



HAL
open science

Approche territoriale pour la prévention des risques en montagne, Proposition de cadre technique pour l'analyse et la gestion intégrée des risques naturels en montagne, Module 3 : Analyse des risques saisonniers

Simon Carladous, Jean-Marc Tacnet

► **To cite this version:**

Simon Carladous, Jean-Marc Tacnet. Approche territoriale pour la prévention des risques en montagne, Proposition de cadre technique pour l'analyse et la gestion intégrée des risques naturels en montagne, Module 3 : Analyse des risques saisonniers. Ministère de la Transition Ecologique, de la Biodiversité et des négociations internationales sur le climat et la nature (DGPR/SRN); ONF/DRN/RTM; UGA/INRAE/IGE. 2026, pp.38. <hal-05538063>

HAL Id: hal-05538063

<https://hal.science/hal-05538063v1>

Submitted on 5 Mar 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-SA 4.0 - Attribution - ShareAlike - International License

Approche territoriale pour la prévention des risques en montagne

Proposition de cadre technique pour l'analyse et la
gestion intégrée des risques naturels en montagne

Module 3 : Analyse des risques saisonniers

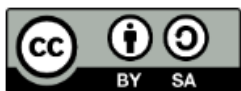
Version 1.0 - 260219

Simon CARLADOUS (ONF/DRN/Pôle SI RTM¹) - Jean-Marc TACNET (UGA/INRAE/IGE)

¹ poste occupé à la date de réalisation du document

Etude réalisée avec le soutien du Ministère de la Transition Ecologique, de la Biodiversité et des négociations internationales sur le climat et la nature (DGPR/SRN)

A des fins de diffusion en accès ouvert, une licence CC-BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>) a été appliquée par les auteurs au présent document



Pour citer ce document :

Carlados, S. et Tacnet, J.-M., 2026. Approche territoriale pour la prévention des risques en montagne, Proposition de cadre technique pour l'analyse et la gestion intégrée des risques naturels en montagne, Module 3 : Analyse des risques saisonniers. Rapport de Recherche, Ministère de la Transition Ecologique, de la Biodiversité et des négociations internationales sur le climat et la nature (DGPR/SRN), ONF-RTM, INRAE, Version 1.0, Février 2026, pp. 38.

Sommaire

Préambule	5
1 Concept de risque saisonnier	8
1.1 Composants du risque	8
1.2 Caractère saisonnier de l'occurrence des phénomènes et de l'exposition matérielle et humaine	9
2 Occurrence saisonnière des phénomènes	9
2.1 Scénarios d'occurrence saisonnière des phénomènes : approche moyenne annuelle vs. saisonnière	9
2.1.1 Principe de l'approche saisonnière de l'occurrence des phénomènes	9
2.1.2 Mode de calcul des probabilités d'évènement moyennes annuelles, saisonnières et journalières.....	10
3 Calcul des dommages et risques directs saisonniers associés aux enjeux de type bâtiments	14
3.1 Exposition directe saisonnière associée aux enjeux fixes.....	14
3.2 Dommages directs saisonniers associés aux enjeux fixes.....	17
3.3 Risques directs saisonniers associés aux enjeux fixes	20
3.4 Synthèse : comparaison des dommages et risques moyens annuels et saisonniers dans des enjeux fixes de type bâtiment	22
4 Calcul des dommages et risques directs saisonniers associés aux enjeux mobiles (véhicules)	30
4.1 Saisonnalité des phénomènes et de l'exposition pour les routes	30
4.2 Exposition matérielle directe saisonnière associée aux enjeux mobiles (véhicules)	32
4.3 Dommages matériels directs saisonniers associés aux enjeux mobiles (véhicules)	35
4.4 Exposition, dommages et risques humains saisonniers dans des véhicules	37

Figures

Figure 1 : Exemples de liens entre les modules techniques proposés et les phases de la démarche STePRiM	6
Figure 2 : Différents types de dommages et de mode d'évaluation de la valeur.	8
Figure 3 : Définition des périodes d'occurrence du phénomène	10
Figure 4 : Principe du calcul simplifié de la probabilité moyenne mensuelle : la probabilité moyenne mensuelle est obtenue en divisant la probabilité moyenne annuelle par le nombre de sous-périodes (les mois d'occurrence d'avalanches). A noter : les variables font l'objet d'une convention de nommage spécifique.	12

Figure 5 : Le calcul de la probabilité moyenne sur une sous-période peut être fait de manière simplifiée (division probabilité annuelle par le nombre de sous-périodes) ou exact : l'approche simplifiée est suffisante.12

Figure 6 : Principes d'identification et de codification des périodes d'occurrence saisonnière de phénomènes multiples13

Figure 7 : Principes de prise en compte de la saisonnalité de l'occurrence des phénomènes et de l'exposition pour des enjeux fixes de type habitation.....14

Figure 8 : Principe de calcul de l'exposition pour des bâtiments de type habitation principale ou résidence secondaire16

Figure 9 : Synthèse des hypothèses de prise en compte du caractère saisonnier de l'occurrence et de l'exposition17

Figure 10 : Calcul du Dommage Matériel Direct (DMD_{Event}) puis du risque (RMD_{Event}) pour un enjeu fixe (type bâtiment) avec une hypothèse d'occurrence saisonnière du phénomène.18

Figure 11 : Calcul du dommage humain direct avec hypothèses de taux d'occupation et de présence saisonniers sans prise en compte du caractère saisonnier des phénomènes (base de calcul moyenne annuelle) : cas de la basse et haute saison (touristique)19

Figure 12 : Calcul du dommage humain direct avec hypothèses de taux d'occupation et de présence saisonniers sans prise en compte du caractère saisonnier des phénomènes (base de calcul moyenne annuelle) : cas du pic de saison et de la période hors saison (touristique)20

Figure 13 : Calcul du dommage humain direct avec hypothèses saisonnières d'occurrence du phénomène (avalanche en saison d'hiver/printemps) et de fréquentation (taux d'occupation et de présence variables hors, basse, haute et très haute saison)21

Figure 14 : Calcul du dommage humain direct dans des bâtiments à occupation temporaire (hôtellerie de plein air) avec hypothèses saisonnières d'occurrence du phénomène (crue torrentielle) d'hiver/printemps) et de fréquentation (taux d'occupation et de présence variables hors, basse, haute et très haute saison)22

Figure 15 : Comparaison entre le calcul du risque matériel direct avec ou sans prise en compte de l'occurrence saisonnière du phénomène pour un bâtiment.23

Figure 16 : Comparaison entre le calcul du Risque Humain Direct (RHD) moyen annuel et saisonnier pour les occupants d'un bâtiment.....24

Figure 17 : Calcul du dommage humain direct avec hypothèses de taux d'occupation et de présence saisonnier avec prise en compte du caractère saisonnier des phénomènes : cas de la basse et haute saison (touristique)25

Figure 18 : Calcul du risque humain direct (RHD) avec hypothèses de taux d'occupation et de présence saisonniers avec prise en compte du caractère saisonnier des phénomènes : cas du pic de saison et de la période hors saison (touristique)26

Figure 19 : Exemples d'hypothèses de saisonnalité d'occurrence de phénomène et d'exposition dans le contexte des routes31

Figure 20 : Probabilité d'atteinte dénommée probabilité d'occurrence spatiale (source approche EconoMe®)32

Figure 21 : Calcul de l'exposition matérielle directe dans des véhicules circulant sur une route dans différentes conditions de trafic (moyen, pointe, congestion) pour un scénario fréquent34

Figure 22 : Calcul de l'exposition matérielle directe dans des véhicules circulant sur une route dans différentes conditions de trafic (moyen, pointe, congestion) pour un scénario rare34

Figure 23 : Exemple de calcul des dommages matériels journaliers moyens sur une base annuelle ou saisonnière en considérant des périodes de trafic moyen, de pics de trafic et de congestion totale, pour le scénario fréquent35

Figure 24 : Exemple de calcul des risques matériels journaliers moyens sur une base annuelle ou saisonnière en considérant des périodes de trafic moyen, de pics de trafic et de congestion totale, pour le scénario fréquent36

Figure 25 : Exemple de calcul de l'exposition humaine en fonction des conditions de trafic pour un scénario fréquent37

Avertissement : Les avis et positions exprimés dans ce rapport n'engagent que les auteurs et ne sauraient être considérés comme constituant une position officielle d'INRAE, de l'ONF/RTM et/ou du commanditaire.

Préambule

Exemple d'approche territoriale des risques : la démarche STePRiM

La gestion intégrée des risques naturels en montagne est un concept visant à coconstruire des stratégies de réduction des risques dans le cadre d'approches territoriales multi-phénomènes¹.

Lancé en 2017 par la DGPR², l'appel à projets STePRiM (Stratégie Territoriale pour la Prévention des Risques en Montagne)³ a été conçu pour répondre aux besoins spécifiques de prévention des risques naturels des territoires de montagne et faciliter une gestion intégrée des risques des territoires de montagne. Dans le même temps, d'autres initiatives telles que La mise en œuvre d'approches territoriale nécessite des méthodologies techniques d'analyse de risque, de concertation et d'aide à la décision spécifiques. A titre d'exemple, les besoins techniques associés à la mise en œuvre d'une démarche STePRiM sont tout d'abord rappelés ci-dessous.

Objectifs d'une STePRiM

Après une phase de diagnostic de la nature et niveaux de risque du territoire, la stratégie territoriale se décline en un ensemble d'actions permettant de couvrir les 7 axes de prévention correspondant à des actions non structurelle (axes 1 à 4) et des actions structurelles d'amélioration ou de protection (axes 4, 6 et 7) :

1. Amélioration de la connaissance et de la conscience du risque
2. Prévision et surveillance des risques naturels
3. Alerte et gestion de crise
4. Prise en compte du risque dans l'urbanisme
5. Actions et travaux sur les biens visant à réduire leur vulnérabilité
6. Travaux de protection active (actions sur la source des phénomènes)
7. Travaux de protection passive (actions sur le phénomène, une fois déclenché)

La définition des priorités d'actions et leur programmation dans un contexte contraint (budgétaire, réglementaire, technique, de calendrier...) aboutissent à établir le schéma d'actions opérationnel de la STePRiM.

Etapes méthodologiques d'élaboration d'une approche territoriale de type STePRiM

La démarche générale se décline en trois phases comprenant chacune plusieurs étapes.

- Phase 1 – Diagnostic de risque
 - Analyse du risque dans l'état actuel du territoire
 - Inventaire et analyse des mesures de prévention existantes (axes 1 à 5)
 - Inventaire et analyse des mesures de protection existantes (axes 6 et 7)
- Phase 2 – Tri préalable des actions et stratégies pour synthèse
 - Tri préalable parmi l'ensemble des actions potentielles sur le territoire
 - Identification des sites prioritaires à traiter

¹ Plusieurs initiatives ou cadres techniques associant les acteurs locaux existent déjà. Par exemple, Les TAGiRN (Territoires Alpains de Gestion Intégrée des Risques naturels) contribuent à créer des dynamiques locales autour de la thématique des risques en montagne.

² Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature - Direction générale de la prévention des risques

³ <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/risques-naturels-montagne>

- Synthèse du diagnostic territorial
 - o à l'échelle de l'ensemble du territoire (par phénomènes, enjeux, acteurs...)
 - o à l'échelle des différents sites exposés, notamment ceux prioritaires
- Phase 3 – Stratégie et schéma d'actions
 - Définition de la stratégie retenue à l'échelle territoire
 - Sur chaque site le nécessitant, choix de l'action ou des actions envisagées
 - Etablissement du schéma opérationnel d'actions

Pour accompagner cette approche, des documents techniques décrits ci-dessous ont été imaginés pour aider les opérateurs à réaliser ces étapes principales.

Un cadre technique général, en plusieurs modules, pour accompagner la mise en œuvre

L'approche proposée est progressive et permet d'explicitier et tracer l'ensemble des choix effectués. Elle est ainsi compatible avec un dispositif comme la STePRiM et son cahier des charges (<https://www.ecologie.gouv.fr/risques-naturels-en-montagne>). Le cadre technique proposé est une proposition d'éléments de réponse et d'aide à la mise en œuvre pratique, **sans caractère obligatoire, ni exclusif**. Afin d'en faciliter la lecture, il est organisé en un ensemble de modules techniques complémentaires (Figure 1) :

- Module 0 : Glossaire et concepts
- Module 1 : Analyse des risques directs matériels et humains
- Module 2 : Analyse des risques indirects et distants
- Module 3 : Analyse saisonnière des risques
- Module 4 : Synthèse territoriale des risques et stratégies de gestion
- Module 5 : Diagnostic des mesures de protection
- Module 6 : Diagnostic des mesures de prévention (hors protection)
- Module 7 : Note technique DGPR : l'Analyse socio-économique
- Module 8 : Méthodes d'aide à la décision

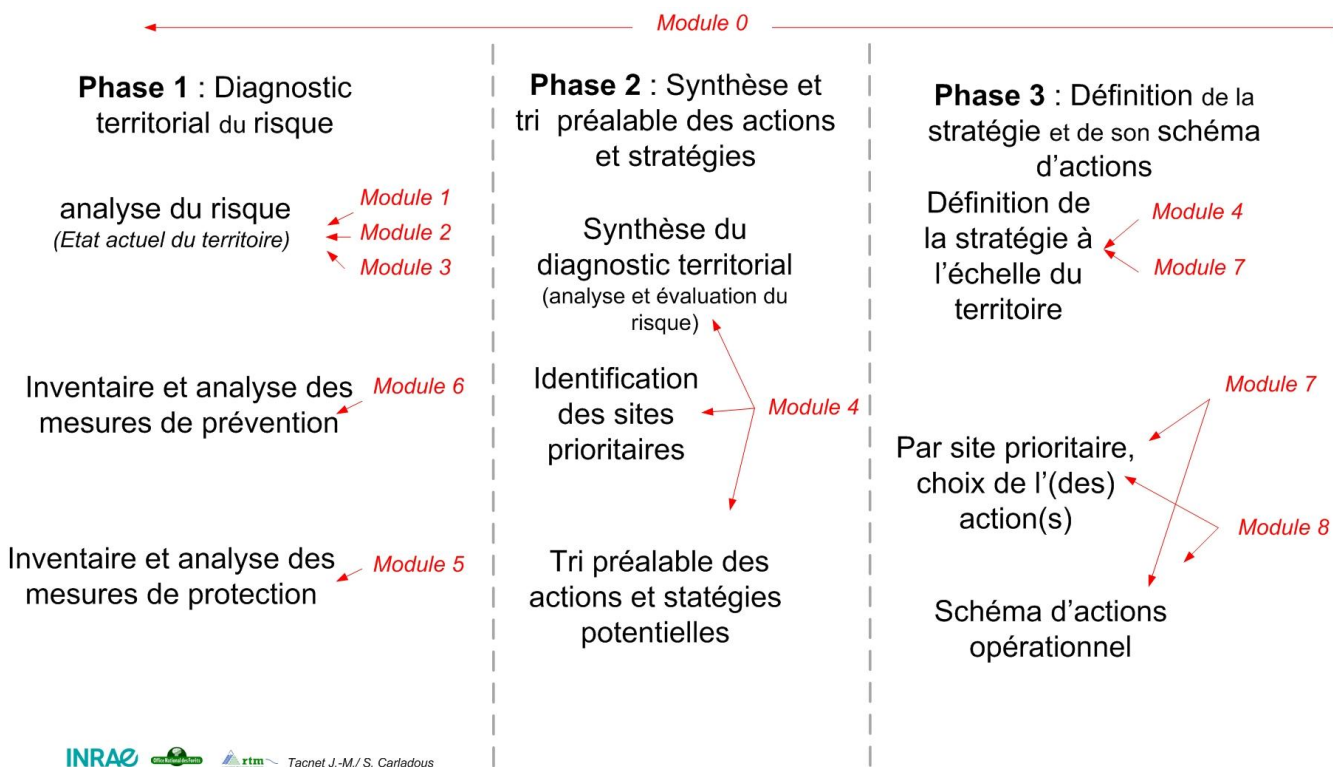


Figure 1 : Exemples de liens entre les modules techniques proposés et les phases de la démarche STePRiM

Avertissement: Ces **modules** correspondent, en l'état, à des **propositions de cadres techniques** développés par l'ONF-RTM et INRAE. L'utilisation de la **méthodologie** proposée peut **aider à structurer la stratégie d'actions** en étant compatible avec l'esprit du cahier des charges de la démarche **STePRIM** mais **sans être obligatoire et exclusif d'autres méthodes**.

Le module 3 : Analyse des risques saisonniers

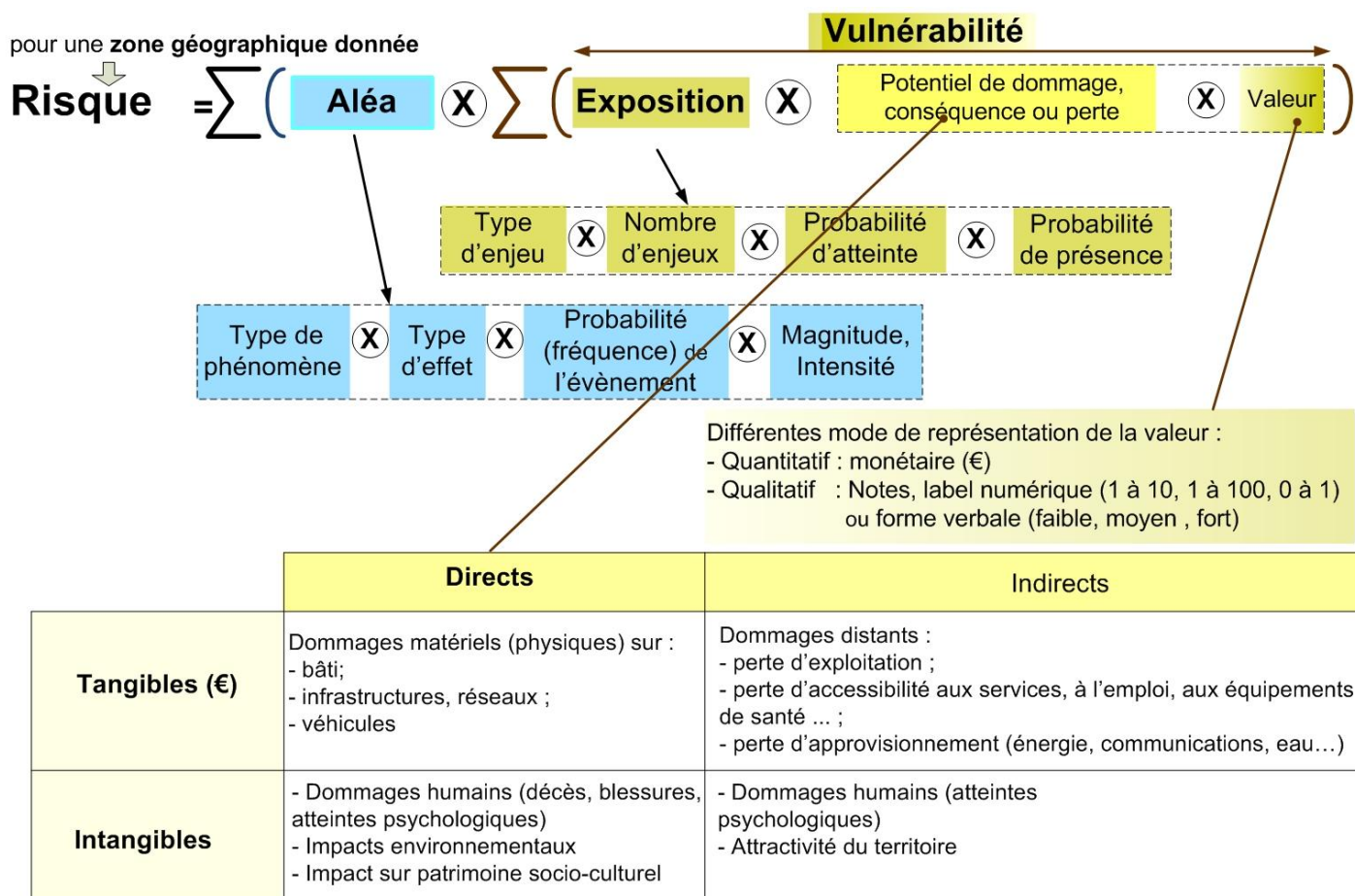
Objectif du module

Le module décrit les modes d'évaluation des risques matériels et humains directs liés aux enjeux fixes (bâtiments) et mobiles (véhicules) ainsi que leurs occupants en prenant en compte les variations saisonnières d'occurrence des phénomènes et d'exposition en termes d'occupation partielle ou variable pour des bâtiments ou de présence pour des enjeux mobiles (nombre de véhicules, durée de présence en fonction du trafic).

1 Concept de risque saisonnier

1.1 Composants du risque

Le risque est calculé pour chaque type d'enjeu et chaque phénomène en combinant l'aléa, l'exposition, le potentiel de dommage et la valeur (Figure 2).



Exemples des différents types de conséquences (dommages)

Figure 2 : Différents types de dommages et de mode d'évaluation de la valeur.

1.2 Caractère saisonnier de l'occurrence des phénomènes et de l'exposition matérielle et humaine

Selon les saisons et périodes de l'année, les composants du risque peuvent varier de manière importante. Les phénomènes peuvent survenir pendant l'hiver (avalanches de neige), principalement durant le printemps, l'été et l'automne (crues torrentielles) ou bien toute l'année (séisme, glissement). L'exposition des enjeux peut, elle aussi, fortement varier selon les périodes notamment en lien avec la fréquentation touristique. Pendant les périodes d'affluence, le taux d'occupation des bâtiments et de présence à l'intérieur des bâtiments va augmenter de manière considérable : les résidences secondaires sont occupées par un nombre d'occupants plus élevés par rapport à des habitations permanentes, non saisonnières.

D'autres infrastructures telles que des hôtels, résidence de vacances, camping voient aussi voir leur fréquentation croître à ces périodes. L'exposition et donc le risque va augmenter à certaines périodes. La même analyse peut être faite sur les routes ou infrastructures de transport. L'exposition va augmenter pendant les périodes d'affluence en raison d'un trafic plus important, d'une vitesse généralement plus faible et d'un taux d'occupation des véhicules plus fort.

Le risque saisonnier lié au caractère saisonnier de l'occurrence des phénomènes et de l'exposition va être sensiblement différent de la valeur de risque moyennée sur toute l'année. Ce module propose différentes approches permettant de prendre en compte ces aspects saisonniers de l'occurrence des phénomènes et de l'exposition pour des enjeux fixes (bâtiments, campings) et mobiles (véhicules).

En matière d'exposition, les périodes touristiques peuvent engendrer des pics d'occupation des bâtiments (notamment la fraction du parc immobilier dédiée à la location) et aussi de trafic routier. Pour ces raisons, une approche prenant en compte ce caractère saisonnier des phénomènes, de l'occupation (exposition) humaine et matérielle (véhicules) est proposée. Le décideur peut par contre choisir, ou pas, de considérer ces pics dans sa stratégie de gestion des risques. Cet aspect est généralement envisagé intuitivement par les gestionnaires de risque sans toutefois généralement proposer et utiliser de méthode objective pour analyser, comparer les pics de risque saisonniers.

2 Occurrence saisonnière des phénomènes

2.1 Scénarios d'occurrence saisonnière des phénomènes : approche moyenne annuelle vs. saisonnière

2.1.1 Principe de l'approche saisonnière de l'occurrence des phénomènes

Les zones de montagne sont cependant, d'une part, très dépendantes d'activités touristiques saisonnières associées à des taux de fréquentation élevés et, d'autre part, soumis à des phénomènes également saisonniers. Par exemple, pour les avalanches de neige, on peut distinguer une période d'occurrence du phénomène (S1) et une période au cours de laquelle il n'y a pas d'avalanches (S2) (Figure 3).

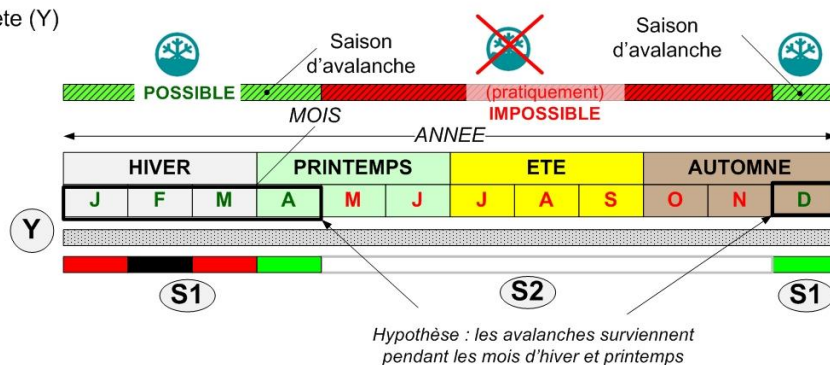
La démarche consiste à identifier les périodes où le phénomène peut être observé, par exemple les mois d'hiver tels que représentés sur la Figure 3.

Certains **phénomènes** vont survenir uniquement ou préférentiellement à **certaines périodes** de l'année, leur **occurrence est saisonnière**

Pour le phénomène d'avalanche, l'année complète (Y) est, par exemple, décomposée en :

1) une période avec phénomène saisonnier d'avalanche (S1) soit 5 mois ou 151 jours

2) une période sans phénomène saisonnier (S2) soit 7 mois ou 214 jours



INRAE
Tacnet J.-M./S. Carliadous

Figure 3 : Définition des périodes d'occurrence du phénomène

Sur ces bases, on imagine sans difficulté que certaines périodes vont être « plus risquées » que d'autres : le risque temporaire sur une route congestionnée au cours d'un chassé-croisé de l'hiver alors que les conditions sont avalancheuses est intuitivement plus fort que le risque au cours d'un autre jour de l'hiver voire de l'année. L'approche classique qui se base sur un calcul de risque moyen annuel ne va pas mettre en évidence les pics de risque qui peuvent avoir des conséquences en matière de gestion opérationnelle par l'Etat, les collectivités et les gestionnaires d'infrastructures.

La première étape consiste à identifier et spécifier les périodes durant lesquelles un phénomène peut, le cas échéant, soit exister (période dite d'occurrence) ou ne pas exister. Par exemple, dans le cadre d'une analyse de risque sur des enjeux situés dans les vallées, on peut considérer que les phénomènes d'avalanche ne vont survenir que pendant la période d'hiver et quelques mois au printemps. Ceci permet de définir des mois pendant lesquels le risque va exister ou pas : on définit ainsi un index d'occurrence mensuel des phénomènes.

Si on considère que les phénomènes ne surviennent que pendant la période hivernale, le risque va être augmenté pendant cette période par rapport aux autres périodes. Un calcul moyen mensuel correspondra à une probabilité uniforme sur tous les mois de l'année. Dans un calcul saisonnier, la probabilité d'occurrence sera répartie sur les seuls mois où le phénomène survient et nulle le reste de l'année de manière uniforme : la probabilité annuelle sera la même mais la probabilité mensuelle sera nulle certains mois. Au final, le risque annuel moyen sera le même avec ou sans prise en compte du caractère saisonnier, mais avec des valeurs mensuelles très différentes. Dans le cadre d'une approche saisonnière, elles seront plus importantes pendant la saison des phénomènes et nulles hors saison.

Cette approche peut s'appliquer indifféremment aux enjeux présents en permanence (habitations, infrastructures, etc.) mais aussi aux véhicules circulant sur des routes.

2.1.2 Mode de calcul des probabilités d'évènement moyennes annuelles, saisonnières et journalières

L'occurrence des phénomènes en montagne comprenant par exemple des inondations, des crues torrentielles, des glissements, des chutes de blocs peut varier selon les saisons. Les avalanches de neige ne surviennent que lorsque la neige existe, des saisons préférentielles pour les crues torrentielles peuvent être identifiées. De manière habituelle, les scénarios de phénomène d'une magnitude donnée sont, de manière opérationnelle, envisagés au travers du concept de période de retour⁴ dont on dérive une probabilité moyenne annuelle de dépassement. Les calculs de risque se font sur la base de cette probabilité et permettent de comparer, sur une base annuelle, les risques liés aux avalanches, aux crues torrentielles, chutes de blocs.

Les probabilités sont généralement calculées sur la base d'analyse de valeurs maximales annuelles. Une avalanche dite *décennale* a, chaque année (en moyenne), une probabilité de 0.1 de se produire sans tenir compte du fait qu'elle ne survient que pendant les mois où il y a de la neige. Sur ces bases, si on s'intéresse de manière plus fine à l'évolution du risque au cours des différentes périodes de l'année, on comprend facilement que le risque global hivernal ne sera pas le même que le risque estival notamment en raison de la nature des phénomènes possibles. L'approche saisonnière propose une analyse plus fine du risque sur des sous-périodes (mois, jours). Il s'agit d'une approche simplifiée mais qui peut être justifiée d'un point de vue théorique en explicitant et utilisant les hypothèses sous-jacentes (souvent méconnues) associées à l'utilisation des concepts de période de retour et de probabilités associées par les praticiens. Il est rappelé qu'une analyse exacte de l'occurrence saisonnière de phénomènes devrait faire l'objet d'une étude statistique spécifique à l'échelle des sous-périodes envisagées. Le principe global de calcul est décrit ci-dessous. Sa justification théorique peut être trouvée dans (Tacnet et al., 2025)⁵. L'article explicite l'hypothèse de loi de Poisson sous-jacente et les domaines de validité de l'approximation consistant à passer d'une période de retour T à la probabilité moyenne annuelle considérée comme égale à $p=1/T$.

Principe global du calcul : supposons que l'on a calculé la probabilité moyenne annuelle P d'une avalanche. Si on considère que l'avalanche peut se produire de manière équiprobable chaque mois, la probabilité moyenne mensuelle sera égale à $P/12$. Dans les faits, la saison d'avalanche ne dure que quelques mois, disons par exemple 5 mois. La probabilité sera en fait égale à $P/5$ pendant les 5 mois d'hiver et nulle pendant les autres mois (Figure 4). A exposition égale sur l'année, le risque moyen annuel sera le même mais le second calcul permettra de mettre en évidence que le risque se concentre sur la période hivernale en calculant le risque saisonnier d'hiver. La prise en compte de la saisonnalité est nécessaire pour permettre de détecter des pics de risque, et envisager une approche multirisques pertinente.

La pertinence d'une prise en compte saisonnière de l'occurrence d'un phénomène dépend évidemment du phénomène considéré. Pour un séisme, le phénomène peut survenir tous les jours soit 365 sous périodes (jours) alors que, pour une avalanche de neige, on peut considérer, par exemple, que le phénomène ne va survenir que pendant les mois de décembre, janvier, février, mars et avril soit 151 jours. Le mode opératoire est le suivant. Sur une base moyenne annuelle, la probabilité moyenne journalière d'avoir une avalanche est égale à $P_{\text{journalière}}=P_{\text{annuelle}}/365$. Si on considère maintenant la saison d'hiver, soit 151 jours correspondant (arbitrairement) aux mois de décembre à avril, la probabilité journalière devient $P_{\text{journalièreSaison}}=P_{\text{annuelle}}/151$. La probabilité mensuelle sur les 5 mois de saison d'avalanche sera, quant à elle, égale à $P_{\text{mensuelleSaison}}=P_{\text{annuelle}}/5$. On voit ici qu'on a donc augmenté la probabilité d'occurrence sur les jours d'hiver et annulé cette probabilité sur les jours d'été. Pour un événement centennal, la probabilité journalière d'avoir le maximum associé à une probabilité annuelle de 0.01 est obtenue en divisant 0.01 par le nombre de jours pendant lequel le phénomène considéré est susceptible de se produire. Dans le premier cas, la probabilité journalière (d'avoir le maximum d'intensité associé à la période de retour 100 ans) sera $0.01/365$. Dans le cas de l'avalanche, elle sera de $0.01/151$

⁴ Voir Tacnet et al., 2025. ESREL 2025 Conference proceedings.

⁵ Tacnet, J.-M., Dezert, J., Carlados, S., Berenguer, C., 2025 Improvement of Mountain Natural Risks Analysis: Assessment of Reach, Seasonal Exposure and Presence Probabilities. Proceedings of the 35th European Safety and Reliability Conference (ESREL2025) and the 33rd Society for Risk Analysis Europe Conference (SRA-E 2025), 15 - 19 June 2025, Stavanger, Norway <https://rpsonline.com.sg/proceedings/esrel-sra-e2025/html/ESREL-SRA-E2025-P8986.html>

Calcul de la probabilité (moyenne) pendant la période d'occurrence saisonnière

Ex: **Avalanche fréquente** p (freqEvtProba): **0.1**

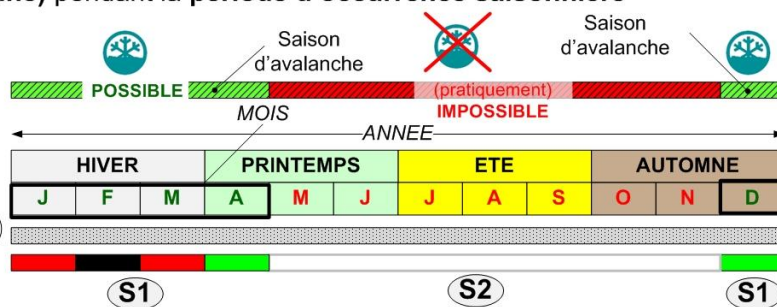
correspond à la probabilité moyenne annuelle maximale

nombre de sous-périodes (nombre de mois d'occurrence du phénomène) : $n = 5$

Probabilité saisonnière mensuelle moyenne :
 $\text{freqEvtProba} / \text{seasonMonthsNumber} = 0.1/5 = 0.02$ (Y)

nombre de sous-périodes (nombre de jours d'occurrence du phénomène) : $n = 151$

Probabilité saisonnière journalière moyenne :
 $\text{freqEvtProba} / \text{seasonDayNumber} = 0.1/151 = 6.62 \text{ E-4}$



Avec notations conformes aux feuilles de calcul

Figure 4 : Principe du calcul simplifié de la probabilité moyenne mensuelle : la probabilité moyenne mensuelle est obtenue en divisant la probabilité moyenne annuelle par le nombre de sous-périodes (les mois d'occurrence d'avalanches). A noter : les variables font l'objet d'une convention de nommage spécifique.

Le calcul consistant à diviser la probabilité moyenne annuelle par le nombre de sous-périodes est une approximation (Figure 5) discutée et calculée dans (Tacnet et al., 2025). La différence est d'autant faible que le nombre de sous-périodes est élevé. Au-delà de 5 périodes, on montre que la différence entre un calcul rigoureux et l'approximation est acceptable.

Calcul de la probabilité (moyenne) pendant la période d'occurrence saisonnière

Approche simplifiée approximative

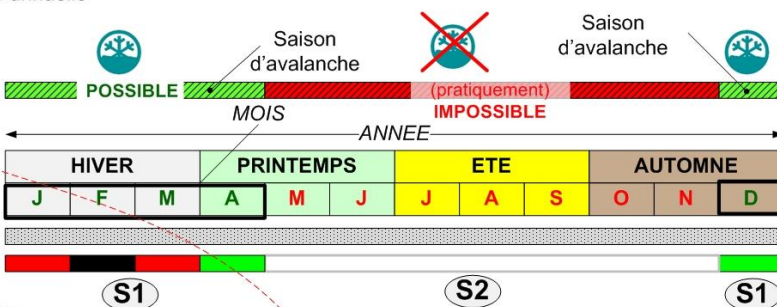
Ex: **Avalanche fréquente** p : **0.1** ← probabilité moyenne annuelle

nombre de sous-périodes (nombre de mois d'occurrence du phénomène) : $n = 5$

Probabilité saisonnière mensuelle moyenne :
 $a = p/n = 0.1/5 = 0.02$

nombre de sous-périodes (nombre de jours d'occurrence du phénomène) : $n = 151$

Probabilité saisonnière journalière moyenne :
 $a = p/n = 0.1/151 = 6.62 \text{ E-4}$



Approche simplifiée exacte

nombre de sous-périodes (nombre de mois d'occurrence du phénomène) : $n = 5$

Probabilité saisonnière mensuelle moyenne : $a = 1 - (1-p)^{(1/n)} = 1 - (1-0.1)^{(1/5)} = 0.02085$

nombre de sous-périodes (nombre de jours d'occurrence du phénomène) : $n = 151$

Probabilité saisonnière mensuelle moyenne : $a = 1 - (1-p)^{(1/n)} = 1 - (1-0.1)^{(1/151)} = 6.98 \text{ E-4}$

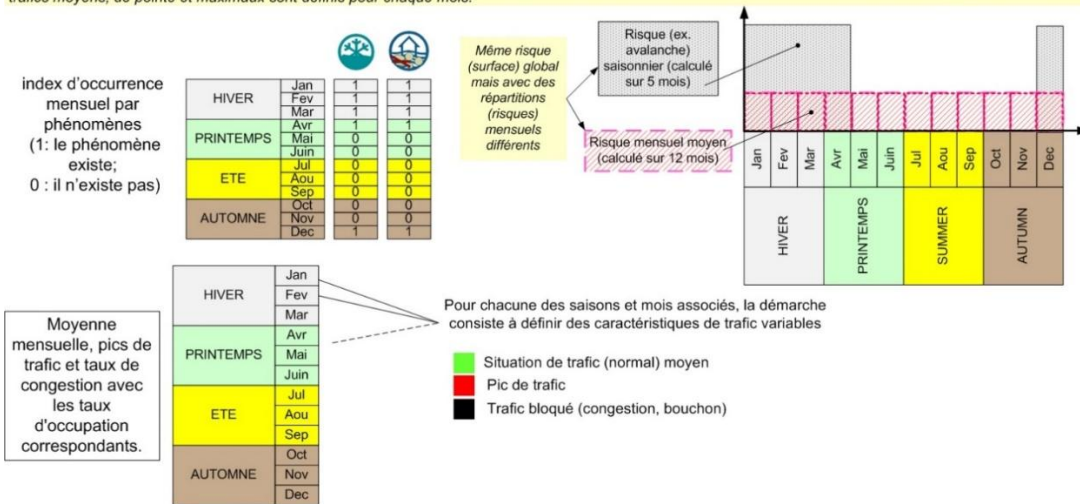


Figure 5 : Le calcul de la probabilité moyenne sur une sous-période peut être fait de manière simplifiée (division probabilité annuelle par le nombre de sous-périodes) ou exact : l'approche simplifiée est suffisante.

En pratique, il peut être proposé de coder, pour chaque phénomène, chaque mois de l'année en fonction de l'occurrence possible ou pas d'un phénomène (Figure 6). Cette présentation peut ainsi être utilisée de manière générique pour tous les phénomènes.

Occurrence de phénomène saisonnière, risque mensuel et annuel

Il existe des différences entre le risque annuel moyen, le risque saisonnier, mensuel, quotidien. Ces différences peuvent provenir soit du danger (aléa), soit de l'exposition (la vulnérabilité ne dépend pas du temps) :
 Pour l'aléa, certains phénomènes peuvent ne se produire que pendant une saison donnée (par exemple, les avalanches de neige en hiver) : un ratio d'occurrence (0/1) est proposé ;
 L'exposition peut également être différente selon les saisons, les mois, les jours ou les heures :
 - Les biens et infrastructures sont toujours présents mais leur taux d'occupation peut varier selon la période : la probabilité de présence est définie pour chaque mois ;
 - Sur les routes, le nombre de véhicules dépend du trafic. Le taux d'occupation peut également être différent (plus de personnes aux heures de pointe). Les trafics moyens, de pointe et maximaux sont définis pour chaque mois.



INRAE
 Technel J.-M./S. Carfadous

Figure 6 : Principes d'identification et de codification des périodes d'occurrence saisonnière de phénomènes multiples

En conclusion et de manière globale, raisonner sur l'année reste valide pour effectuer des comparaisons entre phénomènes, calculer un risque moyen annuel mais ne permet pas de représenter les pics de risque potentiels. Même s'ils sont concentrés sur quelques périodes très précises, des niveaux de risque élevés peuvent impliquer et justifier des mesures de la part des décideurs. Cette réalité est facilement compréhensible mais les calculs usuels ne permettent de la prendre en compte. La méthodologie proposée permet de prendre en compte le caractère saisonnier de l'occurrence des phénomènes. Les sections suivantes considèrent le caractère saisonnier de l'exposition.

3 Calcul des dommages et risques directs saisonniers associés aux enjeux de type bâtiments

Le caractère saisonnier du risque provient d'une part de l'occurrence saisonnière du phénomène s'appliquant à tous les enjeux et d'une exposition matérielle (bâtiments mobiles, caravanes) et humaine variable selon les saisons, le plus souvent en lien avec l'activité touristique avec des période hors, basse, haute et très haute saison (Figure 7).

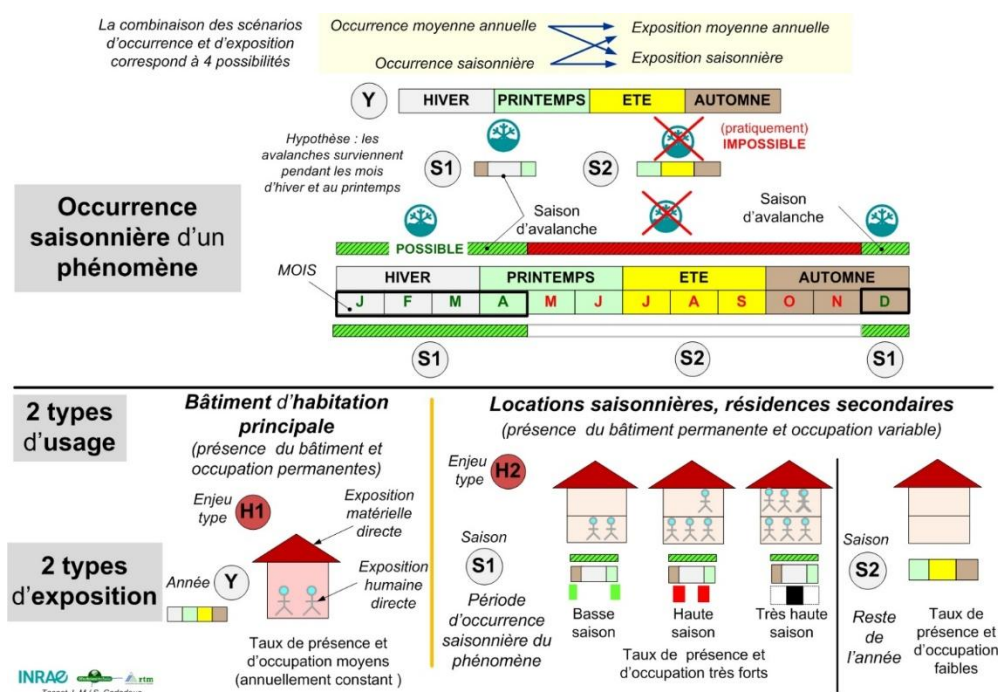


Figure 7 : Principes de prise en compte de la saisonnalité de l'occurrence des phénomènes et de l'exposition pour des enjeux fixes de type habitation

Les sections ci-dessous développent l'approche saisonnière de l'exposition, des dommages et enfin du risque pour des enjeux de type bâtiments.

3.1 Exposition directe saisonnière associée aux enjeux fixes

3.1.1 Exposition matérielle directe saisonnière des bâtiments

Dans le cas des enjeux fixes, la présence de l'enjeu (un bâtiment) est permanente et n'a aucun caractère saisonnier. D'autres bâtiments ou logements sont concernés par une exposition (présence) temporaire comme par exemple des équipements professionnels ou d'habitation mobiles (hôtellerie de plein air) tels que caravanes, food-trucks etc...Le calcul de l'exposition se fait sur la même base que l'exposition humaine en considérant une probabilité de présence variable en fonction des saisons : alors qu'un bâtiment classique a une probabilité de présence égale à 1 (le bâtiment est constamment présent), une caravane présente (occupant un emplacement) pendant 6 mois du printemps à l'automne aura une probabilité de présence moyenne annuelle de 6/12. Un calcul complet prenant en

compte des hypothèses saisonnières d'occurrence du phénomène et d'exposition est proposé ci-dessous (Figure 14).

3.1.2 Exposition humaine directe saisonnière dans les bâtiments

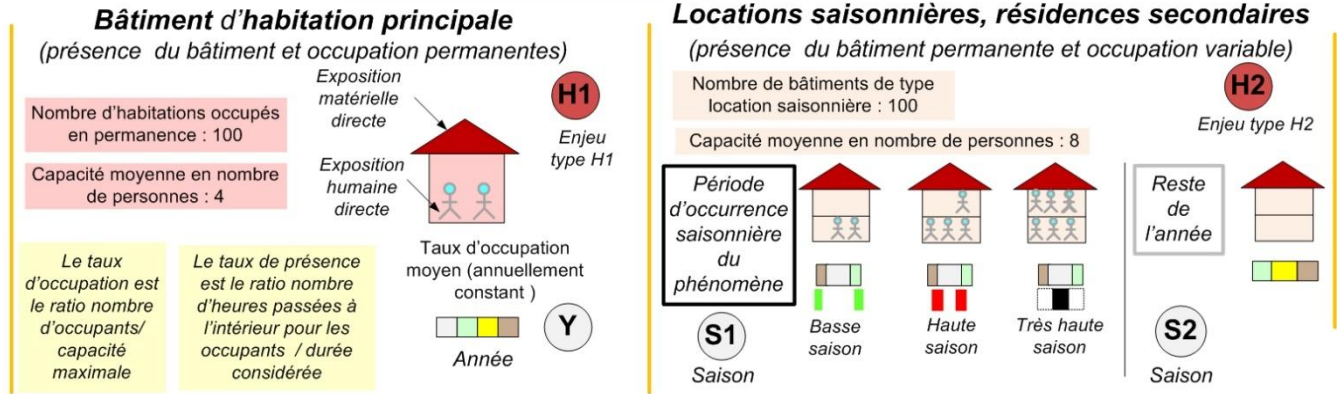
En matière d'exposition, les périodes touristiques peuvent engendrer des pics d'occupation des bâtiments (notamment la fraction du parc immobilier dédiée à la location) et aussi de trafic routier. Des propositions de valeurs guide sont fournies à titre purement indicatif (Tableau 1). Il sera toujours utile de préciser les principes de calcul retenus. Les différents exemples de calcul présentés ci-après ne sont que des exemples et peuvent être basés sur d'autres valeurs.

Type d'enjeu (N2)	Probabilité de présence humaine annuelle moyenne	
	Valeur retenue	Commentaires explicatifs
habitat individuel	0.38	Toutes les semaines de l'année, présence 8 h par jour pendant 5 jours et l'ensemble des 2 jours du weekend : $(5 \times 8 + 2 \times 24) / (7 \times 24) = 0.38$
habitat collectif	0.38	
administrations	0.17	Application de la réglementation des 35 h sur l'année
services publics	0.17	
enseignement	0.17	
culture	0.12	Toutes les semaines de l'année, présence 10 h pendant les 2 jours du weekend
religion	0.12	
sport	0.12	
tourisme	0.19	Mêmes hypothèses que l'habitat permanent mais 6 mois dans l'année
camping	0.33	Présence pendant 4 mois dans l'année (4/12)
santé	1	Présence 24h/24h, toute l'année
secours	1	
sécurité	1	
gestion de crise	1	
industries	0.17	Application de la réglementation des 35 h sur l'année
manufactures	0.17	
entrepôts	0.17	
entreprise	0.17	
commerce	0.17	
services à la personne	0.17	
station de ski	0.33	Présence pendant 4 mois dans l'année

Tableau 1 : Hypothèses guides de probabilité de présence humaine en moyenne annuelle

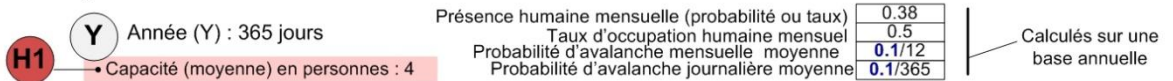
La mise en œuvre de l'approche saisonnière de l'exposition conduit à considérer, par exemple, deux contextes d'exposition correspondant d'une part à un type de bâtiment d'habitation principale permanente (H1) et un type de bâtiment dont l'occupation serait saisonnière (H2) (Figure 8). Le calcul classique de l'exposition consiste à considérer une exposition moyenne annuelle (Y) utilisant les valeurs du Tableau 1. L'approche saisonnière considère, quant à elle, deux saisons (S1 et S2) pour les habitations dont l'occupation est saisonnière en lien avec l'activité touristique.

Deux contextes d'exposition

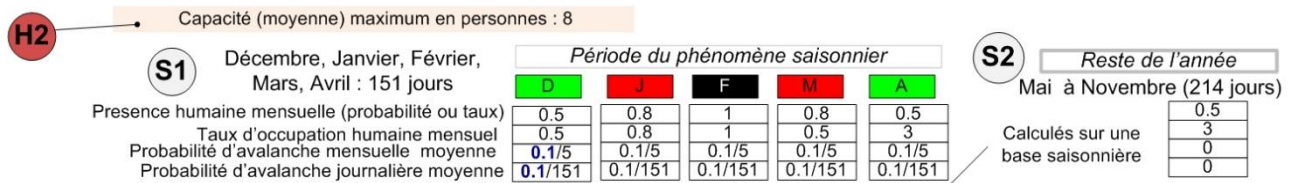


Deux modes de calcul de l'exposition humaine

Exposition moyenne annuelle



Exposition saisonnière



La combinaison des scénarios d'occurrence et d'exposition correspond à 4 possibilités

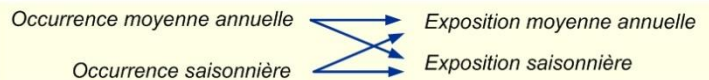


Figure 8 : Principe de calcul de l'exposition pour des bâtiments de type habitation principale ou résidence secondaire

De fortes variations d'occupation saisonnière sont possibles en zone de montagne entre les périodes touristiques dites de haute et basse saison. Cette réalité doit être considérée pour permettre le calcul de l'exposition humaine saisonnière en tant que composant du risque saisonnier. Sur ces bases, deux types de calcul peuvent être proposés :

- Le premier considère les périodes de basse, haute et très haute saison et la période hors saison mais sur une base annuelle (365 jours). Dans ce cas, la probabilité moyenne journalière d'avoir un événement est égale à 0.1/365 tous les jours. Seuls les taux d'occupation et de présence varient entre les périodes de basse, haute, très haute saison et le reste de l'année, qualifié de hors saison ;
- Le second considère les périodes de basse, haute et très haute saison mais en les ramenant à une base saisonnière (calculée sur les mois de Décembre, Janvier, Février, Mars et Avril soit 151 jours pour les avalanches). Les taux d'occupation et de présence varient comme ci-dessus mais la probabilité moyenne journalière d'avoir un événement est calculée sur la durée de la saison d'hiver en non pas sur l'année (Figure 8).

L'année complète (4 saisons) est décomposée en : Les avalanches surviennent pendant les mois d'hiver et printemps

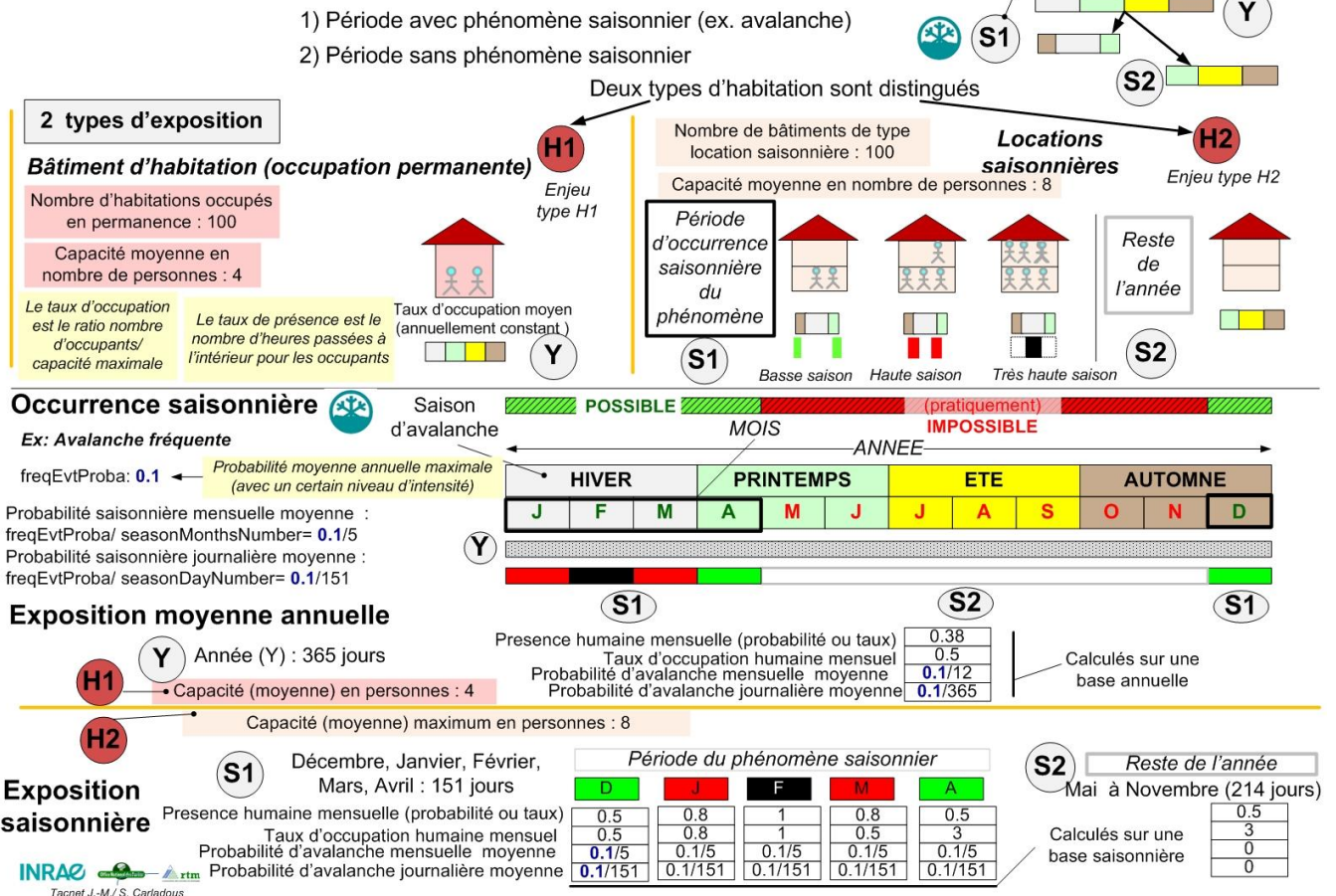


Figure 9 : Synthèse des hypothèses de prise en compte du caractère saisonnier de l'occurrence et de l'exposition

3.2 Dommages directs saisonniers associés aux enjeux fixes

L'étape calcule les dommages directs matériels (DMD) et humains (occupants : DHD) pour un enjeu fixe de type bâtiment en prenant en compte le caractère saisonnier de l'occurrence des phénomènes et de l'occupation humaine (taux de présence, d'occupation variables).

3.2.1 Dommage matériel direct (DMD) saisonnier des bâtiments

Le caractère saisonnier du dommage matériel direct (DMD) pour des bâtiments fixes ne dépendra que de la saisonnalité des phénomènes. Sur la Figure 10, on considère 100 bâtiments de 100 m² valant 2000 €/m² susceptibles d'être atteints par un phénomène de type avalanche fréquente (période de retour 10 ans⁶) avec une intensité considérée comme moyenne (taux d'endommagement de 0.2). Dans l'exemple, la probabilité d'atteinte des bâtiments est de 0.7 et leur probabilité de présence est de 1 (ils sont là en permanence). Le phénomène d'avalanche survient pendant la saison S1 qui s'étend sur 5 mois de Décembre à Avril (151 jours). La saison S2 correspond à la période du reste de l'année pendant laquelle on considère qu'il n'y a pas d'avalanches. La probabilité d'occurrence moyenne mensuelle sur une base saisonnière est donc de 0.1/5 (elle serait de 0.1/12 avec une hypothèse

⁶ Voir la justification théorique dans (Tacnet et al., 2025. Improvement of mountain natural risks analysis: assessment of reach, seasonal exposure and presence probabilities, ESREL 2025 proceedings. (<https://hal.science/hal-05293163v1>))

d'occurrence moyenne mensuelle sur une base annuelle). Pour mémoire, la probabilité d'occurrence moyenne journalière sur une base saisonnière est de 0.1/151.

Ces valeurs d'occurrence sont ensuite multipliées par la valeur des dommages permettent de calculer le risque moyen mensuel saisonnier. Avec une hypothèse (classique) moyenne annuelle, on aurait la même valeur de risque annuelle mais une valeur de risque matériel direct moyenne mensuelle égale à $0.1/12 \times 2800000 = 23333 \text{ €}$ (sous-estimation du risque en saison d'avalanche, surestimation hors saison).

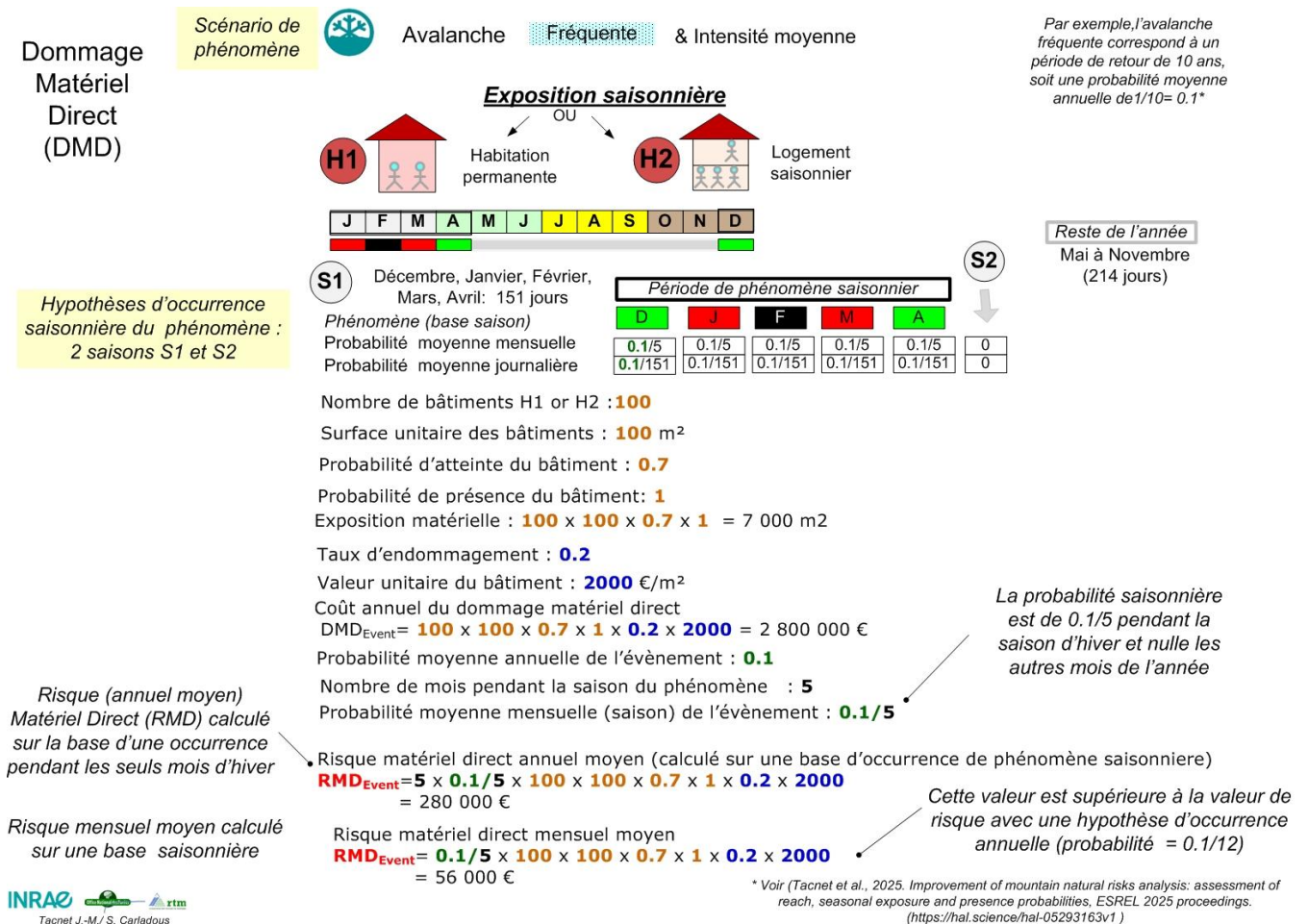


Figure 10 : Calcul du Dommage Matériel Direct (DMD_{Event}) puis du risque (RMD_{Event}) pour un enjeu fixe (type bâtiment) avec une hypothèse d'occurrence saisonnière du phénomène.

3.2.2 Dommage humain direct (DHD) saisonnier dans les bâtiments

Le dommage humain direct (DHD) correspond aux dommages causés aux occupants d'un bâtiment atteint par un phénomène. Pour les bâtiments occupés de manière permanente sans variation liée, par exemple, à l'activité touristique, les taux d'occupation et de présence sont constants tout au long de l'année. Par contre, pour les bâtiments occupés de manière saisonnière, le calcul du dommage humain direct (DHD) prend en compte la variation des taux d'occupation et de présence selon la période.

Sur la Figure 11, on considère, par exemple, un bâtiment susceptible d'être atteint par un phénomène de type avalanche fréquente avec une intensité considérée comme moyenne, chaque bâtiment a une capacité maximum de 8 personnes (Il sera difficile de connaître la capacité individuelle de chacun des bâtiments. Cette valeur peut être considérée comme une valeur moyenne sur la zone considérée). On distingue une période touristique d'hiver allant de Décembre à Avril. De manière purement indicative et à titre d'exemple, les mois de Décembre et d'Avril sont considérés comme correspondant à la basse saison en termes de fréquentation (vert), les mois de Janvier et de

Décembre correspondent à la haute saison (rouge) et le mois de Février correspond au pic de fréquentation (noir). On calcule l'exposition avec les hypothèses suivantes :

Pendant la basse saison, le taux d'occupation est de 0.5 (soit $0.5 \times 8 = 4$ occupants) et le taux de présence est de 0.5 (il y a du monde pendant 50% du temps, $0.5 \times 1 = 0.5$ mois) ;

Pendant la haute saison, le taux d'occupation est de 0.8 (soit $0.8 \times 8 = 6.4$ occupants) et le taux de présence est de 0.8 (il y a du monde pendant 80% du temps, $0.8 \times 1 = 0.8$ mois chaque mois) ;

Pendant le pic de saison, le taux d'occupation est de 1 (soit $1 \times 8 = 8$ occupants) et le taux de présence est de 1 (il y a du monde pendant 100% du temps, $1 \times 1 = 1$ mois chaque mois) ;

Le reste de l'année, le bâtiment est occupé sur la base d'hypothèses d'occupation du quart de la capacité du bâtiment (taux d'occupation = 0.25) et de présence 8 h par jour pendant 5 jours de la semaine et pendant 24h durant les 2 jours de fin de semaine (weekend). La probabilité de présence est donc de $(5 \times 8 + 2 \times 24) / (7 \times 24) = 0.38$

Note : l'occurrence du phénomène peut être considérée comme saisonnière (concentrée sur certains mois de l'année) ou bien moyenne annuelle (probabilité constante sur tous les mois de l'année). Cette prise en compte intervient au moment du calcul du risque (produit du dommage et de la probabilité).

Le nombre de jours correspondant à chaque période est multiplié par la probabilité moyenne journalière saisonnière (0.1/151). Le calcul met en évidence la différence entre le risque humain direct (RHD) en basse saison (0.234 personnes) et en haute saison (0.608 personnes).

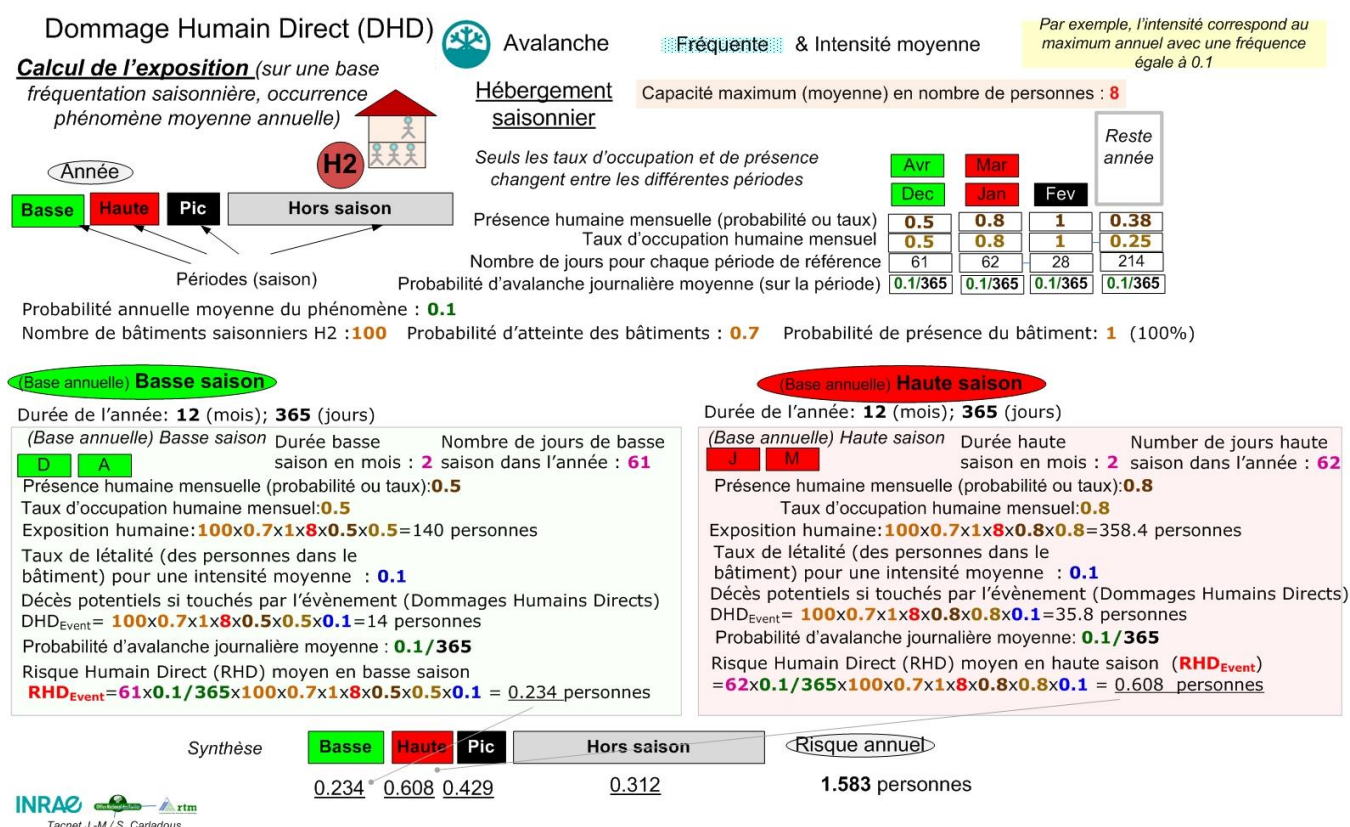


Figure 11 : Calcul du dommage humain direct avec hypothèses de taux d'occupation et de présence saisonniers sans prise en compte du caractère saisonnier des phénomènes (base de calcul moyenne annuelle) : cas de la basse et haute saison (touristique)

Le même calcul peut être reproduit cette fois ci sur les périodes correspondant à la très haute saison (Pic) ou à la basse saison. Le risque humain direct pour la très haute saison est de 0.429 personnes (pour une durée de 28 jours) alors qu'il est de 0.312 personnes pour une durée de 214 jours en basse saison. Le risque humain direct moyen annuel

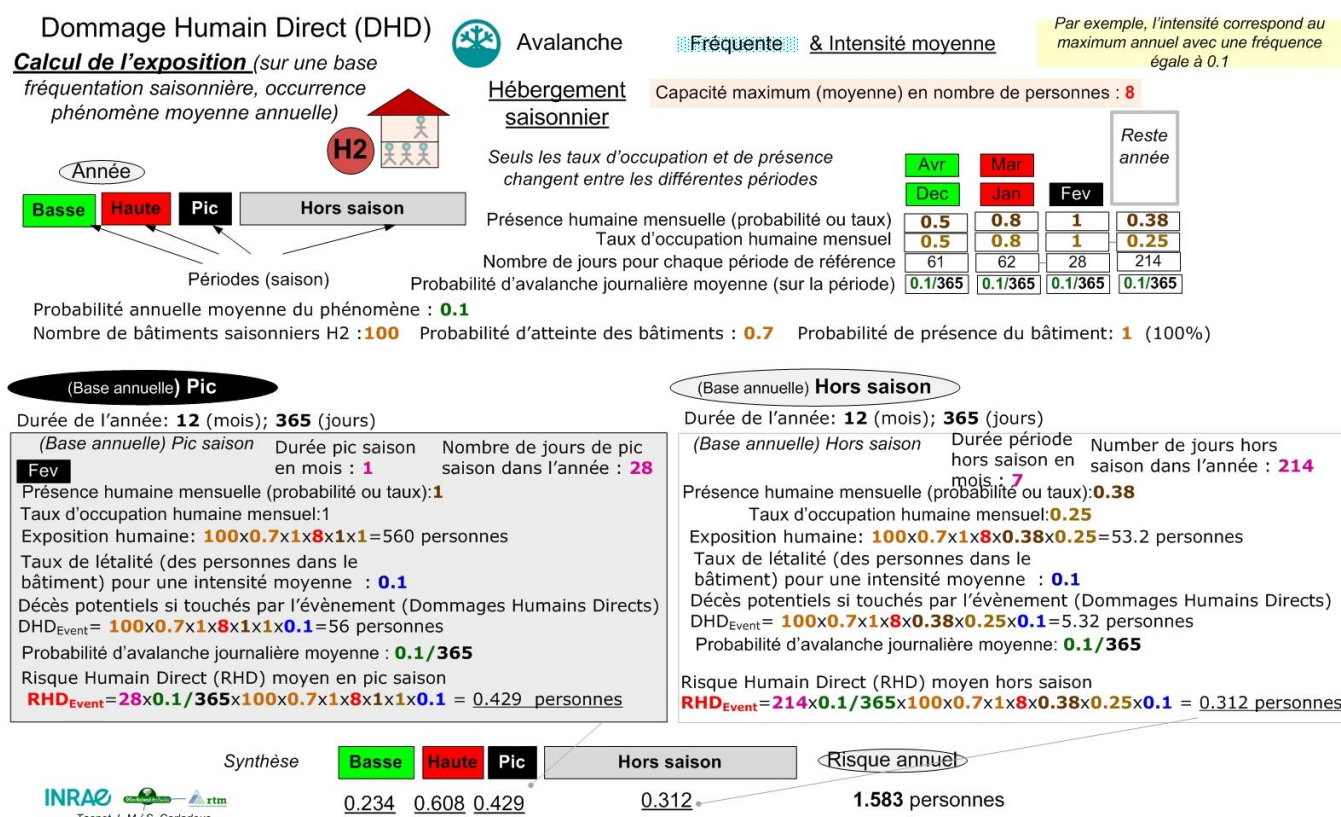


Figure 12 : Calcul du dommege humain direct avec hypothèses de taux d'occupation et de présence saisonniers sans prise en compte du caractère saisonnier des phénomènes (base de calcul moyenne annuelle) : cas du pic de saison et de la période hors saison (touristique)

3.3 Risques directs saisonniers associés aux enjeux fixes

Sur la base des dommege matériels et humains directs pour un enjeu fixe de type bâtiment en prenant en compte le caractère saisonnier de l'occupation humaine (taux de présence, d'occupation variables), on calcule les risques directs matériels (RMD) et humains (occupants RHD) en prenant cette fois-ci en compte le caractère saisonnier de l'occurrence des phénomènes.

3.3.1 Risque matériel direct (RMD) saisonnier des bâtiments

Le risque correspond à une perte probabilisée. Il est calculé à partir du produit du dommege avec la probabilité d'occurrence du dommege. Dans notre contexte, cette probabilité correspond au produit de la probabilité d'occurrence du phénomène et de la probabilité d'atteinte de l'enjeu considéré sachant que le phénomène est survenu⁷. Considérer que la probabilité de dommege correspond à la probabilité d'occurrence est une hypothèse simplificatrice souvent erronée. Par exemple, une crue décennale peut avoir différentes trajectoires sur un cône de déjection, tous les points ne sont pas forcément atteints systématiquement.

⁷ Voir Tacnet, J.-M., Dezert, J., Carladous, S., Berenguer, C., 2025 Improvement of Mountain Natural Risks Analysis: Assessment of Reach, Seasonal Exposure and Presence Probabilities. Proceedings of the 35th European Safety and Reliability Conference (ESREL2025) and the 33rd Society for Risk Analysis Europe Conference (SRA-E 2025), 15 – 19 June 2025, Stavanger, Norway <https://rpsonline.com.sg/proceedings/esrel-sra-e2025/html/ESREL-SRA-E2025-P8986.html>

3.3.2 Risque humain direct (RHD) saisonnier dans les bâtiments

Le caractère saisonnier concerne ici l'occurrence des phénomènes et la fréquentation des enjeux. La Figure 13 propose un exemple de calcul pour un phénomène d'avalanche et quatre périodes touristiques (hors, basse, haute et très haute saison). Dans ce cas, les bâtiments ont une probabilité de présence égale à 1 (ils sont toujours présents).

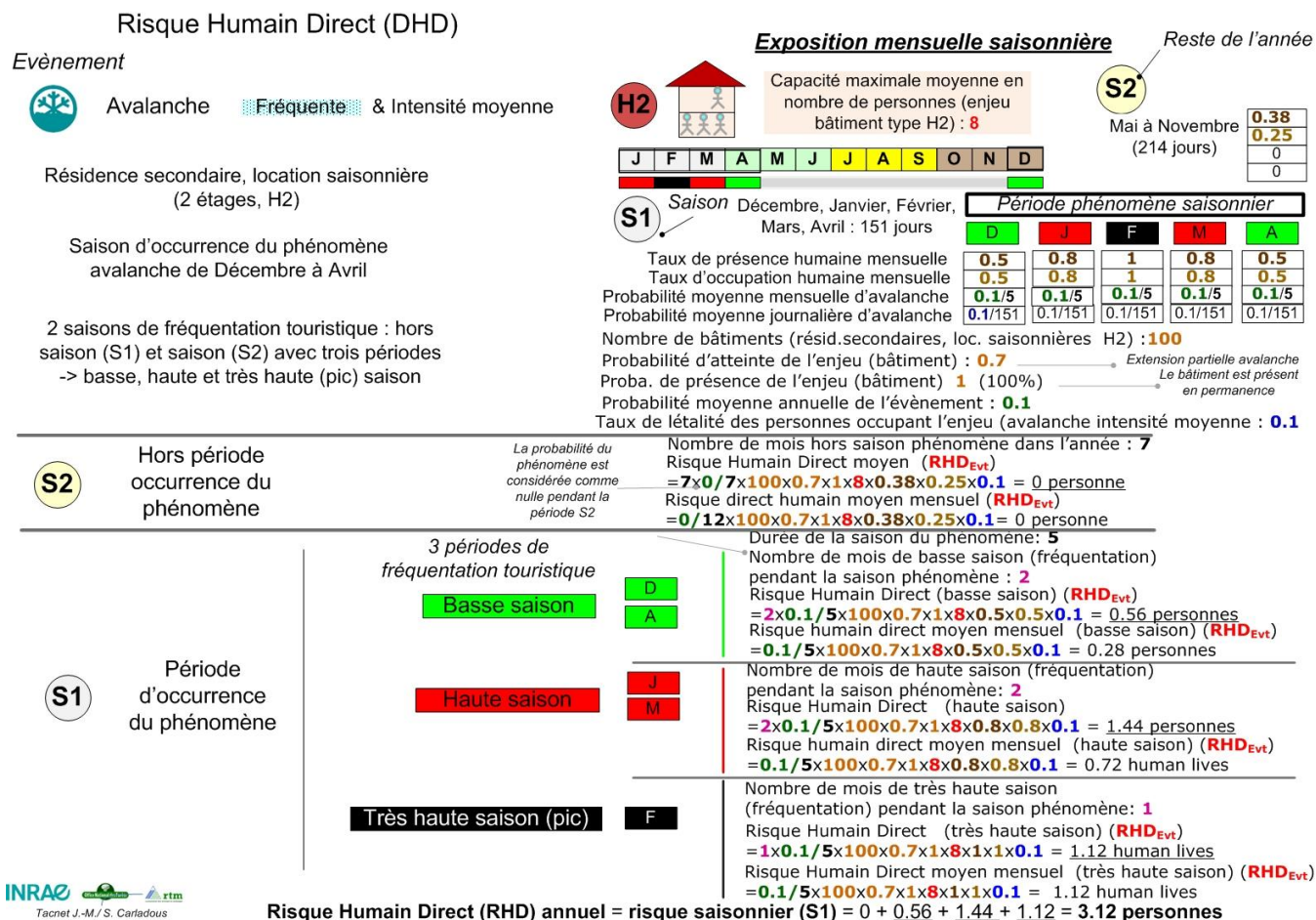


Figure 13 : Calcul du dommage humain direct avec hypothèses saisonnières d'occurrence du phénomène (avalanche en saison d'hiver/printemps) et de fréquentation (taux d'occupation et de présence variables hors, basse, haute et très haute saison)

3.3.3 Risque humain direct (RHD) saisonnier dans les bâtiments à usage temporaire (hôtellerie plein air, camping)

Les activités d'hôtellerie de plein air impliquent l'existence de bâtiments caractérisés à la fois par une présence et une occupation temporaire le tout dans un contexte de phénomène également saisonnier. Il s'agit notamment d'équipements mobiles de type caravanes, camping-car, tentes. La Figure 14 décrit le calcul du risque humain direct sur la base d'une hypothèse saisonnière relative au phénomène, à la présence de l'enjeu et à son occupation :

- Le phénomène crue torrentielle est considéré (de manière purement indicative) comme survenant durant 7 mois de l'année d'Avril à Octobre ;
- L'occupation temporaire est concentrée sur la saison S1 (d'Avril à Octobre) avec des probabilités de présence, de présence et d'occupation humaine variable selon trois périodes correspondant à une basse, haute et très haute saison.

Cette configuration correspond au cas le plus complet d'analyse du risque saisonnier. On remarque ici que non seulement la probabilité d'occupation, de présence humaine mais la probabilité de présence du bâtiment lui-même peuvent varier.

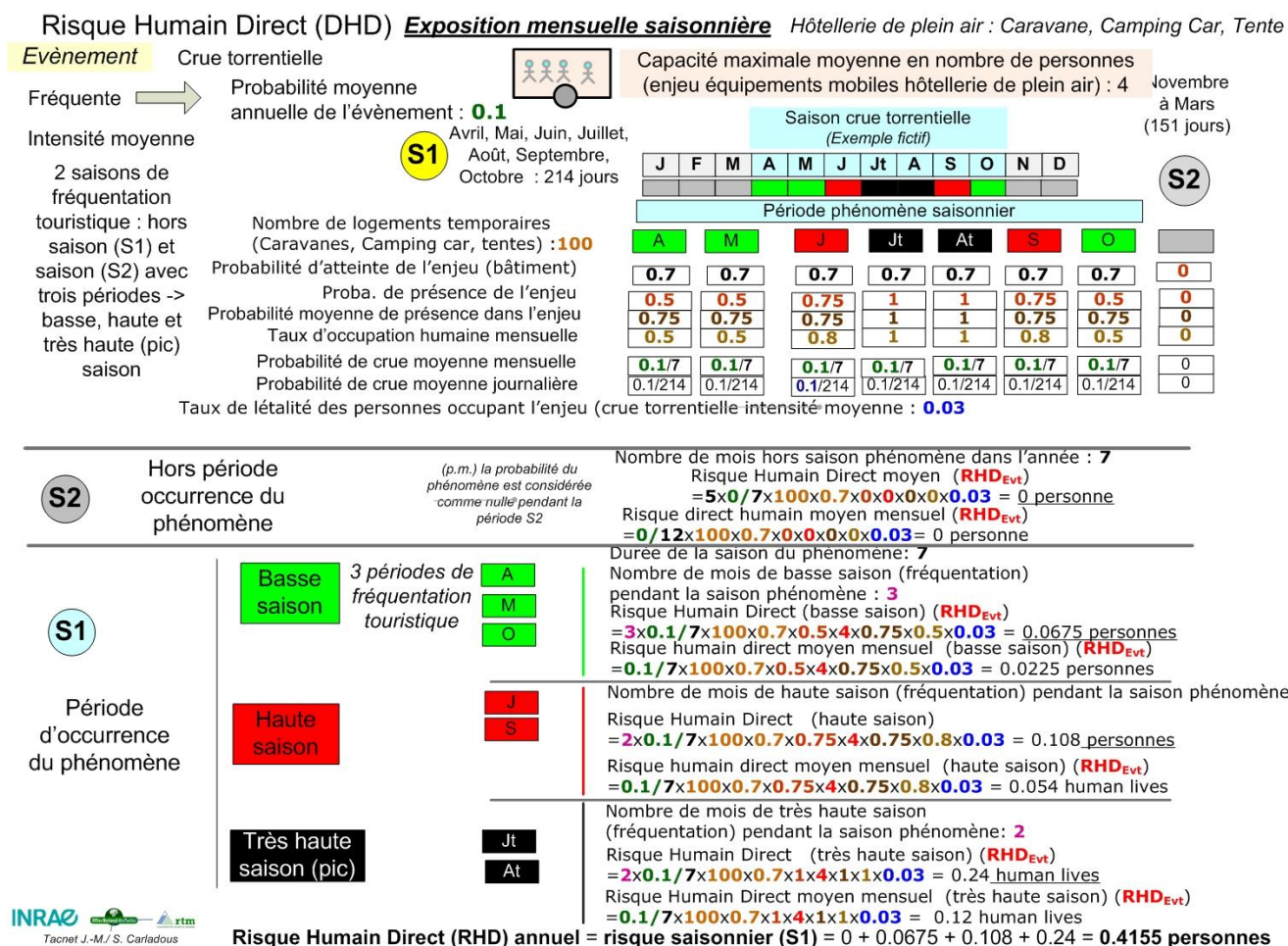


Figure 14 : Calcul du dommage humain direct dans des bâtiments à occupation temporaire (hôtellerie de plein air) avec hypothèses saisonnières d'occurrence du phénomène (crue torrentielle) d'hiver/printemps) et de fréquentation (taux d'occupation et de présence variables hors, basse, haute et très haute saison)

3.4 Synthèse : comparaison des dommages et risques moyens annuels et saisonniers dans des enjeux fixes de type bâtiment

Les analyses de risque restent majoritairement basées sur une approche moyenne annuelle en termes de probabilité d'occurrence des phénomènes que d'exposition. Ces probabilités sont considérées comme constantes tous les jours de l'année.

Dans certaines configurations, certains phénomènes peuvent survenir toute l'année sur des enjeux ayant une exposition constante et le calcul basé sur une hypothèse moyenne est légitime. On peut, par contre, s'interroger, quand il s'agit de considérer des phénomènes saisonniers (avalanches, feux de forêts, certains types de crue) dont la saisonnalité peut être avérée. Certains de ces phénomènes, sont, de plus, associés à un niveau d'exposition très variable d'une saison à l'autre car liés à des activités touristiques. Les risques associés aux divers phénomènes de montagne sont par contre fortement variables au cours de l'année en raison du caractère saisonnier de l'occurrence des phénomènes et de l'exposition des enjeux notamment liée à la fréquentation touristique.

Cette section propose une synthèse comparative des principes entre d'une part le calcul de risque moyen annuel et, d'autre part, le calcul considérant l'occurrence et l'exposition comme saisonniers, c'est-à-dire variable d'une période à l'autre de l'année.

Dans les deux cas, le résultat du calcul de risque annuel sera le même mais le calcul moyen annuel ne mettra pas en évidence les pics de risque journaliers ou mensuels associés à la saisonnalité des phénomènes et de la fréquentation humaine : c'est typiquement le cas des zones et équipements touristiques comme les locations saisonnières, campings, hôtels mais aussi des routes en saison ou hors saison.

3.4.1 Cas des enjeux matériels

Deux calculs différents du risque matériel direct prenant en compte la saisonnalité sont proposés (Figure 15). Ils comparent les dommages matériels pour des enjeux de type bâtiment avec prise en compte uniquement de l'occurrence saisonnière du phénomène

Ils diffèrent l'un de l'autre uniquement au travers de la probabilité du phénomène calculée soit de manière annuelle moyenne ou bien ramenée à la saison du phénomène. L'exposition est considérée comme constante. En l'absence de prise en compte du caractère saisonnier de l'exposition, on observe que le risque matériel direct (RMD) est le même pour le calcul moyen annuel (Y) et le calcul prenant en compte le caractère saisonnier du phénomène (S1 et S2) soit une valeur de 280 000€. Le risque matériel direct moyen annuel est de 23333€ alors que le risque matériel direct saisonnier s'élève à 56000€.

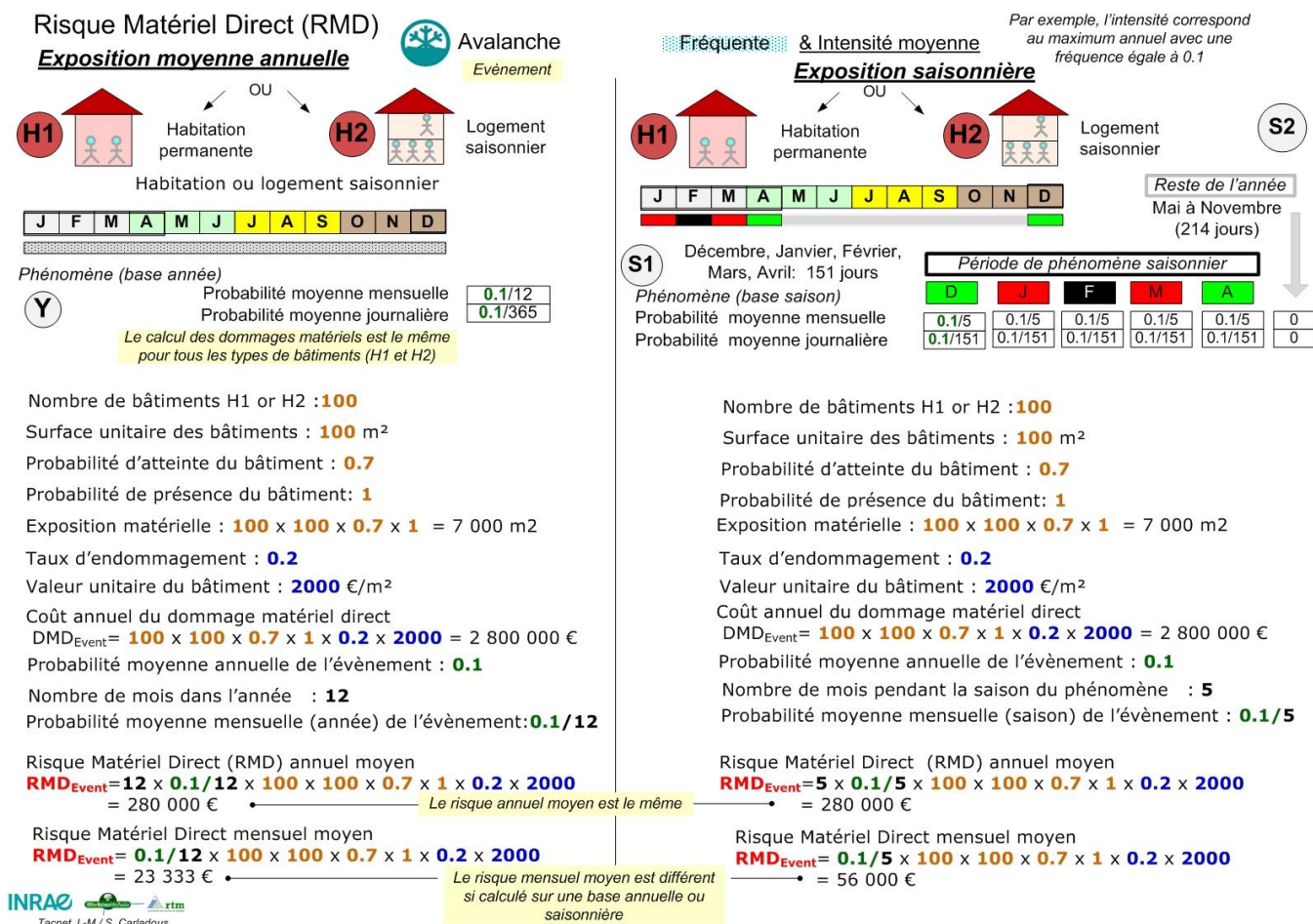


Figure 15 : Comparaison entre le calcul du risque matériel direct avec ou sans prise en compte de l'occurrence saisonnière du phénomène pour un bâtiment.

3.4.2 Cas des enjeux humains

Les dommages et risques humains directs saisonniers sont calculés avec une hypothèse de taux d'occupation et de présence variables (basse saison, haute saison, pic et hors saison) et avec la prise en compte de la saisonnalité d'occurrence des phénomènes (Figure 16) :

- La première configuration (Y, à gauche) correspond à une hypothèse de calcul sur une base d'occurrence du phénomène et d'exposition moyennes annuelles. L'exposition moyenne (Y) est calculée sur la base des valeurs de la configuration S1 et S2 ;
- La seconde configuration (S1 et S2, à droite) correspond à une occurrence saisonnière du phénomène et à une exposition variable selon les saisons.

On observe que le risque humain direct moyen annuel (1.3 personnes) est beaucoup plus faible que le calcul fait en prenant en compte la saisonnalité du phénomène et de l'exposition (3.12 personnes). De même, le risque moyen mensuel sur une base annuelle (Y) est égal à 0.11 personnes, valeurs à comparer avec les risques mensuels hors saison, en basse, haute et très haute saison soit respectivement 0, 0.28, 0.72 et 1.12 personnes. L'approche met clairement en évidence des pics de risque pouvant motiver certaines dispositions particulières de gestion préventive.

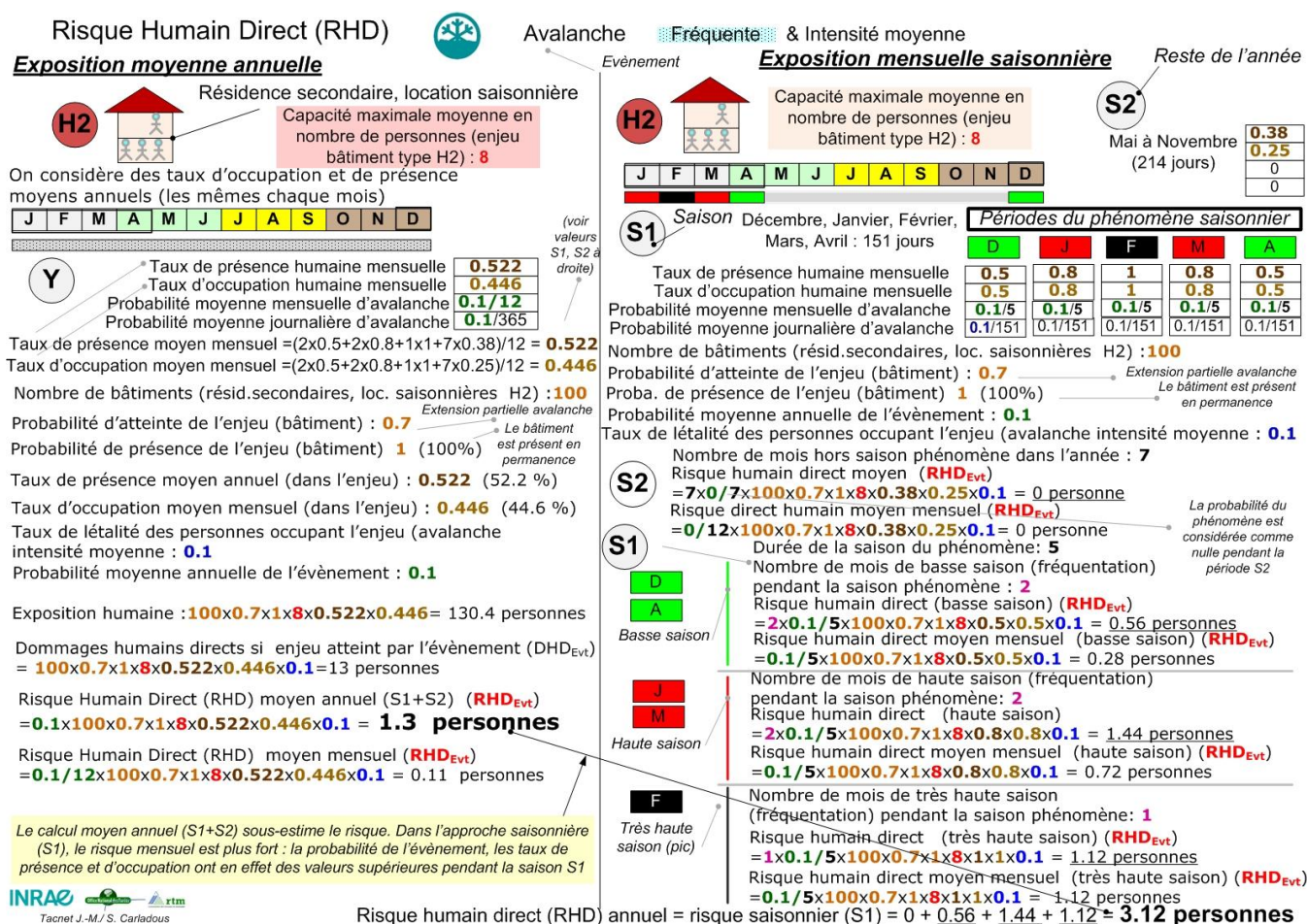


Figure 16 : Comparaison entre le calcul du Risque Humain Direct (RHD) moyen annuel et saisonnier pour les occupants d'un bâtiment

Les figures ci-dessous détaillent les calculs précédents pour diverses périodes d'occupation touristique correspondant globalement à une basse saison (hors saison), moyenne, haute ou très haute saison (pic) en complétant le calcul par une valeur de risque journalier.

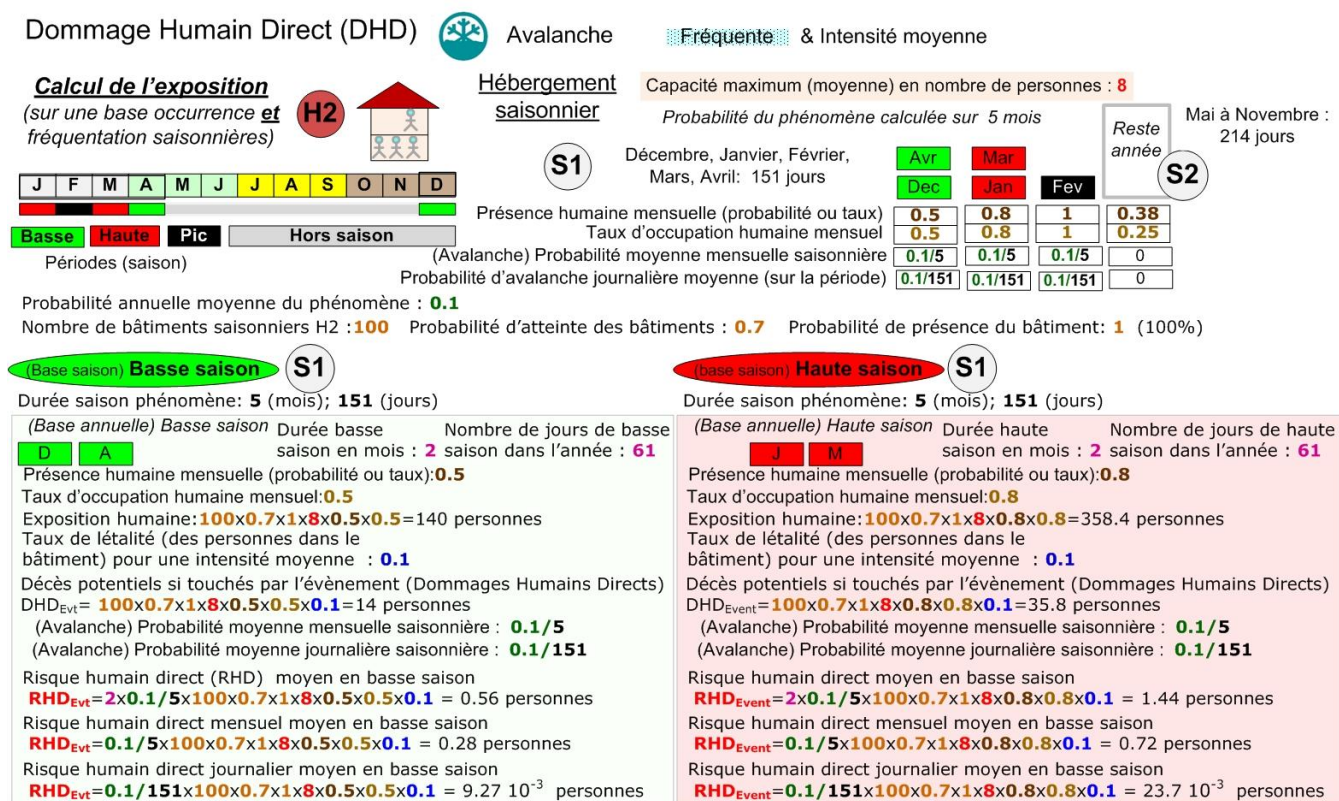


Figure 17 : Calcul du dommage humain direct avec hypothèses de taux d'occupation et de présence saisonnier avec prise en compte du caractère saisonnier des phénomènes : cas de la basse et haute saison (touristique)

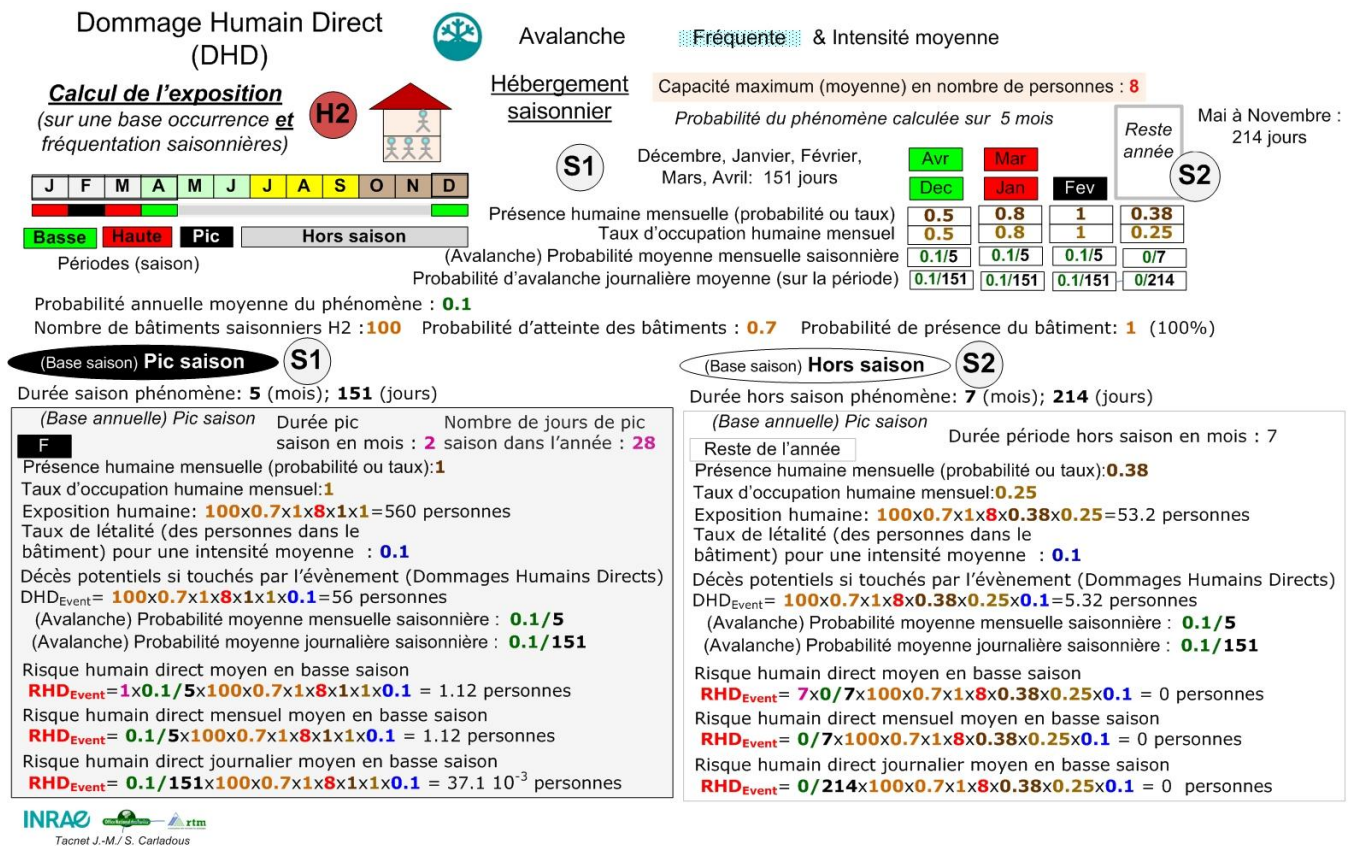


Figure 18 : Calcul du risque humain direct (RHD) avec hypothèses de taux d'occupation et de présence saisonniers avec prise en compte du caractère saisonnier des phénomènes : cas du pic de saison et de la période hors saison (touristique)

Le tableau (Tableau 2) ci-dessous synthétise les différentes valeurs de risques calculées selon diverses configurations d'occurrence et d'exposition saisonnières.

Type Enjeu	Scenario		Probabilité annuelle moyenne	Probabilités saison et hors-saison	Taux occupation et présence constants	Taux occupation et présence saison	Taux occupation et présence basse saison	Taux occupation et présence haute saison	Taux occupation et présence pic saison	Taux occupation et présence hors saison
		Contexte – liens avec figure Résultats (valeur de risque)								
Bâtiment occupation permanente	Risque Matériel Direct (RMD) – avalanche fréquente, intensité moyenne (100 bâtiments)	Figure 15 RMD annuel moyen = 280000€ RMD mensuel moyen (base annuelle) = 23333€	X							
	RMD - avalanche fréquente, intensité moyenne (100 bâtiments)	Figure 15 RMD annuel moyen = 280000€ RMD mensuel moyen (base saisonnière) = 56000€		X						
	Risque Humain Direct (RHD) – inondation fréquente, intensité moyenne (10 bâtiments)	RHD = 1.25 10 ⁻⁴ personnes	X		X					
	RHD - Scénario chute de blocs rare, intensité forte (10 bâtiments)	RHD = 1.25 10 ⁻⁴ personnes	X		X					
Bâtiment occupation saisonnière	RMD - avalanche fréquente, intensité moyenne	Figure 15 RMD annuel moyen = 280000€ RMD mensuel moyen (base annuelle) = 23333€	X							
	RMD - avalanche fréquente, intensité moyenne	Figure 15 RMD annuel moyen = 280000€ RMD mensuel moyen (base saisonnière) = 56000€		X						
	RHD avalanche fréquente, intensité moyenne (capacité 8 p. occupation, présence moyennée) (Cas H2 -Y)	Figure 16 RHD moyen annuel = 1.29 personnes RHD moyen mensuel = 0.11 personnes	X		X					
	RHD avalanche fréquente, intensité moyenne (Cas H2-S1)	Figure 16 RHD hors saison S2 = 0		X			X	X	X	X

4 Calcul des dommages et risques directs saisonniers associés aux enjeux mobiles (véhicules)

Tout comme les enjeux permanents de type habitations (résidences secondaires, camping, établissements recevant du public), les réseaux de transport peuvent être soumis à la conjonction entre des pics de fréquentation et l'occurrence de phénomènes saisonniers.

Cette section concerne l'analyse de risque direct pour des enjeux mobiles, par exemple un véhicule transportant des passagers sur une route pouvant être atteinte par un phénomène saisonnier. Dans ce cas, l'exposition va, elle aussi être considérée comme fortement variable. Les territoires sont en effet soumis à des flux de déplacements changeants dans le temps au cours de l'année et l'espace. La densité de circulation varie en fonction de l'heure, de la journée, de la saison particulièrement dans les zones concernées par une activité touristique. Le nombre de véhicules (trafic) et par conséquent l'exposition matérielle (et donc humaine) vont considérablement augmenter à certaines périodes en lien avec l'augmentation de la fréquentation et du temps passé dans les zones atteintes du fait de la réduction de la vitesse et des possibles congestion de trafic. Les périodes de fréquentation touristiques peuvent être concentrées sur des mois où certains phénomènes vont se produire de manière majoritaire ou exclusive (par exemple, la saison hivernale pendant laquelle les avalanches peuvent survenir).

Cette section calcule les dommages puis les risques matériels directs (respectivement DMD et RMD) aux véhicules et les risques humains directs concernant les passagers (respectivement DHD et RHD) pour un enjeu mobile de type véhicule en prenant en compte le caractère saisonnier de l'occurrence des phénomènes et de l'exposition matérielle et humaine (trafic routier définissant le taux de présence et taux d'occupation des véhicules potentiellement variables).

4.1 Saisonnalité des phénomènes et de l'exposition pour les routes

On peut donc considérer que le risque lié aux avalanches est complètement saisonnier. L'exposition journalière va atteindre des valeurs de pic lors d'un jour de chassé-croisé en période de vacances scolaires. Une avalanche qui survient ces jours précis n'aura pas les mêmes conséquences qu'un jour de semaine en basse saison.

Si on effectue un calcul de risque moyen annuel comme précédemment, les résultats permettront de comparer globalement les phénomènes entre eux mais pas forcément de choisir des stratégies de gestion et de réduction des risques adaptées à l'existence de ces pics de fréquentation. L'objectif d'une analyse saisonnière est donc de mettre en évidence la vraie valeur des pics de risque durant l'année. Elle nécessite de déterminer d'une part les périodes où les phénomènes sont susceptibles de survenir spécifiquement durant l'année et, d'autre part, de caractériser l'exposition (trafic, vitesse) pour les différentes périodes de fréquentation. Pour effectuer un calcul réaliste saisonnier du risque, il faut donc envisager à la fois le caractère saisonnier de l'occurrence des phénomènes et de l'exposition (Figure 19).

Dans le cas des réseaux de transport, Le risque n'est pas constant : un calcul de risque moyen ne capturera pas les valeurs de pic

Variabilité saisonnière

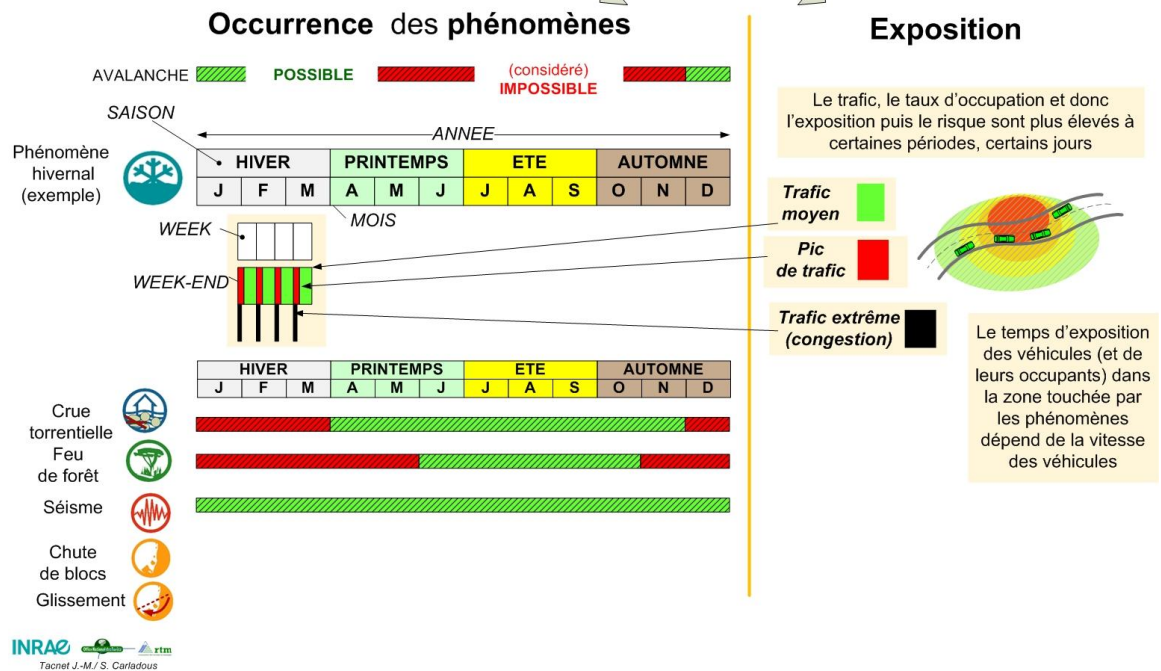


Figure 19 : Exemples d'hypothèses de saisonnalité d'occurrence de phénomène et d'exposition dans le contexte des routes

Pour un phénomène donné, la démarche va consister à définir les probabilités d'atteinte des tronçons de route pour les différentes classes d'intensité de phénomène et les confronter au temps de présence et à l'occupation humaine de véhicules présents dans ces zones. Si le principe d'analyse du risque est classique et bien connu⁸, la prise en compte du caractère saisonnier n'est pas explicitement considérée. Les développements ci-dessous abordent et illustrent de manière détaillée les principes de calcul.

⁸ Voir Econome®, Rheinberger, C. et al., 2009. Dealing with the White Death: Avalanche Risk Management for Traffic Routes, Risk Analysis, October 2009, 29(1):76-94 DOI:10.1111/j.1539-6924.2008.01127.x

4.2 Exposition matérielle directe saisonnière associée aux enjeux mobiles (véhicules)

La probabilité d'atteinte d'une route peut être définie comme le rapport entre le linéaire de route affecté par le phénomène pour un évènement donné et la longueur de la zone qui pourrait être touchée si l'évènement avait eu une autre trajectoire (emprise maximale) (Figure 20).

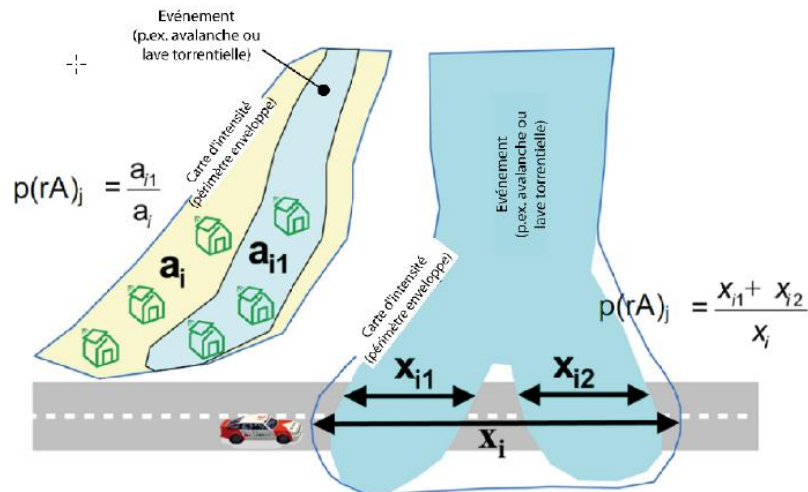


Figure 20 : Probabilité d'atteinte dénommée probabilité d'occurrence spatiale (source approche EconoMe^{®9})

Un exemple de calcul de l'exposition variable des véhicules selon des hypothèses de trafic journalier (moyen fluide, de pointe, congestionné) et différents scénarios (fréquent, occasionnel, rare et exceptionnel) est détaillé ci-dessous. Les hypothèses relatives au trafic sont les suivantes :

On considère un véhicule (dont la longueur est par hypothèse de 7 m) va pouvoir se trouver dans trois situations auxquelles vont être associés des valeurs de trafic, de vitesse et donc de probabilité de présence différentes :

- *Cas 1 - trafic moyen fluide* : le trafic considéré correspond à un trafic journalier moyen (200 véhicules/jour) s'écoulant à une vitesse associée elle aussi moyenne (50 km/h) ;
- *Cas 2 - trafic de pointe* : le trafic considéré correspond à un trafic journalier de pointe (2000 véhicules/jour) s'écoulant à une vitesse associée très faible (5 km/h). Cette situation survient pendant les jours de pointe (35 jours/an) ;
- *Cas 3 - congestion, trafic extrême* : le trafic considéré est nul, les véhicules se touchent et sont bloqués à l'arrêt sur le tronçon susceptible d'être atteint. Cette congestion intervient pendant un certain nombre d'heures (3 h) pendant les jours de pointe.

Ces situations de trafic peuvent être rencontrées au moment où un phénomène (nature indifférente) survient. On considère, par hypothèse, que la longueur (linéaire) de route atteinte est la suivante pour les différents scénarios retenus :

- *Scénario fréquent* : longueur de route atteinte 100 m ;
- *Scénario occasionnel* : longueur de route atteinte 200 m ;
- *Scénario rare* : longueur de route atteinte 300 m ;

⁹ <https://www.slf.ch/fr/projets/econome-outils-devaluation-des-risques-en-ligne/> ; https://econome.ch/eco_work/

- *Scénario exceptionnel* : longueur de route atteinte 1000 m.

Note : On peut considérer une combinaison journalière de situations de pic de trafic et de congestion : par exemple, 21 heures par jour de trafic de pointe et 3 heures de trafic extrême (congestion) donnerait une exposition égale à $(21 \cdot 5 + 3 \cdot 42.8) / 24 = 9.7$ véhicules jours (voir Figure 22).

On observe logiquement que, pour un scénario donné, l'exposition augmente quand on passe d'une hypothèse de trafic moyen à une hypothèse de trafic congestionné. De même, pour une hypothèse de trafic donnée, la longueur de route et donc l'exposition augmente quand on passe d'un scénario fréquent à un scénario exceptionnel.

Les résultats d'exposition matérielle directe sont fournis dans le Tableau 3 ci-dessous.

Trafic	Scénario			
	Fréquent	Occasionnel	Rare	Exceptionnel
Moyen journalier	1,67.10 ⁻²	3,33.10 ⁻²	5.10 ⁻²	1,67.10 ⁻¹
De pointe	1,67	3,35	5,02	16,7
Congestionné (bouchon)	1.78	3.57	5.35	17.81

Tableau 3 : Synthèse des résultats d'exposition saisonnière des véhicules (en nb de véhicules) sur une route exposée à un couloir d'avalanches, selon les différents scénarios d'événements (fréquent, occasionnel, rare et exceptionnel) et de trafic (trafic moyen, trafic de pointe, trafic congestionné)

Les figures ci-dessous analysent chaque configuration de trafic pour les différents scénarios d'évènements. Les figures ci-dessous représentent, quant à elles, les calculs correspondant aux différentes hypothèses de trafic (trafic moyen, de pointe ou congestionné) pour un scénario donné. La Figure 21 correspond au cas d'un scénario fréquent.

Scénario fréquent : calcul de l'exposition matérielle directe journalière sur une route (véhicules)

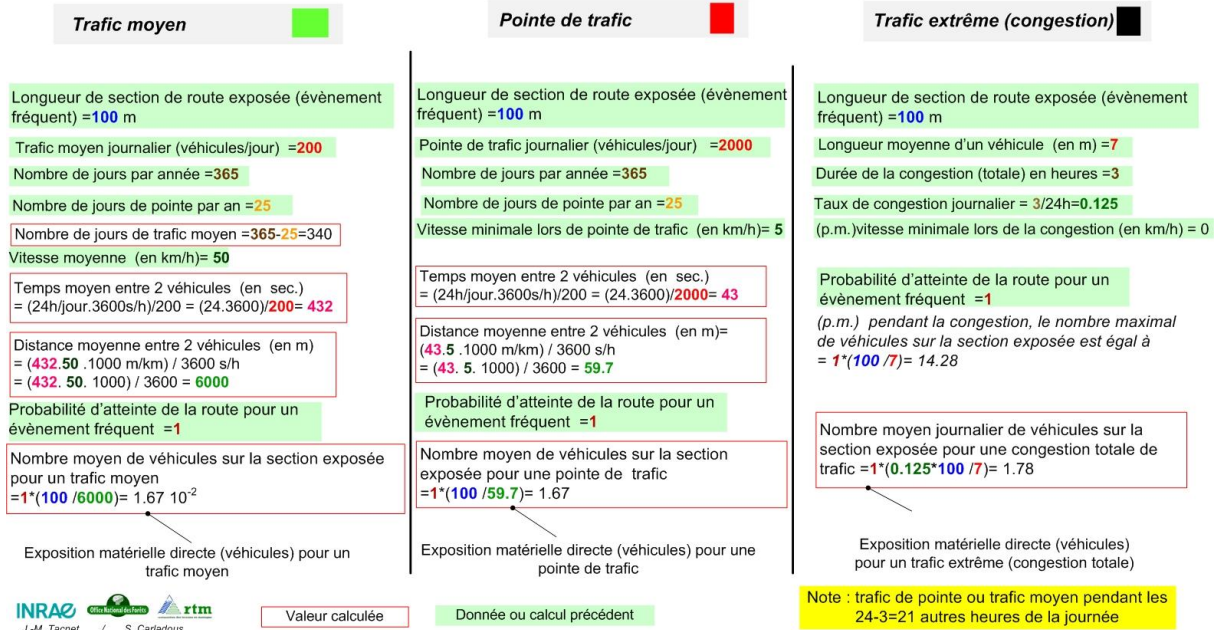


Figure 21 : Calcul de l'exposition matérielle directe dans des véhicules circulant sur une route dans différentes conditions de trafic (moyen, pointe, congestion) pour un scénario fréquent

La Figure 22 correspond au cas d'un scénario rare.

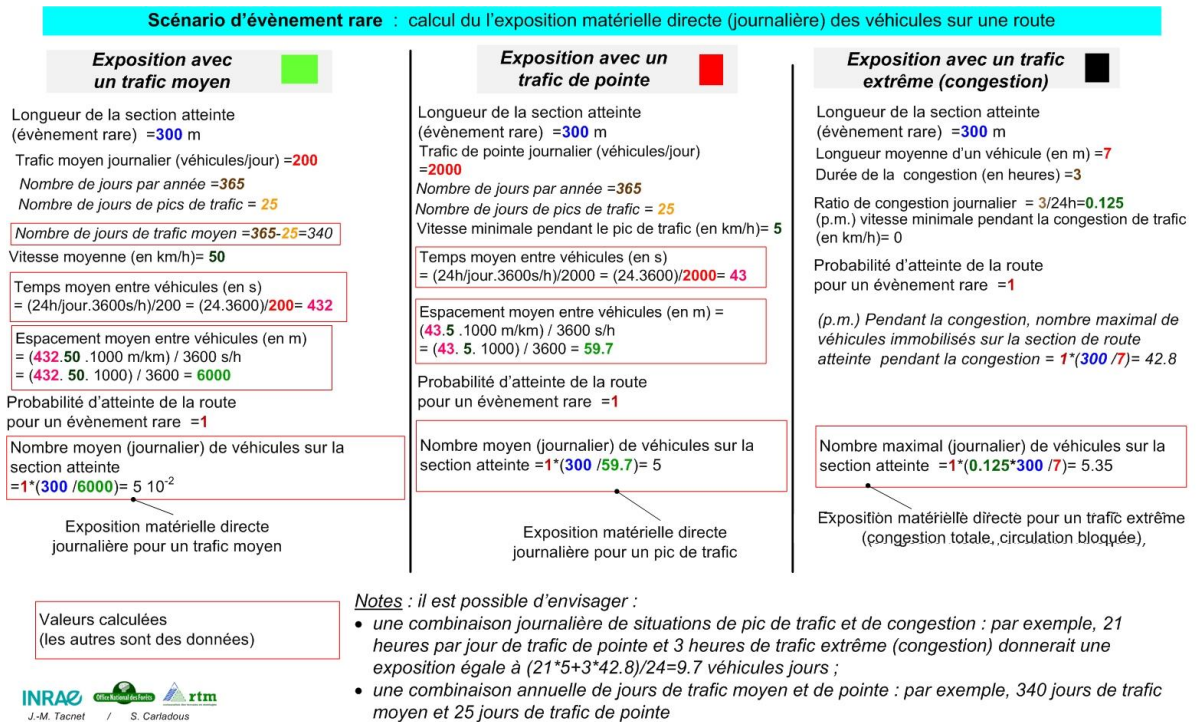


Figure 22 : Calcul de l'exposition matérielle directe dans des véhicules circulant sur une route dans différentes conditions de trafic (moyen, pointe, congestion) pour un scénario rare

4.3 Dommages matériels directs saisonniers associés aux enjeux mobiles (véhicules)

La connaissance de l'exposition matérielle pour les différents scénarios de phénomène permet ensuite de déterminer les dommages matériels sur la base de taux d'endommagement correspondant au phénomène et à son intensité.

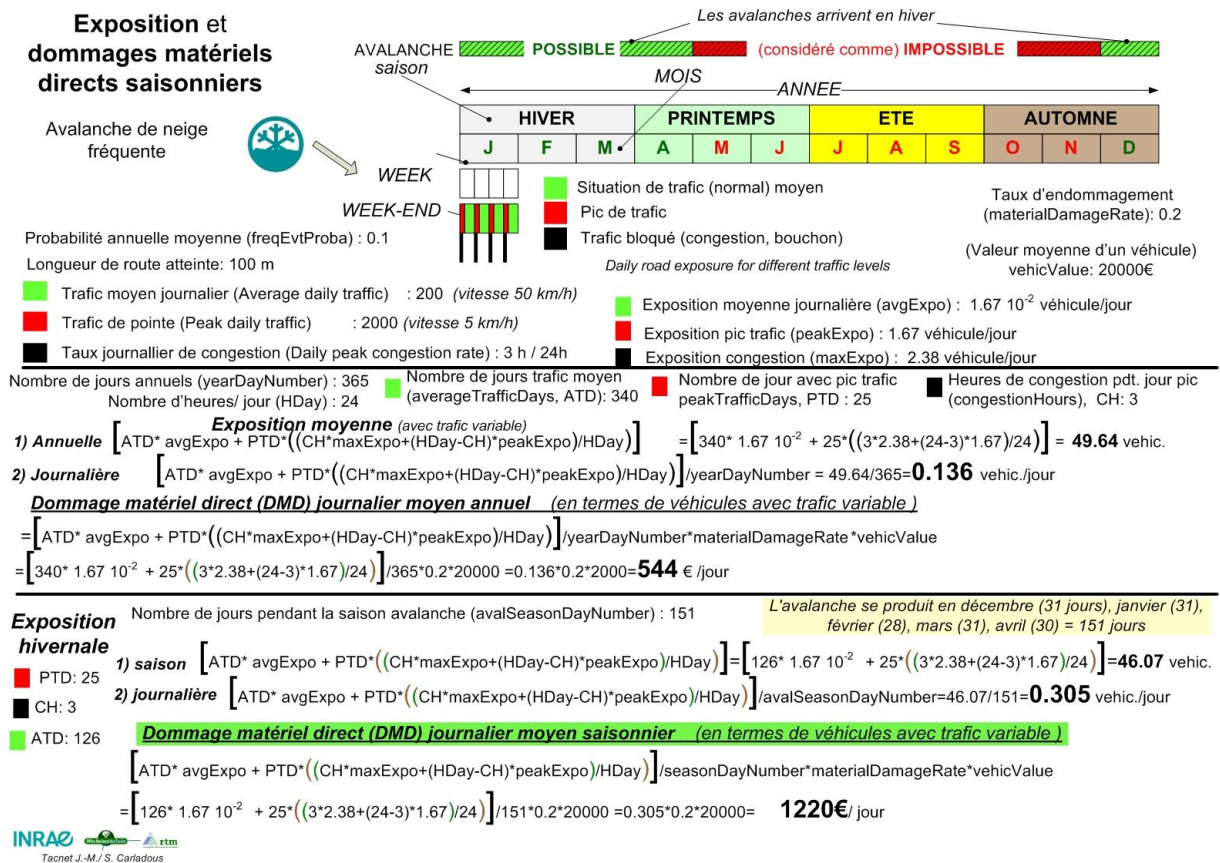


Figure 23 : Exemple de calcul des dommages matériels journaliers moyens sur une base annuelle ou saisonnière en considérant des périodes de trafic moyen, de pics de trafic et de congestion totale, pour le scénario fréquent

Un exemple de calcul est fourni sur la Figure 23 sur la base d'un phénomène d'avalanche survenant pendant 5 mois de l'année et affectant une route dont le trafic peut prendre soit une valeur moyenne, une valeur de pic en cas de haute fréquentation touristique voire de congestion complète en cas de saturation et de bouchon. Cet exemple est basé sur des valeurs de trafic fictives (pouvant être localement plus élevées), une intensité d'événement moyenne et ne concerne potentiellement qu'un seul site d'avalanche sur un tracé. Dans le cas des objets mobiles, la différence avec les (et la complexité par rapport aux) enjeux fixes provient du calcul de l'exposition qui doit considérer une longueur de tronçon atteinte, un flux de véhicules variables et une probabilité de présence dépendant de la vitesse. En tenant compte de cette hypothèse, il est possible de calculer l'exposition journalière (en nombre de véhicules/jour) en exposition moyenne annuelle et en exposition hivernale pour chacun des scénarios, et en tenant compte des hypothèses précédentes sur le trafic. En termes d'exposition et de dommages, les résultats dans l'exemple sont les suivants :

- En considérant les variations de trafic mais en considérant une probabilité annuelle moyenne, on obtient une exposition journalière de 0.136 véhicule/jour ;

- En considérant les mêmes variations de trafic mais en ne considérant l'exposition que sur la période limitée aux 5 mois d'hiver et début de printemps, on obtient une exposition de 0.35 véhicule /jour.

Ce résultat s'explique par le fait que les pics de trafic sont considérés sur une période plus courte. L'approche moyenne annuelle sous-estime l'exposition et le dommage matériel de 1- 0.136/0.35=55%

En termes de risque, les résultats dans l'exemple (Figure 24) sont les suivants :

- En considérant les variations de trafic mais en considérant une probabilité annuelle moyenne, on obtient un risque moyen annuel de 0.149€/jour ;
- En considérant les mêmes variations de trafic mais en ne considérant l'exposition que sur la période limitée aux 5 mois d'hiver et début de printemps, on obtient un risque de 0.80€/jour.

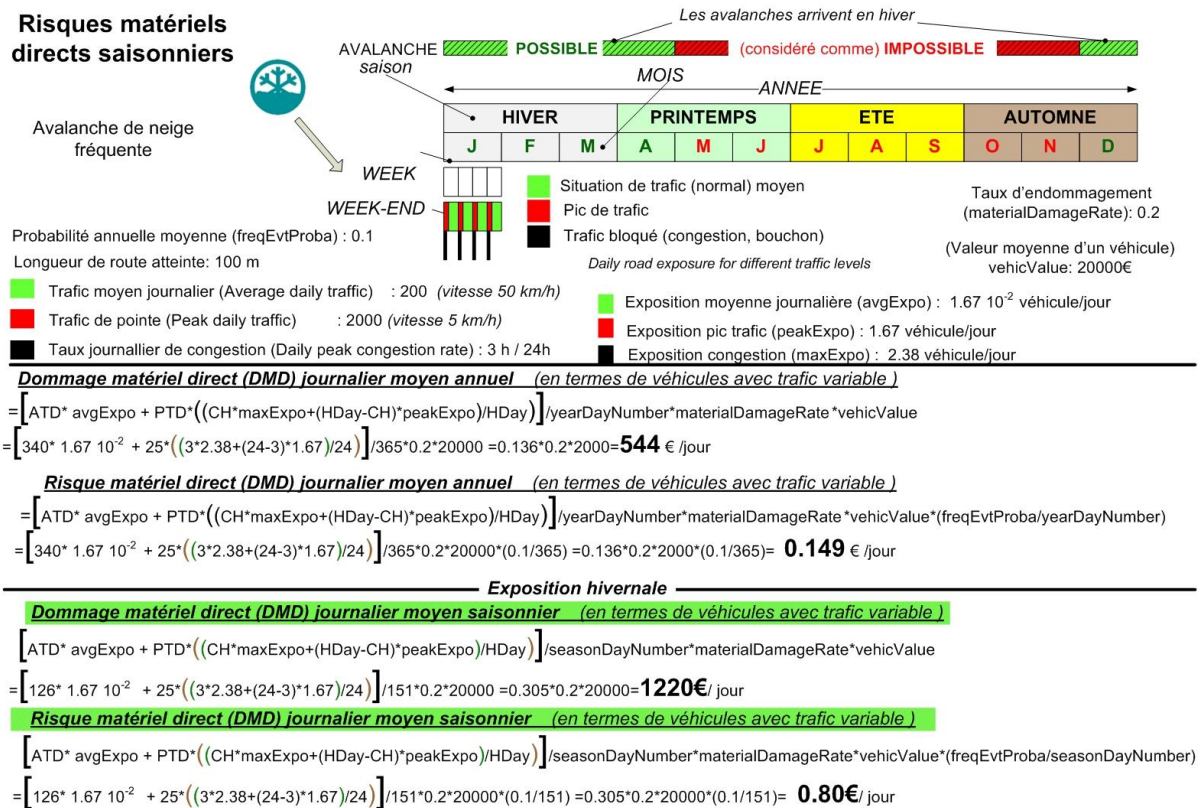


Figure 24 : Exemple de calcul des risques matériels journaliers moyens sur une base annuelle ou saisonnière en considérant des périodes de trafic moyen, de pics de trafic et de congestion totale, pour le scénario fréquent

Ce résultat s'explique par le fait que les pics de trafic sont considérés sur une période plus courte et que la probabilité est concentrée sur uniquement les mois. L'approche moyenne annuelle sous-estime l'exposition et le dommage matériel de 1- 0.149/0.8=81%

Les calculs montrent la différence entre un calcul moyen annuel et un calcul saisonnier. Les valeurs d'exposition, de dommages et de risque paraîtront probablement très faibles au lecteur. Ceci s'explique par le fait que le temps de présence dans la zone atteinte est très faible par opposition à un enjeu présent en permanence. Il peut être intéressant de comparer le risque pendant les périodes de congestion avec le risque moyenné sur l'année ou la saison d'hiver.

La détermination de priorité de gestion entre des enjeux fixes ou mobiles est du ressort des maîtres d'ouvrage. Les calculs précédents doivent sensibiliser le lecteur sur le fait que le calcul de risque et l'interprétation qui est faite dépend des hypothèses. Un calcul de risque moyen annuel est habituel mais il ne permettra pas de capturer les pics de risque saisonniers.

4.4 Exposition, dommages et risques humains saisonniers dans des véhicules

Le calcul de l'exposition humaine est dérivé directement de l'exposition matérielle en exprimée en véhicule/jour en la multipliant par le taux d'occupation des véhicules. Avec une hypothèse de 1,8 pers./véh., on obtient les résultats présentés sur la Figure 25, selon la saisonnalité du trafic.

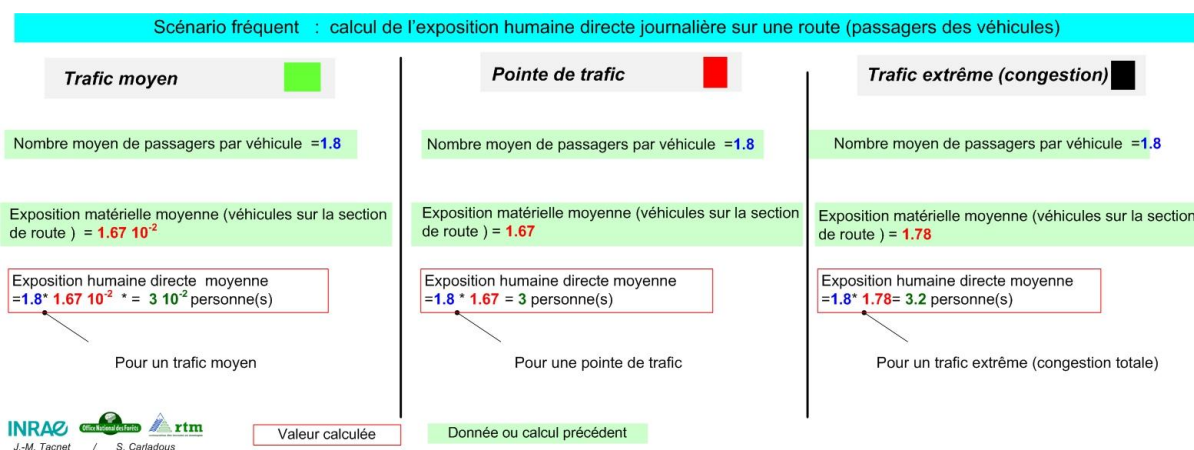


Figure 25 : Exemple de calcul de l'exposition humaine en fonction des conditions de trafic pour un scénario fréquent

Les résultats d'exposition matérielle directe précédemment calculés étaient les suivants.

trafic	Scénario			
	Fréquent	Occasionnel	Rare	Exceptionnel
Moyen journalier	$1,67 \cdot 10^{-2}$	$3,33 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-1}$
De pointe	1,67	3,35	5,02	16,7
Congestionné (bouchon)	1.78	3.57	5.35	17.81

Tableau 4 : Synthèse des résultats d'exposition saisonnière des véhicules (en nb de véhicules) sur une route exposée à un couloir d'avalanches, selon les différents scénarios d'événements (fréquent, occasionnel, rare et exceptionnel) et de trafic (trafic moyen, trafic de pointe, trafic congestionné)

Les résultats en termes d'exposition humaine sont les suivants :

Trafic	Scénario			
	Fréquent	Occasionnel	Rare	Exceptionnel
Moyen journalier	0.03	0.06	0.09	0.30
De pointe	3.01	6.03	9.04	30.06
Congestionné (bouchon)	3.2	6.43	9.63	32.06

Tableau 5 : Synthèse des résultats d'exposition humaine à l'intérieur des véhicules (en nb de personnes) sur une route exposée à un couloir d'avalanches, selon les différents scénarios d'événements (fréquent, occasionnel, rare et exceptionnel) et de trafic (trafic moyen, trafic de pointe, trafic congestionné)

Les calculs de risque humain peuvent être effectués selon les mêmes principes de que ceux effectués pour les risques matériels mais en considérant cette fois-ci un taux de létalité au lieu d'un taux d'endommagement.