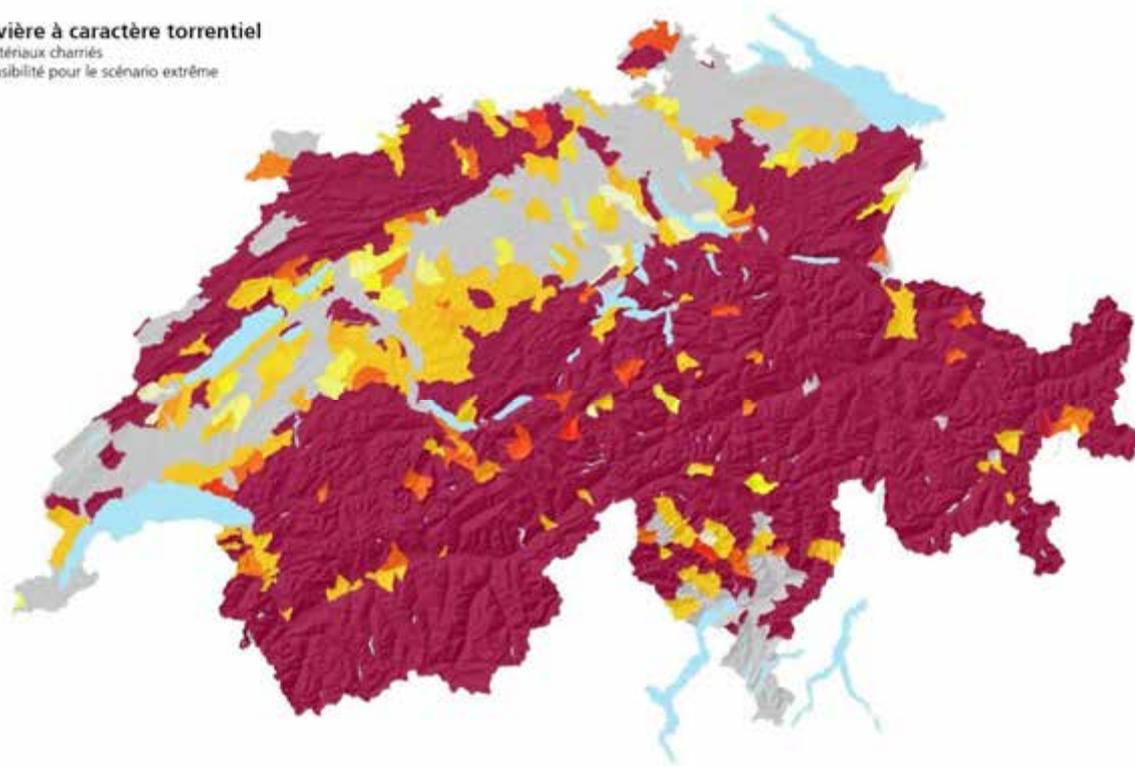
Carte 117

**Rivière à caractère torrentiel**  
Matériaux charriés  
Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 118

**Rivière à caractère torrentiel**  
Matériaux charriés  
Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 119

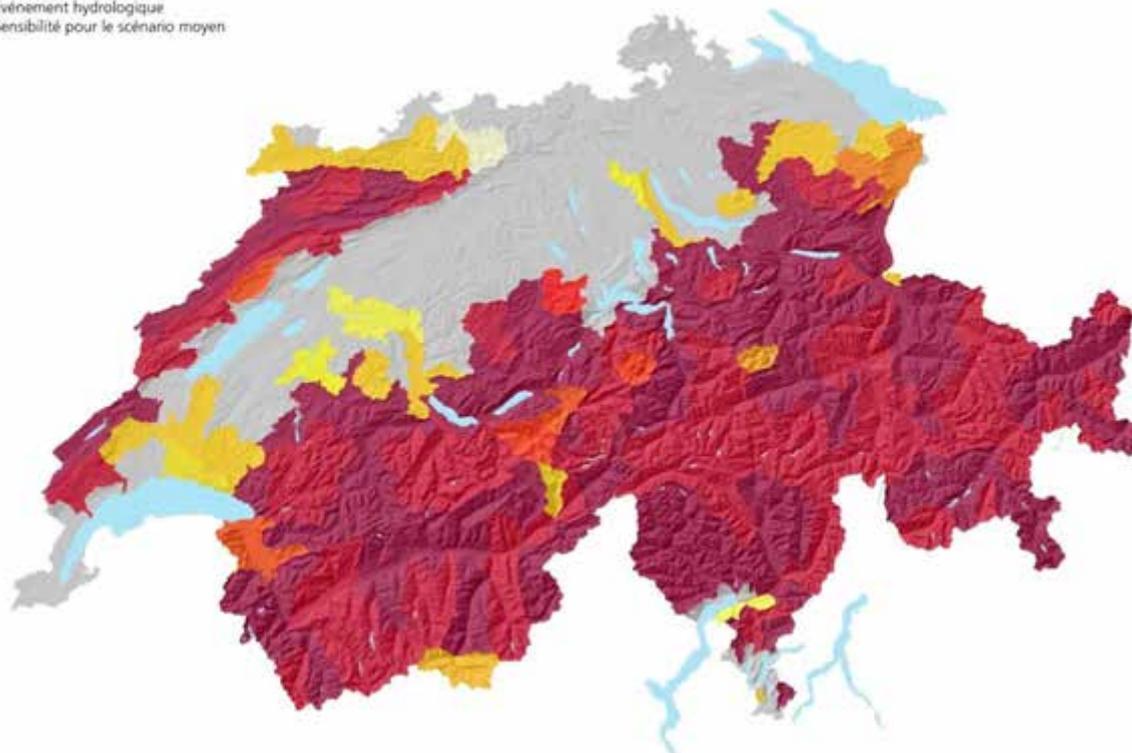
## 10 Rivière

### 10.1 Explications

Seule la sensibilité du débit de crue est analysée pour les rivières. L'évaluation des processus hydrologiques à un niveau de détail le plus petit possible pour les bassins versants sert de base (taille moyenne de 18 km<sup>2</sup>, voir le rapport Méthode), comme ce qui a été utilisé pour les rivières à caractère torrentiel (Carte 109 et Carte 110). Ces résultats sont ensuite agrégés à une taille minimale de 150 km<sup>2</sup> par bassin versant par le biais d'une approche statistique par quantiles. Pour le scénario moyen, les résultats montrent une forte augmentation dans la plupart des régions des Préalpes, des Alpes, du Sud de la Suisse et de l'ouest du Jura (Carte 120). Aucun changement n'est attendu sur le Plateau et dans la partie méridionale du Tessin. Pour le scénario extrême, le résultat de l'agrégation donne une forte augmentation pour la quasi-totalité de la Suisse (Carte 121). Seules quelques régions du Plateau et du Tessin présentent une augmentation ou une situation identique.

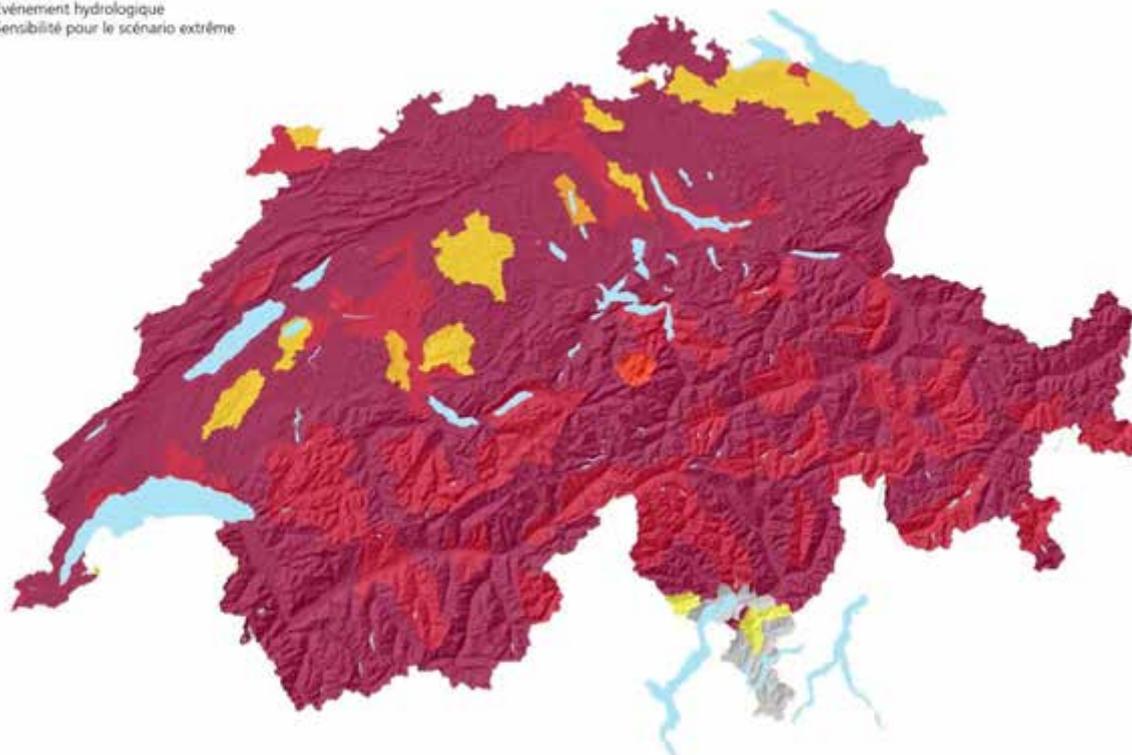
## 10.2 Résultats agrégés

**Rivière**  
 Événement hydrologique  
 Sensibilité pour le scénario moyen



Carte 120

**Rivière**  
 Événement hydrologique  
 Sensibilité pour le scénario extrême



Carte 121

## 11 Evaluation des résultats

Le regroupement des résultats montre que les méthodes d'évaluation pour les mouvements de terrain (processus de chute, coulées boueuses) conduisent à des résultats assez différenciés. Pour les processus liés aux cours d'eau, en particulier pour les torrents et les rivières à caractères torrentiels, les résultats sont nettement moins différenciés. La principale raison est que le projet SilvaProtect-CH ne contient pas de donnée hydrologique. Par opposition, des données de modélisation relativement détaillées sont à disposition pour les autres processus de pente. Ainsi, malgré des scénarios climatiques peu différenciés dans l'espace, il en résulte une image très différenciée au niveau de l'évolution des processus.

Les processus hydrologiques jouent un rôle central pour les processus liés aux cours d'eau. Ceux-ci sont de nature très complexe. Avec des méthodes d'évaluation relativement grossières et des scénarios climatiques peu différenciés dans l'espace, les résultats sont relativement homogènes. Dans ce contexte, la question est de savoir si la carte complétée des types d'écoulement (geo7, 2014) est adaptée pour l'évaluation des processus d'écoulement ; en effet, cette carte se base sur la carte d'aptitude des sols, assez grossière et spatialement peu précise. Afin de vérifier cette hypothèse, une comparaison a été faite dans un bassin versant du canton de Zürich pour lequel existe une carte des processus d'écoulement élaborée à partir d'une carte détaillée des sols (donnée géographique, carte Processus d'écoulement, SIG-ZH).

En plus de la répartition spatiale généralement plus grossière sur la carte d'écoulement Suisse, des parties situées au sud-est dans la partie supérieure du Tösstal ont une disposition d'écoulement « légèrement retardée » sur la carte d'écoulement Suisse et une disposition « retardée » sur la carte du canton de Zürich. Ceci implique que ces surfaces ne seront pas considérées comme ayant une réaction rapide (Figure 1). Il faut en outre constater que cette région est couverte en grande partie par la forêt et ne contient donc pas de carte détaillée des sols. Celle-ci n'existe en effet que pour les surfaces agricoles. Pour le reste, les différences entre les deux cartes ne sont pas si grandes.

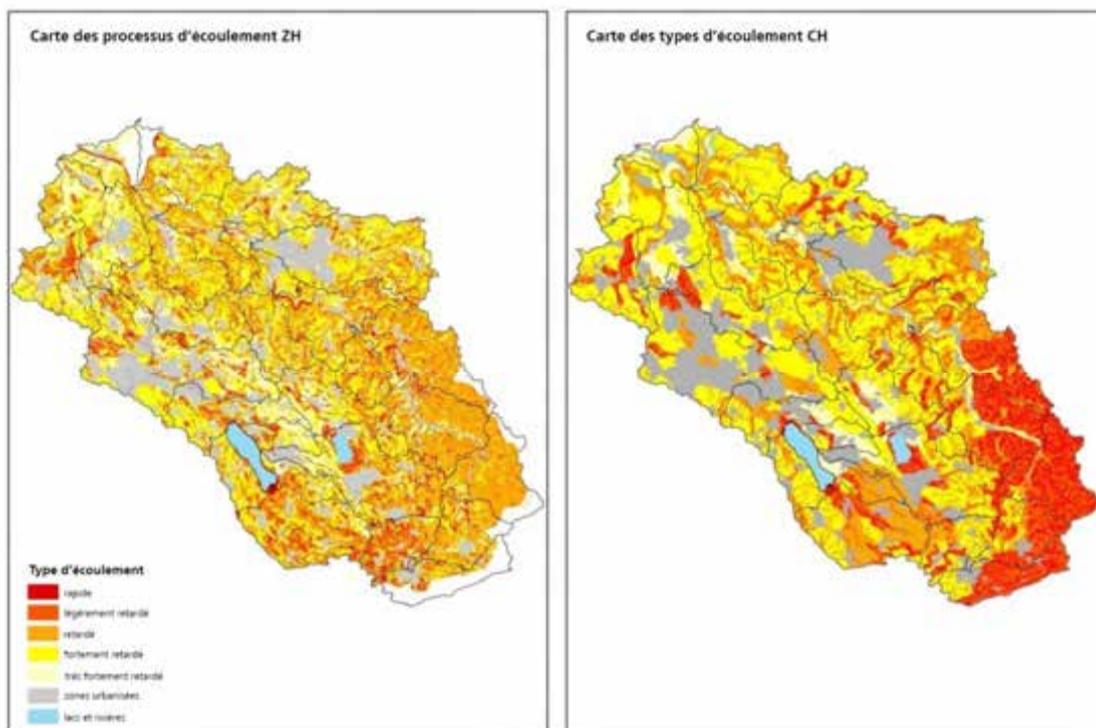


Figure 1 Comparaison entre les cartes des types d'écoulement Zürich et Suisse

La délimitation des surfaces réagissant rapidement ne montre pas de grandes différences d'une carte à l'autre, à l'exception de la région du Tösstal mentionnée ci-dessus (Figure 2). Les différences sont cependant plus importantes pour les surfaces pouvant conduire à la formation de l'écoulement lors des processus à effet de seuil. Là, la carte des processus d'écoulement Zürich présente plus de bassins versants ayant un grand pourcentage de surfaces pouvant conduire à des processus à effet de seuil (Figure 3).

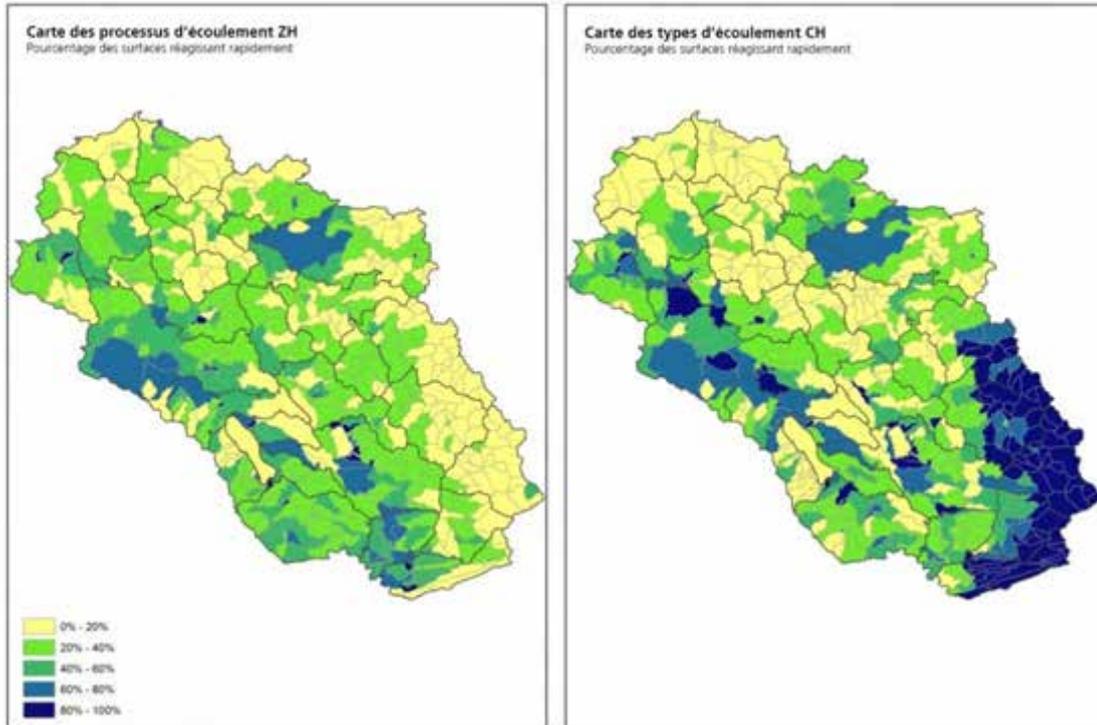


Figure 2 Comparaison du pourcentage des surfaces réagissant rapidement

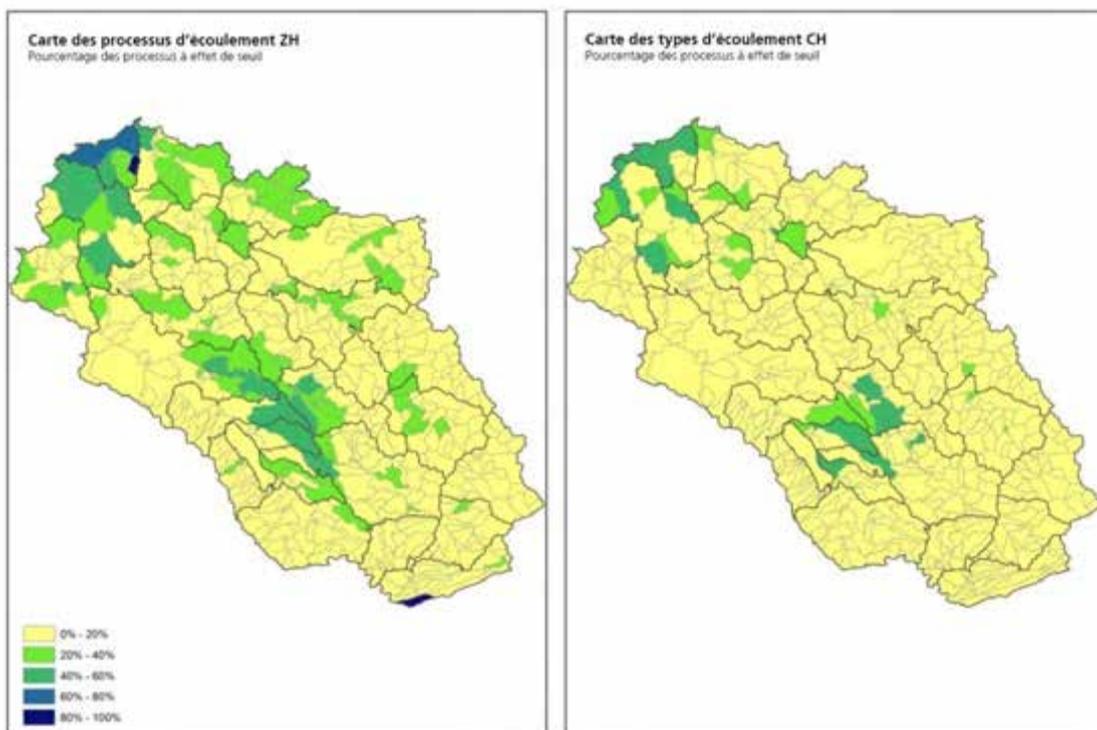


Figure 3 Comparaison du pourcentage des processus potentiels à effet de seuil

Les différences pour les processus à effet de seuil ne sont pas fortement répercutées, comme le montre, pour le scénario moyen, la comparaison de la sensibilité pour le débit de crue (Figure 4). Pour la carte des types d'écoulement Suisse, seule une forte augmentation est présente dans la partie supérieure du Tösstal, tandis que pour la carte des processus d'écoulement Zürich, aucun changement n'apparaît. Cela est aussi dû au fait que le scénario climatique ne considère une augmentation des pluies que pour une partie de la région. Ces constatations sont aussi valables pour les résultats agrégés (Figure 5).

Pour le scénario extrême, les différences entre les deux cartes sont plus grandes : en plus de la partie supérieure du Tösstal, les régions nord et ouest sont aussi touchées (Figure 6). A ces endroits, plus de régions de la carte des processus d'écoulement Zurich ont un degré de sensibilité maximal. Cela est principalement attribué à la réaction d'écoulement résultant des processus à effet de seuil, présents en grand pourcentage sur ces surfaces. Lors de l'agrégation, ces effets sont encore plus marqués (Figure 7).

La comparaison ci-dessus montre que l'utilisation de données de base sur les sols ayant des degrés de détail différents engendre également des résultats différents. On peut donc présumer que les résultats modélisés à partir de la carte des processus d'écoulement Zürich pour le nord et l'ouest du bassin versant sont plus proches de la réalité que ceux modélisés à partir de la carte Suisse. Il n'est pas possible de se prononcer définitivement pour la partie supérieure de Tösstal.

Cette analyse montre aussi que l'homogénéité des résultats obtenus à partir de la carte des processus du canton de Zürich est encore plus marquée, en particulier pour le scénario extrême.

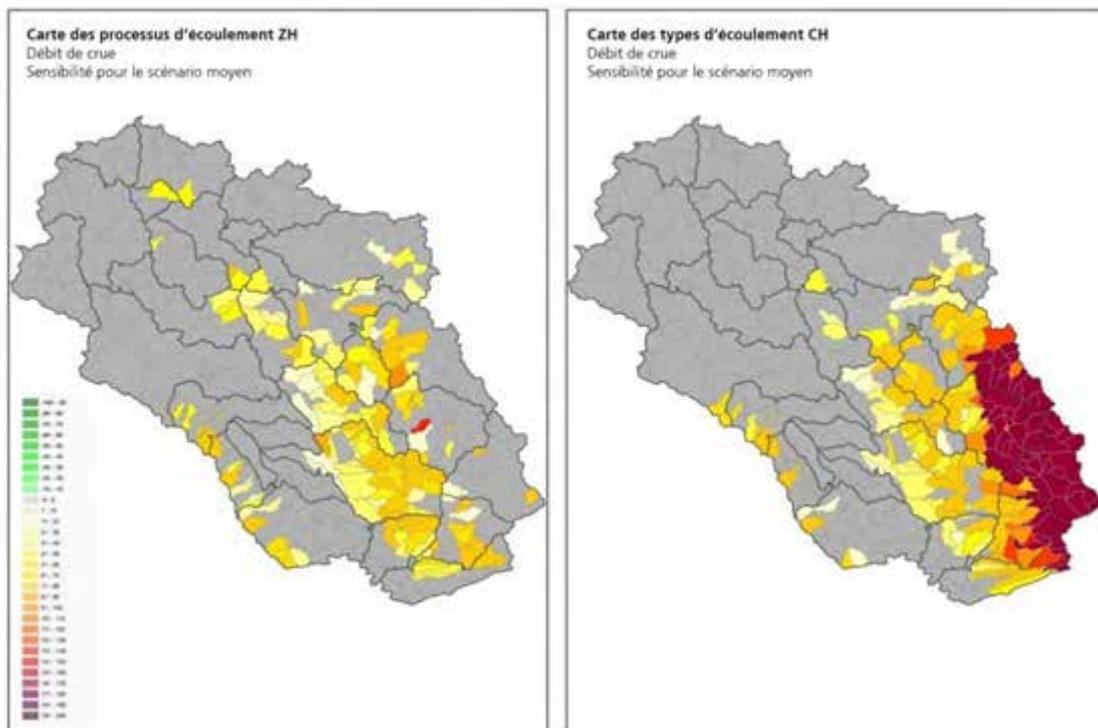


Figure 4 Comparaison de la sensibilité du débit de crue pour le scénario moyen

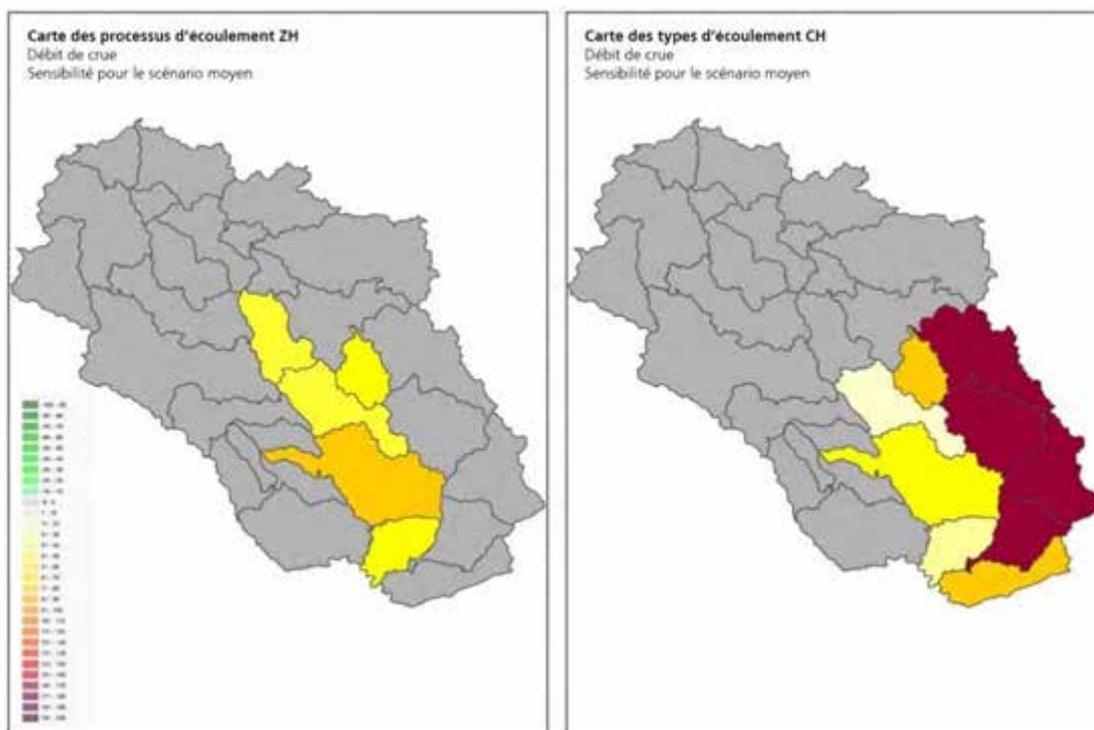


Figure 5 Comparaison de la sensibilité du débit de crue pour le scénario moyen, résultats agrégés

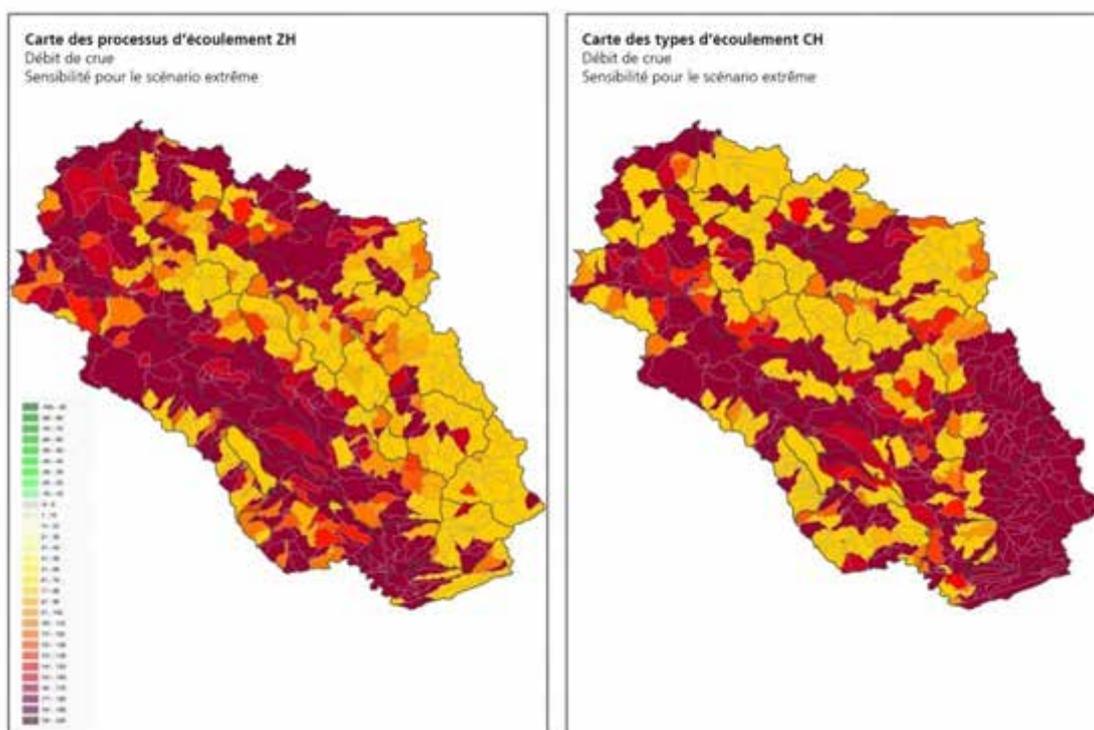


Figure 6 Comparaison de la sensibilité du débit de crue pour le scénario extrême

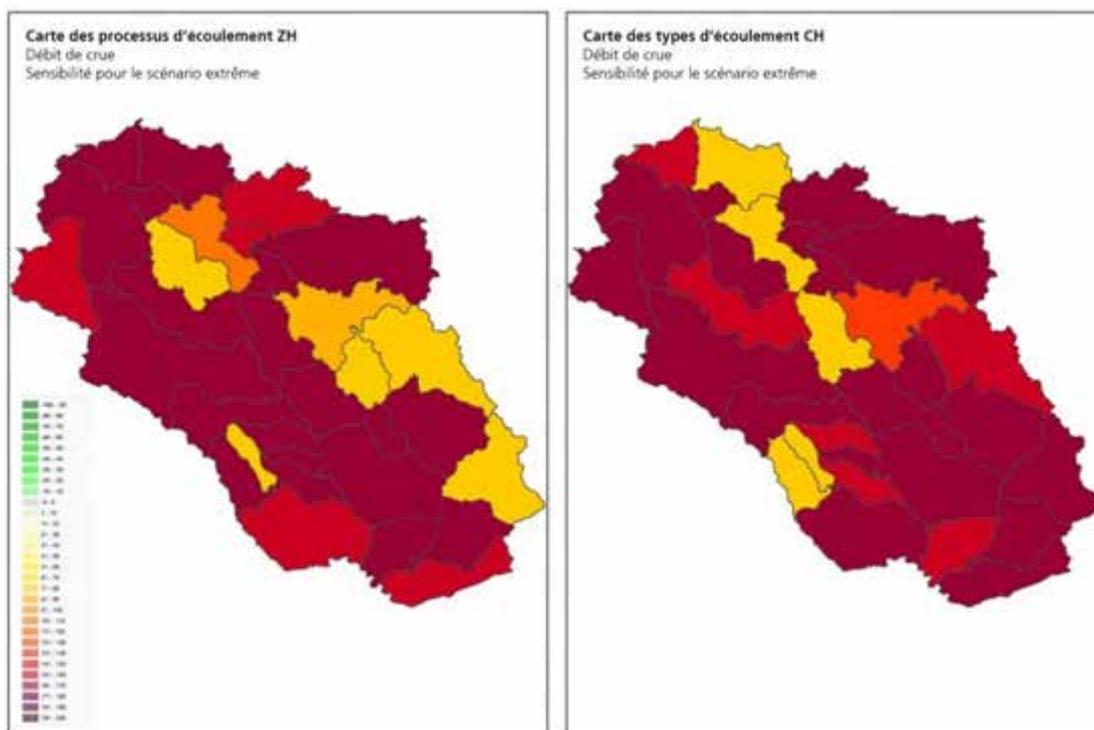


Figure 7 Comparaison de la sensibilité du débit de crue pour le scénario extrême, résultats agrégés

## 12 Bibliographie

geo7, 2014: Berechnung Abflusstypenkarte. Bericht zuhanden BAFU.

geo7, 2015a: Klimasensitivität Naturgefahren. Teil 1: Methodenbericht. Bericht zuhanden BAFU.

geo7, 2015b: Klimasensitivität Naturgefahren. Teil 3: GIS-Handbuch. Bericht zuhanden BAFU.