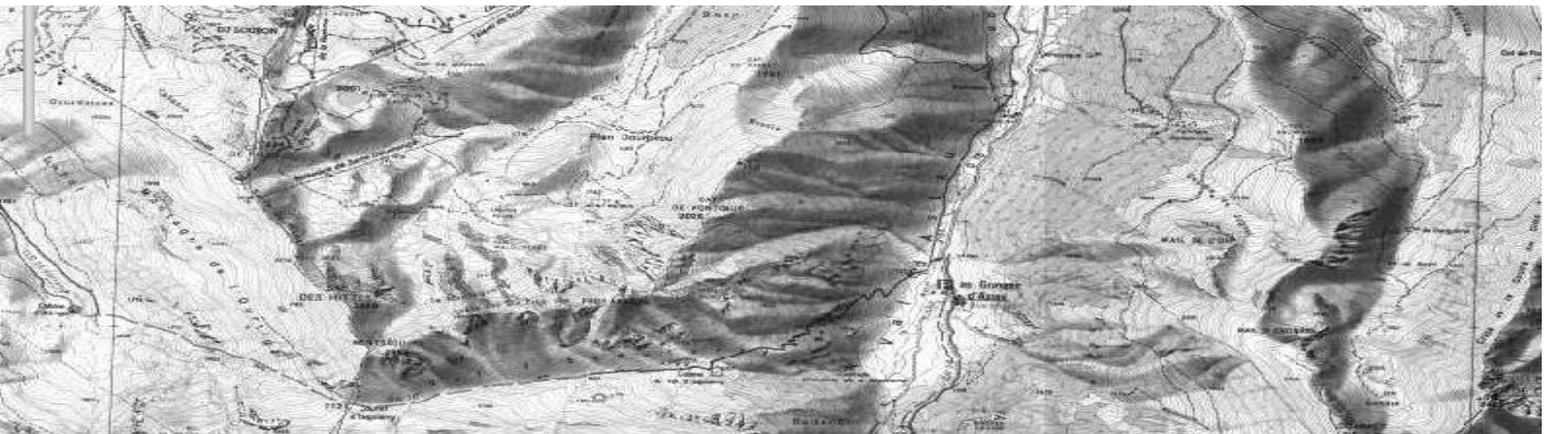


PRÉSENTATION MÉTHODOLOGIQUE

Indicateur
« Evolution surfacique des territoires à fort
risque naturels »
&
Production de
« Cartes d'indice de maîtrise des aléas
par les peuplements forestiers et la
végétation des Pyrénées »



Avec le concours financier / Con el apoyo financiero

Ce document a été réalisé dans le cadre des actions "Forêt" et "Risques Naturels" du projet transfrontalier de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC).

L'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (www.opcc-ctp.org) a été créé par la Communauté de Travail des Pyrénées (www.ctp.org) le 14 janvier 2010 dans le but de mieux suivre et comprendre le phénomène du changement climatique, d'engager des études et réflexions afin d'identifier les actions nécessaires pour en limiter les impacts et s'adapter à ses effets.

Plus largement, la démarche engagée vise à développer la visibilité européenne et internationale des Pyrénées dans les domaines de l'observation et de l'adaptation au changement climatique et à intégrer l'Observatoire dans les réseaux européens qui travaillent également sur ces thématiques.

Pour assurer la mise en œuvre des travaux de l'Observatoire, la CTP a déposé le projet "OPCC" (EFA235/11) au second appel à projets du Programme Opérationnel de Coopération Territoriale Espagne-France-Andorre 2007-2013 (le programme POCTEFA constitue la quatrième génération d'aides communautaires destinées à renforcer l'intégration économique, sociale et environnementale du territoire transfrontalier franco-espagnol-andorran - www.poctefa.eu).

Ce projet transfrontalier regroupe 12 partenaires qui travaillent dans le but d'obtenir un véritable éclairage sur la situation environnementale du Massif Pyrénéen à travers l'étude des conséquences des évolutions climatiques sur la forêt, les risques naturels, la biodiversité et l'eau afin d'en tirer des premières pistes de recommandations opérationnelles pour les activités socio-économiques, la gestion des ressources et l'aménagement du territoire.

FORESPIR et ses membres Office National des Forêts (et son service Restauration des Terrains en Montagne), Centre National de la Propriété Forestières (Délégations Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon et SUF IDF), Sociedad Aragonesa de Gestión Agroambiental (Gouvernement Aragonais), Centre Tecnològic Forestal de Catalunya et Gouvernement Catalan, se sont associés avec le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) pour mener à bien les axes "Forêt" et "Risques Naturels". L'IEA-CENMA (Andorre) participe également à ces actions.

Plus d'informations sur FORESPIR, ses Membres et ses actions : www.forespir.com

Mots clés : Forêts de protection, SIG, cartographie, Indice de maîtrise des aléas.

Rédaction : M. PATUREL (ONF), C. GARNIER (BRGM), B. DAUBET (ONF), S. CHAUVIN (FORESPIR), F. MAUGARD (ONF), F. BERGER (IRSTEA), D. TOE (IRSTEA), B. DESTRIAT (ONF), M. PIPIO (FORESPIR).

Sources : FORESPIR, ONF, BRGM et IRSTEA, Présentation méthodologique / Indicateur « Evolution surfacique des territoires à fort risque naturels » / production des cartes d'indice de maîtrise des aléas (IMA) par les peuplements forestiers et la végétation des Pyrénées ", OPCC, 2014.

SOMMAIRE

Introduction	4
I – PRINCIPES GENERAUX	5
I.1 - Contexte :	6
I.2 - Principe général pour la cartographie du risque naturel	8
II – CARTOGRAPHIE DES ALEAS NATURELS	11
II.1 - Notions employées	12
II.2 - Méthodologie pour la réalisation des cartes d'aléas	13
II.2.1 - Aléas avalancheux	14
II.2.2 - Aléas rocheux	22
II.2.3 - Aléa torrentiel	30
II.2.4 - Aléa "Glissement de terrain"	41
II.3 - Synthèse concernant la réalisation des cartes d'aléas	53
III – CARTOGRAPHIE DES ENJEUX SOCIO-ECONOMIQUES	55
III.1 - Appréciation des enjeux socio-économiques	56
III.2 - Enjeux socio-économiques multiples	56
III.3 - Enjeux indirectement exposés	56
III.4 - Notion d'unité d'aléa-enjeu	58
III.5 - Rendus cartographiques	58
IV – CARTOGRAPHIE DES RISQUES NATURELS	60
IV.1 - Notion de risque naturel	61
IV.1 - Détermination du niveau de risque naturel :	61
IV.2 - Rendu cartographique :	62
V – DEFINITION DU RÔLE ACTUEL DE LA VÉGÉTATION FORESTIÈRE	63
V.1 - Cartographie de la végétation forestière :	64
V.2 - Définir le rôle actuel de la végétation avec l'indice de maîtrise de l'aléa local	65
V.3 - Rendu cartographique :	74
VI - SYNTHÈSE ISSUE DE LA CARTOGRAPHIE	77
<i>TABLE DES ILLUSTRATIONS</i>	<i>80</i>
<i>TABLE DES ANNEXES</i>	<i>82</i>

La sécurité des biens et des personnes, objectif des politiques publiques de prévention des risques naturels, revêt une importance toute particulière en montagne en raison des risques spécifiques à ce milieu (avalanches, crues torrentielles, érosion-ravinement, glissements de terrain, chutes de pierres et de blocs, éboulements).

La montagne pyrénéenne est directement concernée par cette problématique et les forêts qui couvrent la moitié de la surface de ce massif y jouent un rôle important de protection contre divers aléas.

Les forêts du massif pyrénéen ont en effet de multiples fonctions ; multifonctionnalité notamment définie dans le Livre blanc des Forêts Pyrénéennes ¹ :

- Fonctions productives : la valorisation locale des ressources en bois constitue, avec le pastoralisme et le tourisme, un des trois piliers de l'économie pyrénéenne mais celle des produits forestiers non ligneux ne doit pas être négligée ;
- Fonctions de protection : la forêt joue un rôle primordial dans le cycle du carbone et la protection contre l'effet de serre, mais aussi dans le cycle de l'eau, deux préoccupations majeures pour l'avenir de la planète ; elle participe à la régulation des écoulements, particulièrement importante dans un contexte de réchauffement climatique qui prévoit une augmentation des précipitations brutales et des risques d'inondation, elle permet de stabiliser les terrains à forte pente, minimise les risques d'érosion et d'avalanches et participe ainsi à la protection des populations ;
- Fonctions de conservation : au-delà des espèces emblématiques bien connues, la forêt et les espaces naturels pyrénéens constituent des écosystèmes riches en biodiversité et recelant de nombreuses espèces endémiques connues au niveau international ;
- Fonctions sociales : avec la multiplication et la diversification des activités de pleine nature, la fréquentation des forêts pyrénéennes connaît un essor remarquable, ses valeurs récréatives, paysagères et culturelles sont de plus en plus appréciées d'un public varié et toujours plus nombreux. »

Parmi toutes ces fonctions, celles de protection peuvent se décliner ainsi :

- Protection physique par rapport aux enjeux humains : les forêts pyrénéennes jouent un rôle important pour limiter le déclenchement de phénomènes naturels tels que chute de blocs, avalanches ;
- Protection diffuse par rapport à la tenue des sols : l'état boisé minimise les phénomènes d'érosion et assure la régulation du ruissellement (vitesse et répartition), son rôle par rapport à ces phénomènes est d'autant plus important que le terrain est pentu ;
- Protection également diffuse du couvert végétal par son effet drainant sur l'écoulement des eaux (effet drainant et purificateur) : la forêt contribue à la protection de la qualité et de la ressource en eau, cette fonction est assurée aussi bien en terrain pentu qu'en terrain plat – fonction particulièrement importante en terrains karstiques.

Le contexte du changement climatique et le rôle de protection de la forêt en lien avec cette évolution conduit en outre à envisager et à mettre en œuvre une sylviculture adaptée des forêts de montagne, sylviculture qui tient compte du croisement entre niveau d'aléa et niveau d'enjeux par rapport aux risques naturels.

¹ GEIE FORESPIR et al., 2007, projet SILVAPYR 2006, 80p.

I – PRINCIPES GENERAUX

I.1 - Contexte :

Sur la montagne pyrénéenne les forêts couvrent environ 2 millions d'hectares. Leur gestion pérenne nécessite donc la prise en compte de ce rôle de protection contre les risques naturels ; prise en compte qui passe notamment par une bonne connaissance, à l'échelle de chaque secteur, de ces forêts et des interactions entre les aléas naturels et les divers enjeux socio-économiques qui peuvent être menacés.

C'est dans cette optique que les partenaires de l'action "Evolutions Climatiques et Forêt de Montagne" du projet de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique ont collaboré afin :

- de définir une méthodologie permettant de **quantifier le niveau de risque naturel sur des zones précises** afin de répondre à l'indicateur « Evolution surfacique des territoires à fort risque naturels » ;
- **d'identifier les parties de forêt jouant un rôle de protection** ;
- puis, par le croisement entre le niveau de risques/enjeux et la maîtrise actuelle assurée par la végétation forestière vis-à-vis des risques naturels, **d'établir le classement de ces parties de forêt en niveaux de « priorités d'actions » en vue d'une gestion adaptée de ces peuplements.**

Côté français, en ce qui concerne les forêts domaniales RTM², la cartographie du risque naturel (aléa/enjeu) et celle des IMA a été réalisée par l'ONF, sous la conduite de ses services de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) en 2010.

En parallèle de la présente action OPCC, l'ONF est porteur d'un projet de cartographie du risque naturel (aléa/enjeu) et des IMA des forêts des collectivités sur les trois régions françaises d'Aquitaine, de Midi-Pyrénées et de Languedoc-Roussillon.

Les partenaires espagnols et andorrans ont aussi souhaité pouvoir initier la réalisation d'une telle cartographie sur le versant sud des Pyrénées en entamant le travail sur des zones de références sélectionnées sur leurs territoires d'intervention, de même que les Centre Régionaux de la Propriété Forestière pour les forêts privées françaises.

La démarche complémentaire ainsi mise en œuvre consiste à utiliser la méthode nationale RTM utilisée pour la cartographie du risque naturel (aléa/enjeu) et des IMA des divisions domaniales RTM (améliorée grâce aux projets transfrontalier Interreg IIIA France-Suisse « Forêts de protection » et Alcotra n °66 « gestion durable des forêts de montagne à fonction de protection » (2003-2006), projet transfrontalier France-Italie) en :

- la partageant avec les partenaires espagnols et andorrans ;
- l'enrichissant des apports liés au sol et au sous-sol issus des travaux et projets de coopération du BRGM ;
- l'appliquant aux forêts privées présentes sur les zones de références françaises.

Dans le cadre du projet OPCC, la production des cartes du risque naturel (aléa/enjeu) et des d'indices de maîtrise des aléas (IMA) par les peuplements forestiers et la végétation des Pyrénées est donc réalisée à l'échelle des zones de références (cf. document présentant ces zones de référence) et permet notamment :

² Le service Restauration des Terrain en Montagne de l'ONF joue pour le compte de l'Etat et des collectivités locales un rôle d'expertise, de conseil et de maîtrise d'œuvre en matière de travaux spécialisés.

- la détermination et la localisation cartographique des aléas et des enjeux en lien avec les forêts ;
- de renseigner l'indicateur d'impact du Changement Climatique suivant : "Évolution cartographique des territoires à fort risque naturel".
Pour rappel, cet indicateur de suivi des effets du changement climatique a été proposé par l'OPCC suite à un important travail de concertation à l'échelle du massif encadré par un Conseil Scientifique.
- la hiérarchisation par niveaux d'enjeux et estimation, par aléa, des superficies boisées et non boisées ayant un rôle de protection avéré ;
- la définition des secteurs d'actions prioritaires selon la maîtrise actuelle des forêts sur les risques naturels ;

A terme, cette cartographie permettra aux collectivités propriétaires et aux gestionnaires de ces forêts de disposer des outils permettant de mettre en œuvre les règles d'intervention adaptées pour que les peuplements forestiers puissent jouer pleinement leur rôle de protection contre les risques naturels.

Ce travail cartographique a été effectué en lien avec la réalisation du "Guide de gestion des forêts pyrénéennes à enjeu de protection" (adaptation aux Pyrénées du "Guide des Sylvicultures de Montagne des Alpes du Sud françaises").

Ce guide traite de la gestion des forêts hors sylviculture (sans rôle de production) à rôle de protection contre les risques naturels. Le principe est de retenir la solution qui atteint l'objectif de protection à un coût raisonné aux enjeux. Ainsi, les interventions peuvent être envisageables lorsque les trois conditions suivantes sont réunies :

- Enjeu socio-économique identifié,
- Aléa naturel identifié,
- La forêt ne joue pas un rôle de protection optimal contre le risque naturel identifié.

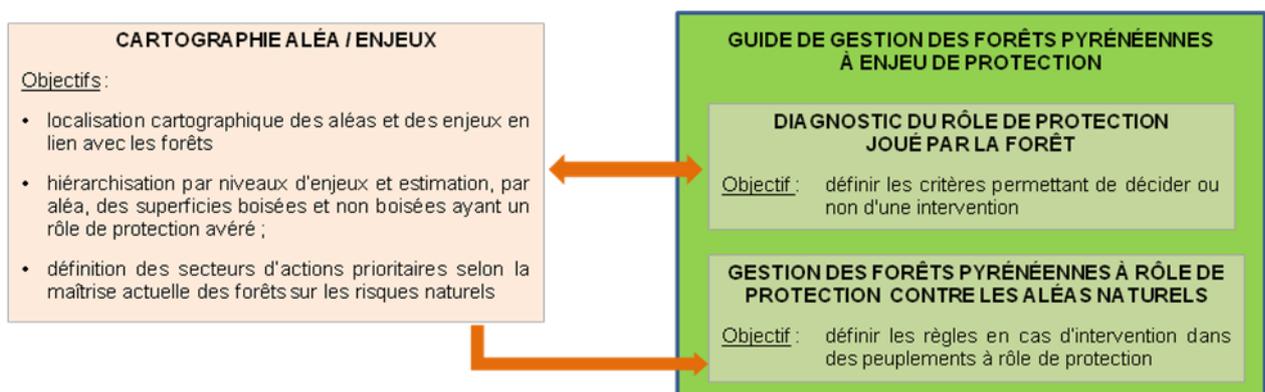


Figure 1 : Lien entre cartographie aléas/enjeux et Guide de gestion des Forêt Pyrénéennes à enjeu de protection

LA CARTOGRAPHIE ALÉA / ENJEUX EST UN DIAGNOSTIC LOCALISÉ ET RETRANSCRIT SOUS SIG DU RÔLE DE PROTECTION JOUÉ PAR LA FORÊT ET LA VEGETATION

A l'issue de la démarche de diagnostic (Cartographie et/ou Diagnostic du rôle de protection joué par la forêt du Guide), le gestionnaire dispose de tous les éléments techniques pour juger de la priorité d'une intervention sur les peuplements forestiers au titre de la protection contre les aléas naturels.

En cas de nécessité, il se reporte alors à la partie 2 du Guide "Gestion des forêts à rôle de protection contre les aléas naturels" où sont déclinées les interventions préconisées.

En résumé, le principe de la démarche générale peut être schématisé de la façon suivante :

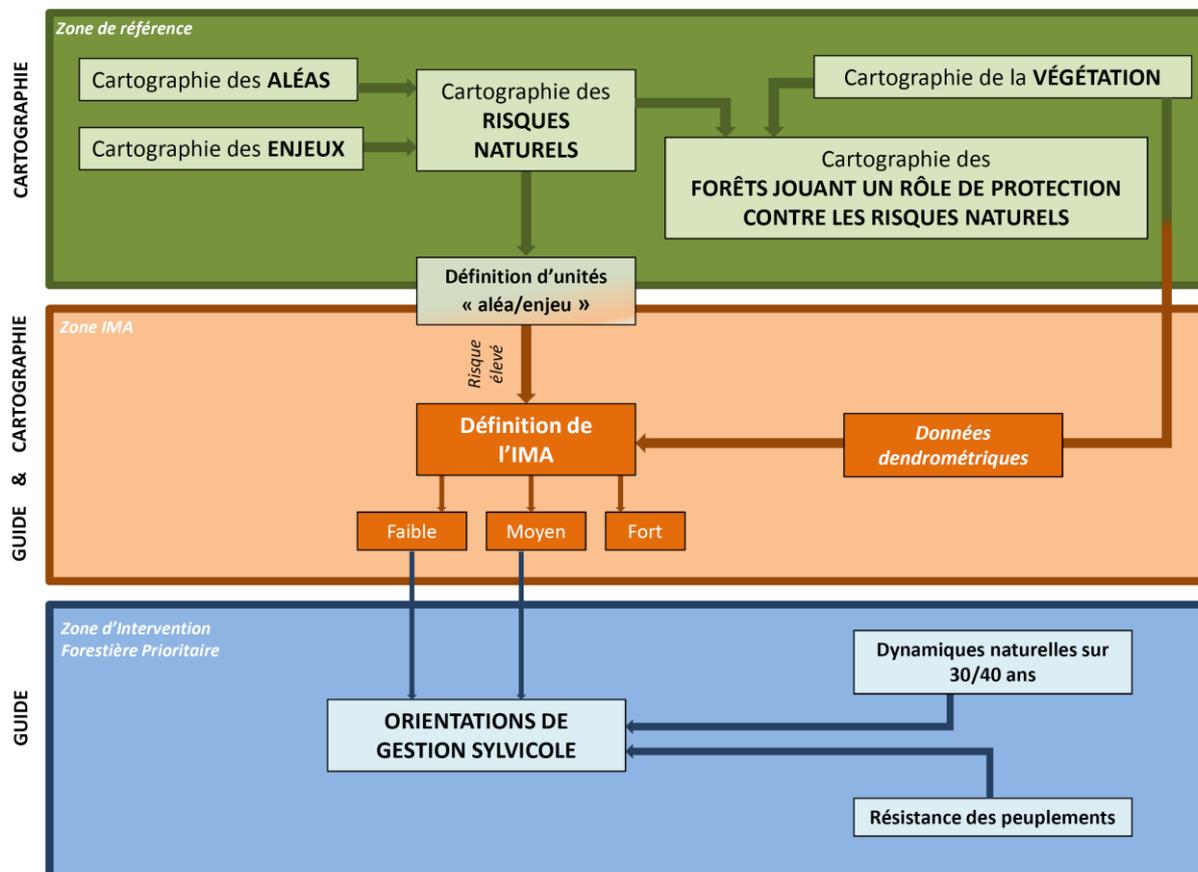


Figure 2 : Démarche générale de l'action

1.2 - Principe général pour la cartographie du risque naturel :

Dans la cartographie (comme d'ailleurs dans la partie 1 du Guide) une première vérification doit d'emblée être effectuée : existe-t-il un risque naturel ?

Détermination de l'existence d'un risque naturel.

L'objectif principal est de donner un outil de base pour une gestion appropriée des peuplements forestiers et assimilés dans leur fonction de protection. Il s'agit d'établir des cartes « d'enjeux socio-économiques » identifiés et des cartes « d'aléas » prévisibles afin de déterminer par croisement de ces deux paramètres **la présence d'un risque naturel**.

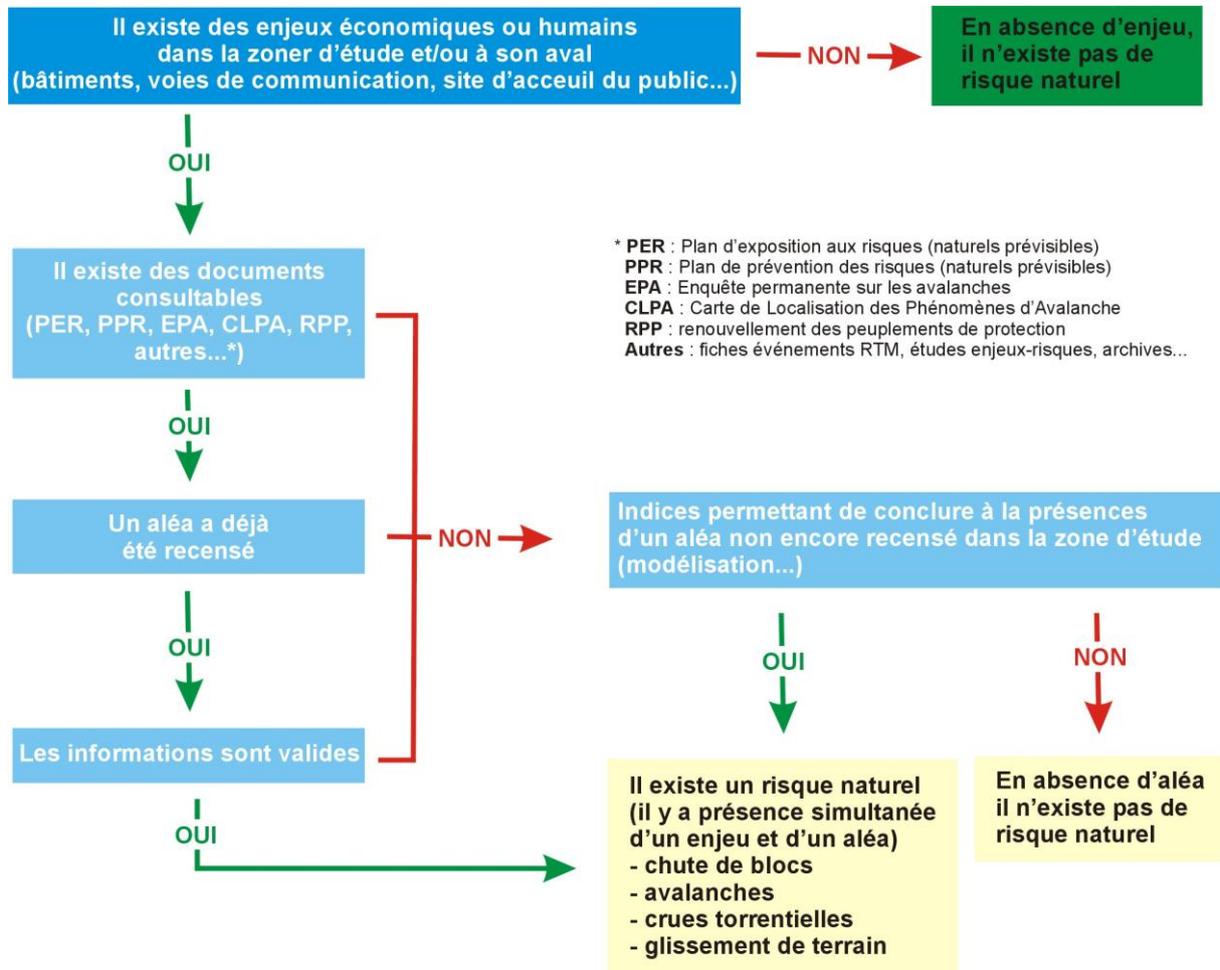


Figure 3 : Détermination de l'existence d'un risque naturel

Une fois l'existence d'un risque naturel déterminée, la démarche consiste à **vérifier si la forêt joue un rôle de protection et dans quelle proportion** : il s'agira, pour chaque type de phénomène considéré, d'évaluer la présomption d'une contribution à la maîtrise de l'aléa par la végétation, boisée ou non boisée.

Pour ce faire, il convient:

- de réaliser une carte d'aléas (cotés) sur les zones concernées (A) ;
- de réaliser une carte d'enjeux (cotés) sur les zones concernées (B) ;
- de réaliser un croisement entre la carte des aléas et la carte des enjeux afin d'aboutir à la définition de cartes du niveau de risque naturel
- d'unité d'aléa-enjeu ; une fois cotée cette unité d'aléa-enjeu déterminera le niveau de risque naturel (B) ;
- de réaliser une carte de la végétation forestière afin de décrire la couverture végétale des différentes zones identifiées (C) ;
- de déterminer la résistance actuelle des peuplements forestiers (C) ;
- de coter le niveau de protection avec l'Indice de Maîtrise de l'aléa (IMA).

La démarche de ce travail peut donc être résumée par le schéma suivant :

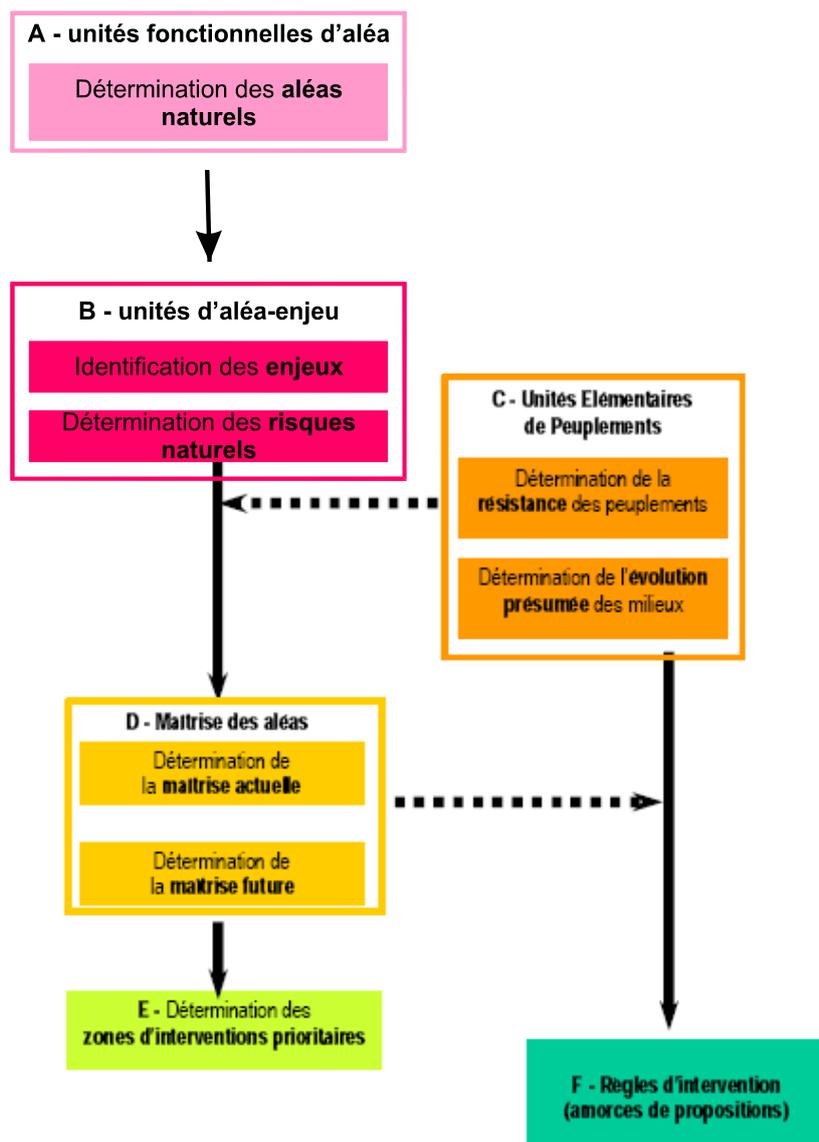


Figure 4 : Démarche proposée pour la cartographie aléa/enjeux

Dans l'état actuel des connaissances sur le Massif des Pyrénées, il n'est pas envisageable de déterminer avec précision l'évolution présumée des milieux, notamment du fait des évolutions climatiques. On peut seulement baser ce travail prospectif sur :

- les échanges techniques interdisciplinaires qui ont pu être menés dans le cadre du projet de l'OPCC ;
- les travaux scientifiques existants ;
- les résultats des analyses des données provenant des réseaux européens de suivi des écosystèmes forestiers (se référer aux résultats de l'axe "Forêt" de l'OPCC) ;

L'action "Evolutions Climatiques et Forêt de Montagne" du projet de l'OPCC permet ainsi de compléter les étapes C, D, E en amorçant les propositions d'intervention de l'étape F.

La finalisation des règles d'intervention fait l'objet de fiches de gestion qui sont incluent dans la partie 2 du « Guide des sylvicultures de montagne pour les Pyrénées ».

II – CARTOGRAPHIE DES ALEAS NATURELS

II.1 - Notions employées :

A - unités fonctionnelles d'aléa

Détermination des aléas naturels

L'objectif est ici de définir et de caractériser un aléa naturel.

Notion d'aléa

L'aléa peut être défini comme « *la probabilité d'occurrence qu'un phénomène de nature et d'intensité donnée se produise en un lieu donné, sur une période considérée* ». L'aléa correspond ainsi à un phénomène naturel susceptible de se produire en un lieu donné. Il s'agit d'une notion complexe caractérisée par une extension spatiale, un temps de retour, une « intensité » plus ou moins forte du phénomène.

L'objectif principal étant la gestion des peuplements dans leur fonction de protection, la méthode utilisée pour caractériser chaque aléa étudié s'attache surtout à déterminer l'extension potentielle et l'intensité du phénomène, la fréquence n'intervenant pas en tant que telle.

On s'intéresse ici aux phénomènes de crue torrentielle, de glissement de terrain, de chute de blocs et d'avalanche. » (Jean Ladier, Freddy Rey, Philippe Dreyfus, 2012 – « *Guide des Sylvicultures de Montagne, Alpes du Sud française* »).

Pour rappel, la notion de période de retour est intrinsèque à la notion d'aléa (cf. définition) mais il est souvent admis de la négliger au profit exclusif de l'intensité (c'est le cas par exemple des recommandations du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie côté Français, et plus particulièrement pour les mouvements de terrain pour lesquels la fréquence est difficile à approcher).

Notion d'unité fonctionnelle d'aléa

L'approche développée et testée lors de l'élaboration du « *Guide des Sylvicultures de Montagne pour les Alpes du Sud françaises* » se traduit notamment par la définition de l'unité fonctionnelle d'aléa.

Cette dernière correspond à une surface de terrain qui couvre les zones de genèse, de manifestation (déclarée ou potentielle) et d'extinction d'un aléa. Ces 3 zones correspondent généralement respectivement aux zones de départ (1), de transit (2) et d'arrêt du phénomène (3). Les unités d'aléa peuvent être de superficies très variables. Leurs limites sont indépendantes des limites des peuplements.

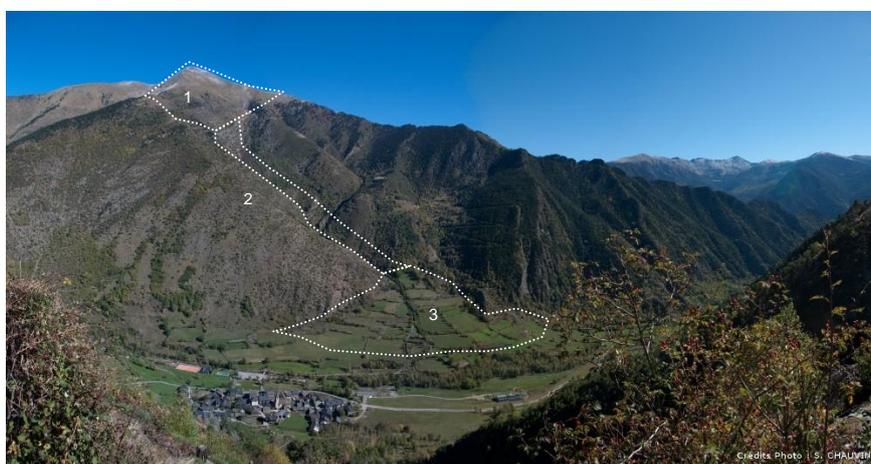


Figure 5 : Exemple d'unité fonctionnelle d'aléa torrentiel

Note d'aléa (note traduisant l'intensité du phénomène naturel)

Chaque unité fonctionnelle d'aléa se voit attribuée une note traduisant l'intensité maximale du phénomène naturel susceptible de se produire au sein de l'unité.

L'extension spatiale et l'intensité des phénomènes naturels prévisibles doivent être estimées en faisant abstraction de la couverture végétale présente ainsi que des éventuels ouvrages de protection, afin de bien traduire les aléas potentiels (*Jean Ladier, Freddy Rey, Philippe Dreyfus, 2012 Guide des Sylvicultures de Montagne, Alpes du Sud française*). Il est en effet usage de caractériser les aléas en faisant abstraction d'éventuels ouvrages de protection présents sur la zone, considérant que la pérennité de ceux-ci ne peut être assurée à long terme.

II.2 – Méthodologie pour la réalisation des cartes d'aléas :

Note sur les aspects généraux liés aux phénomènes avalancheux et rocheux, pour lesquels les cartes d'aléas ont été réalisées par l'IRSTEA.

En 1996, le CEMAGREF a élaboré une première méthodologie de localisation et détermination des Zones d'Interventions Forestières Prioritaires pour les forêts ayant un rôle de protection vis-à-vis des risques naturels. Le principe de cette méthode est basé sur la réalisation de croisements des données cartographiques disponibles en matière de localisation des phénomènes naturels, des enjeux socio-économiques et des peuplements forestiers.

Sa mise en œuvre est optimisée par l'usage d'un Système d'Information Géographique et pour les secteurs d'études disposant déjà de données cartographiques relatives aux risques naturels (EPA, CLPA, PER, PPR,...). Dans la majorité des cas, ces documents cartographiques ne prennent en compte que l'enveloppe maximale de phénomènes déjà observés et donc, à ce titre, considérés comme « actifs ». Bien souvent, la canopée représente un masque aux yeux des observateurs, seule sa disparition soudaine et l'activation de phénomènes jusqu'alors jamais observés (ou plus dans les mémoires) permet à ces mêmes observateurs de prendre conscience et d'apprécier son rôle de protection.

Afin d'éviter une telle situation, l'équipe forêt de montagne du centre IRSTEA (ex CEMAGREF) de Grenoble développe depuis 1996 des outils et modèles permettant à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) de localiser des zones de départ probables d'avalanche sous couvert forestier, de localiser des zones de départ probables de projectiles rocheux, et de simuler la propagation de chutes de pierres et des avalanches sur les versants boisés ou non.

Ces outils fonctionnent dans un environnement SIG qui permet d'optimiser à la fois l'acquisition des données initiales (MNT, occupation du sol, géologie,...) et l'usage des données calculées (carte de localisation des zones de départ potentiel d'avalanche sous couvert forestier, zones de propagation de chutes de pierres et des avalanches).

II.2.1 – Aléas avalancheux

□ *Définition de l'aléa*

Les précipitations neigeuses accumulées sur les versants peuvent générer des phénomènes de reptation lente, de coulées ou d'avalanches dès lors que la pente devient importante (au-delà de 50%-60% soit de 26° à 31°) et que leur état de surface et la dénivellation s'y prêtent.

La topographie des versants joue un rôle important puisqu'on trouve, outre des couloirs bien identifiables et parcourus par de grandes avalanches de divers types, le cas des versants où peuvent se développer des phénomènes moins spectaculaires (reptation, petites coulées) dont il faut tenir compte pour gérer la végétation forestière qu'ils peuvent porter.

On distingue trois zones dans le processus avalancheux (cf. figure 6):

- La zone de départ (1), sur laquelle s'est accumulée une masse neigeuse et où une rupture du manteau neigeux va provoquer la mise en mouvement de cette masse ;
- La zone d'écoulement (2), qui se situe le long d'une pente, sur laquelle l'avalanche transite et se développe ;
- La zone d'arrêt (3), au niveau de laquelle l'avalanche s'arrête et se dépose.



Figure 6 : Illustration du l'unité fonctionnelle d'aléa avalancheux

On distingue généralement 3 types d'avalanches principales :

- L'avalanche de poudreuse (ou aérosol) ;
- L'avalanche de plaque ;
- L'avalanche de neige humide.

Les types de déclenchement sont variés : ils peuvent être spontanés, c'est-à-dire causés par l'évolution du manteau neigeux, ou provoqués c'est-à-dire liés à des causes extérieures au manteau neigeux (humaines ou non).

□ **Méthodologie**

→ **Aspects opérationnels**

ETAPE 1 - Critères de déterminations des zones de départ potentiel d'avalanches

En 1997, le CEMAGREF de Grenoble a développé à partir d'une analyse bibliographique et de phases de tests terrain une méthodologie pour pré-localiser les zones de départ potentiel d'avalanche sous couvert forestier. Le terme potentiel correspond au fait qu'aucune activité n'a été à ce jour observée et répertoriée dans les documents de recensement des avalanches en France (CLPA et EPA). La validation des critères proposés a été réalisée en comparant la carte de localisation des zones vérifiant ces critères avec les CLPA des secteurs tests. Il ressort de ces travaux de comparaison que ces critères sont valides (toutes les enveloppes des CLPA contiennent dans leur partie sommitale des zones vérifiant nos critères).

Les autres zones, non incluses dans une enveloppe d'avalanche de la CLPA sont toutes situées dans des secteurs boisés et de ce fait masquées par la canopée.

Ces critères sont depuis utilisés avec succès en Suisse (dans le cadre du projet Sylvaprotect dont l'objectif est de réaliser une cartographie des forêts de protection à l'échelle du territoire helvétique), en Autriche, dans le land de Bavière en Allemagne et dans les provinces italiennes du Val d' Aoste et du Trentin.

Pour qu'une avalanche puisse se déclencher il faut (Cf. Figure ci-après):

1. Que la pente puisse permettre :

- a. Le mouvement de la masse de neige initiale. Pour cela elle doit être comprise entre 28 et 55°.
- b. La création d'une zone de fragilité au sein du manteau neigeux. C'est dans cette zone qu'aura lieu la fracture initiale. Sur le terrain ces zones sont marquées par une forte rupture de pente dans le profil en long. De plus le profil du terrain doit être convexe ce qui augmente les efforts de traction au sein du manteau neigeux. La différence d'angle entre la pente aval et amont doit être inférieure ou égale à 10°.

2. Que la masse de neige soit suffisante :

- a. Il faut tout d'abord de la neige ! Pour cela il faut que la zone soit au moins à une altitude 1000m. Le modèle prévoit la possibilité de choisir l'altitude en fonction de la localisation du secteur géographique à l'échelle européenne.
- b. La surface de la zone doit permettre à la neige de s'accumuler en quantité suffisante afin que lors de sa mise en mouvement elle puisse donner naissance à une avalanche. La surface de la zone a été fixée à 500 m², 50m de long dans la ligne de plus grande pente pour 10m de large.

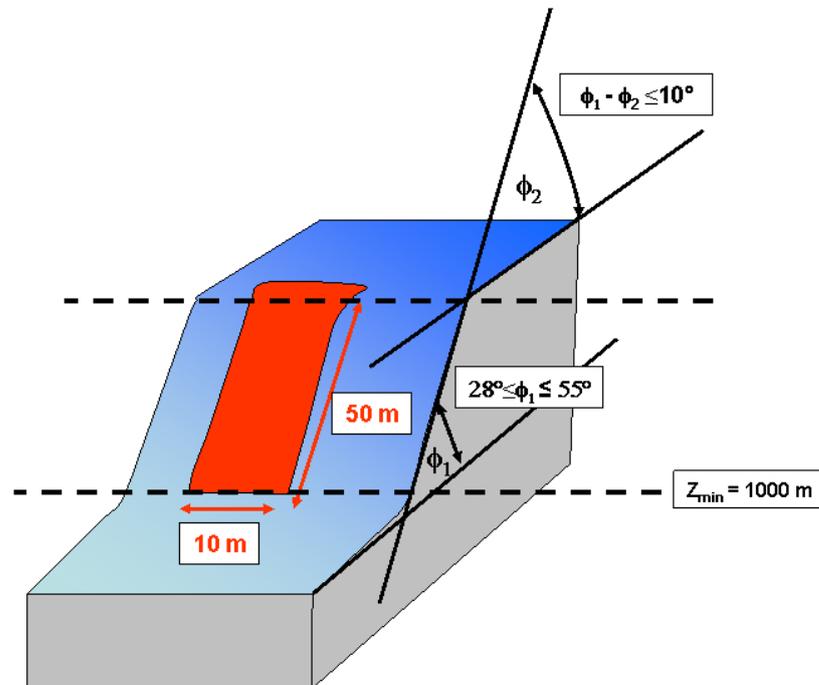


Figure 7 : Critères de détermination des zones de départ potentiel d'avalanche

Ces critères uniquement topographiques sont facilement utilisables avec une carte de l'IGN au 1/25000 (côté français) et avec le traitement sous Système d'Information Géographique (SIG) d'un Modèle Numérique de Terrain. Pour utiliser nos critères, les modèles numériques de terrain de l'IGN au pas de 25 et 50m nécessitent d'être ré-interpolés au pas de 10. Dans le cas de la présente étude, les MNT des zones françaises ainsi que celui de la zone Andorrane ont été acquis au pas de 5m, alors que ceux des zones espagnoles sont au pas de 25m.

La carte obtenue avec ces critères doit impérativement être confrontée à la réalité terrain (CLPA, EPA, parcours du terrain) comme cela est illustré dans la partie "Rendus cartographiques" pages 20-21.

L'intérêt de cette carte est de fournir des informations en dehors des secteurs avalancheux déjà recensés. Par conséquent il faut extraire de cette carte ces zones. Là encore l'emploi d'un SIG permet de faciliter ce travail d'extraction, si et seulement si on dispose de toutes les données numérisées et dans le même référentiel géographique.

C'est à partir de ces zones qu'il faut estimer, pour une avalanche se déclenchant depuis celles-ci, la distance maximale probable qu'elle pourrait atteindre.

ETAPE 2 - Modèle statistique pour déterminer le point d'arrêt maximal probable d'une avalanche.

La recherche sur la dynamique des avalanches est un domaine très actif qui a produit un grand nombre de modèles pour les différents types d'écoulements avalancheux. Les norvégiens en 1980, ont développé un principe de construction d'un modèle simple basé sur l'étudier de la corrélation qui existe entre les paramètres topographiques qui sont présents entre le point de départ d'un projectile et son point d'arrivée. Leur étude a été réalisée sur une population de couloirs d'avalanches norvégiens. Ce modèle statistique permet d'estimer le point maximal que pourra atteindre une avalanche.

A ce titre, il ne peut être utilisés que dans une chaîne d'aide à l'expertise et par conséquent associé à un processus d'analyse critique des résultats. L'avantage de ce modèle est que

son utilisation ne nécessite que la réalisation de profil en long et des calculs d'angle de pente.

Cette commodité d'usage fait qu'il permet aux gestionnaires d'avoir rapidement un premier aperçu et ainsi de déterminer les secteurs où des analyses complémentaires sont nécessaires.

Ce modèle a été par la suite testé et adapté aux conditions topographiques Autrichienne, Suisse. En 2007, ce modèle a été callé en France pour la vallée de Chamonix.

Nous utilisons ce modèle car, contrairement à beaucoup d'autres, il reste relativement simple dans sa conception et son utilisation. Il ne se base que sur des critères topographiques faciles à relever mettant à l'écart, contrairement à d'autres modèles les variables liées au manteau neigeux ou encore aux forces de frottements.

Dans la méthode de calcul proposée par les norvégiens, la distance d'arrêt est caractérisée par l'angle α entre le point le plus éloigné du dépôt et la limite supérieure de la zone de déclenchement (Cf. Figure 8). Selon le travail d'analyse des norvégiens, la distribution des angles α a une moyenne de 33° et une valeur minimale de 18° . Ils concluent que plus le couloir de l'avalanche est raide, plus l'inclinaison moyenne de la trajectoire est importante.

Pour décrire la raideur de ce couloir, le modèle statistique norvégien, développé par Lied et al. (1980) utilise l'angle β (Cf. Figure 8) calculé entre le point supérieur de la zone de déclenchement et le point aval où l'inclinaison de la pente atteint une valeur égale puis inférieure à 10° . En effet selon leur expérience et les données disponibles, toutes formes d'avalanches décélèrent à partir de cette valeur.

Ils ont ainsi proposé le modèle suivant :

$$\alpha = 0.96 \beta - 1.4^\circ \quad R^2 = 0,85$$

Compte tenu des résultats obtenus par les norvégiens lors de leurs travaux de zonage avec ce modèle « rustique », les autrichiens ont décidés de réaliser la même analyse pour leurs couloirs d'avalanche. Ils ont ainsi obtenu le modèle suivant

$$\alpha = 0.95 \beta - 0.8^\circ \quad R^2 = 0,92$$

Les différences de valeurs des coefficients s'expliquent principalement par les différences de rugosité de terrain qui existent entre ces deux pays.

En Suisse, la valeur de l'angle α a été fixée à 22° dans le cadre du projet de cartographie des forêts à fonction protection Sylvaprotect.

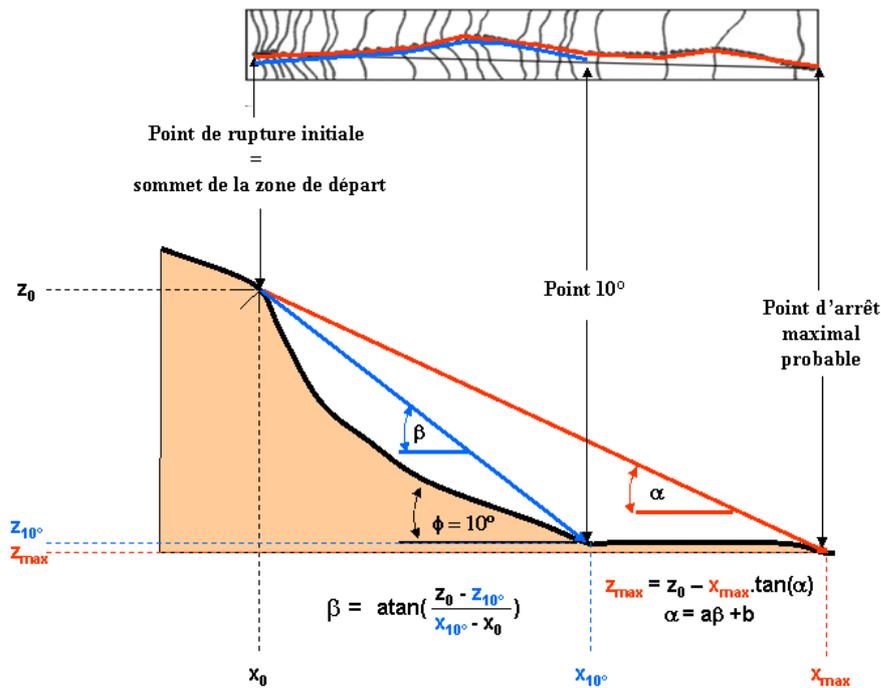


Figure 8 : Principe du modèle statistique norvégien pour estimer le point d'arrêt maximal d'une avalanche.

Ce modèle a été paramétré à partir des données de la CLPA et du zonage du PPRn de la vallée de Chamonix. Le premier travail selon (ISSLER D., 2004) consiste à recenser un nombre suffisamment important d'avalanches pour obtenir des résultats statistique probants.

Dans le cadre d'une telle analyse il faut écarter:

- Les pentes ayant une valeur de pente de 10° trop proche de la zone de départ de l'avalanche.
- Les avalanches exceptionnellement longues avec un dénivelé important et ayant une localisation de la pente à 10° située dans la moyenne des autres couloirs.
- Les avalanches de type « crosse de hockey » dans la zone de dépôt.

Il est important de garder à l'esprit ces trois familles d'avalanche afin de ne pas surestimer le domaine de validité du modèle que nous utilisons.

Pour paramétrer ce modèle, il faut disposer des points de rupture initiaux dans les zones de départ, de la localisation du point le plus bas du couloir pour lequel la pente est de 10° et du point d'arrêt maximal observé.

La détermination de ces points peut se faire à l'aide d'un SIG si l'opérateur dispose du MNT de la zone et de la carte numérisée des enveloppes maximales des avalanches observées. Avec le MNT, l'opérateur doit créer une carte des pentes faisant ressortir la valeur de 10°. Par croisement avec la carte des enveloppes maximales des avalanches observées, il peut alors tracer les profils en long suivant la ligne de plus grande pente. Ces profils doivent relier le point initial de rupture au point maximal d'arrêt en passant par le point de pente 10°. Pour ces trois points l'opérateur doit relever leurs coordonnées en x, y et z. Avec ces informations il doit calculer les angles α et β et ce pour chacun des couloirs étudiés. La dernière étape consiste à établir la courbe de régression qui existe entre ces angles.

Pour la vallée de Chamonix, le modèle qui a été obtenu pour les 113 couloirs étudiés est le suivant :

$$\alpha = 0.97 \beta - 1.50 \quad R^2 = 0,82$$

La figure 9 donne la représentation de ce modèle.

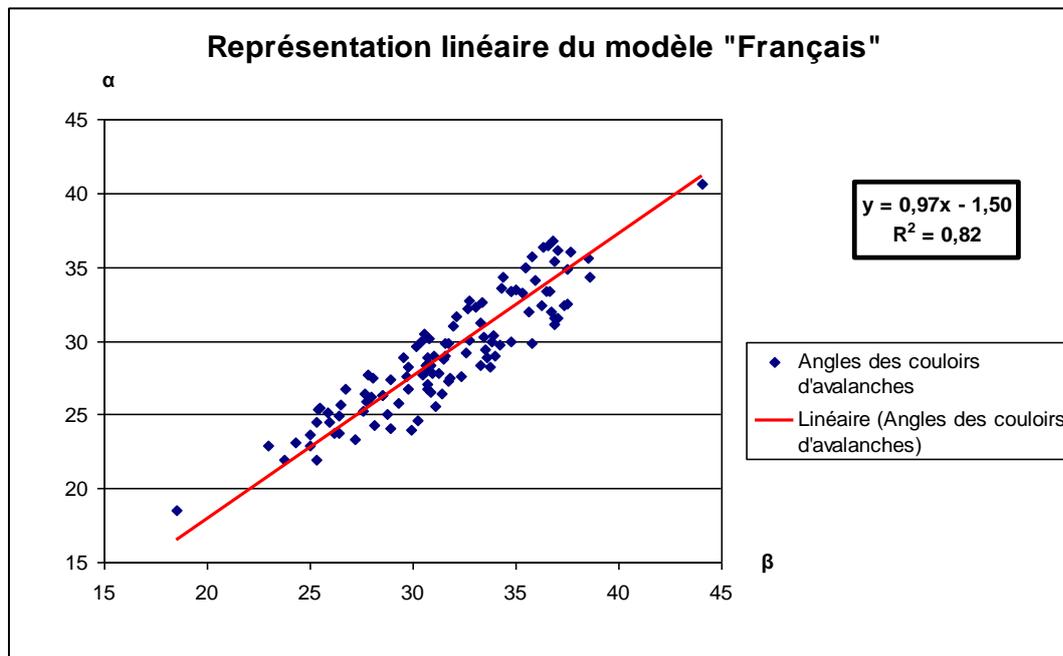


Figure 9 : représentation graphique de l'angle α en fonction de l'angle β pour les 113 couloirs étudiés de la vallée de Chamonix. (y correspond à l'angle α et x correspond à l'angle β)

Les avalanches de la vallée de Chamonix qui ont été utilisées pour ce travail de paramétrage du modèle, ont une valeur moyenne de l'angle α égale à $29,16^\circ$. Avec ce modèle la valeur moyenne de l'angle α des 113 avalanches étudiées, est de $29,19^\circ$. Ce faible écart entre les donnée observées et celles calculées permet d'affirmer la validité de ce modèle.

Le jeu de paramètres du modèle développé pour la vallée de Chamonix est utilisé comme jeu de référence dans les autres sites français. Néanmoins, un test de validité de ce jeu de paramètres est effectué dans tous les autres sites dans lesquels le modèle est utilisé. Ce test consiste à comparer les résultats obtenus avec le modèle avec les informations de la CLPA et s'il n'y a aucune CLPA pour le secteur concerné, de travailler avec les données de l'EPA.

ETAPE 3 – La cotation de l'aléa

La cotation de cet aléa ne pose pas de problème particulier compte tenu du fait que le phénomène avalancheux est bien suivi tant par les services français du RTM, que par les services des différentes Communautés Autonomes espagnole et le Centre d'Etude de la Neige de la Montagne d'Andorre (CENMA).

La cotation tient ici compte de la différenciation entre les avalanches « potentielles », c'est à dire celles qui pourraient se produire si les peuplements forestiers en place venaient à disparaître (1) et les avalanches constatées (2).

Dans le 1^{er} cas (1) le contour est tracé à dire d'expert à partir de l'information « panneaux déclencheurs » (couches SIG diffusées dans les services RTM) et la note d'aléa 1 est attribuée.

Dans le cas des avalanches constatées (2) on reprend le contour de la plus grande extension historique (critère de la Carte de Localisation des Phénomènes Avalancheux – CLPA ou autre document utilisé en Espagne et Andorre) et on attribue la note 3.

□ **Rendu cartographique** (CARTE A NE PAS DIFFUSER HORS CONSEIL SCIENTIFIQUE et PARTENARIAT OPCC)

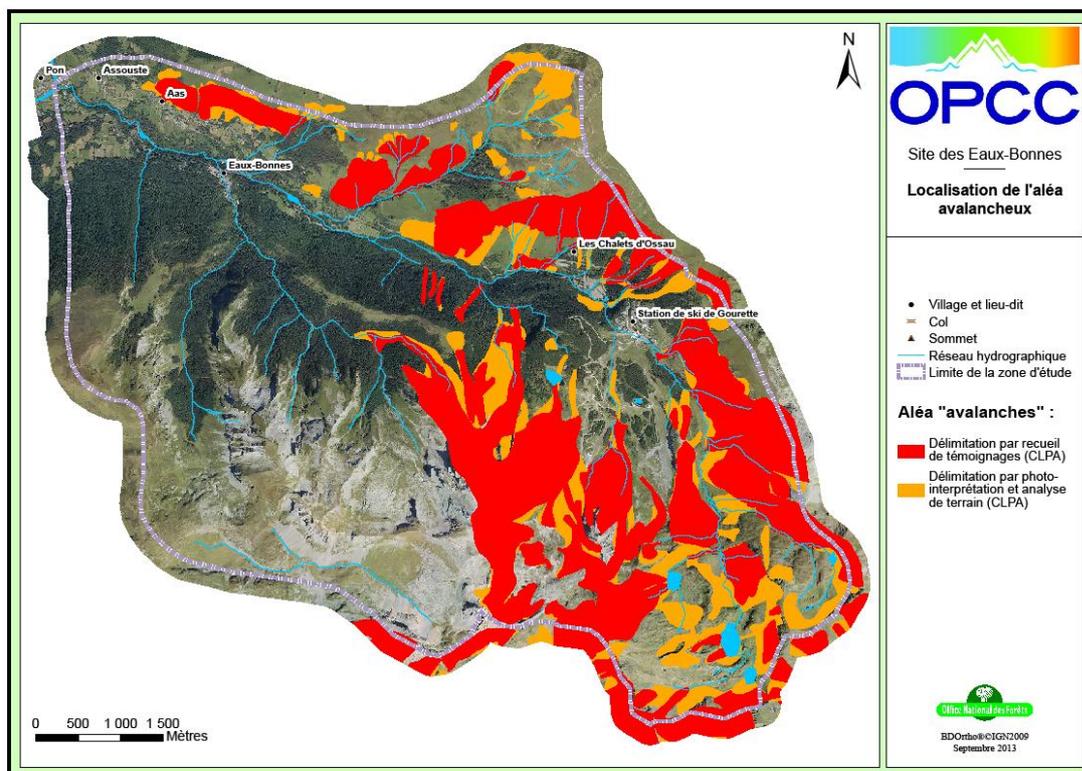


Figure 10 : Exemple de rendu cartographique de la localisation du phénomène avalancheux selon la CLPA



Figure 11 : Exemple de rendu cartographique de la localisation du phénomène avalancheux selon le modèle IRSTEA

Pour la constitution de la cartographie finale du phénomène avalancheux, on intègre les données disponibles par ordre de priorité de manière identique à la hiérarchie de cotation de l'aléa.

La priorité va aux avalanches issues de la CLPA pour le versant Français dont l'enveloppe de l'emprise est délimitée par recueil de témoignages.

On complète ensuite ces données avec les informations CLPA délimitées par interprétation des événements passés, à l'aide de la photo-interprétation et des analyses de terrain.

Dans un troisième temps les données issues de la modélisation réalisée par IRSTEA viennent compléter la carte CLPA.

Les données IRSTEA apportent des compléments d'informations dans les zones couvertes par l'étude CLPA et comblent les données manquantes dans les secteurs non étudiés. On obtient ainsi une cartographie de la localisation du phénomène avalancheux sur l'ensemble de la zone d'étude.

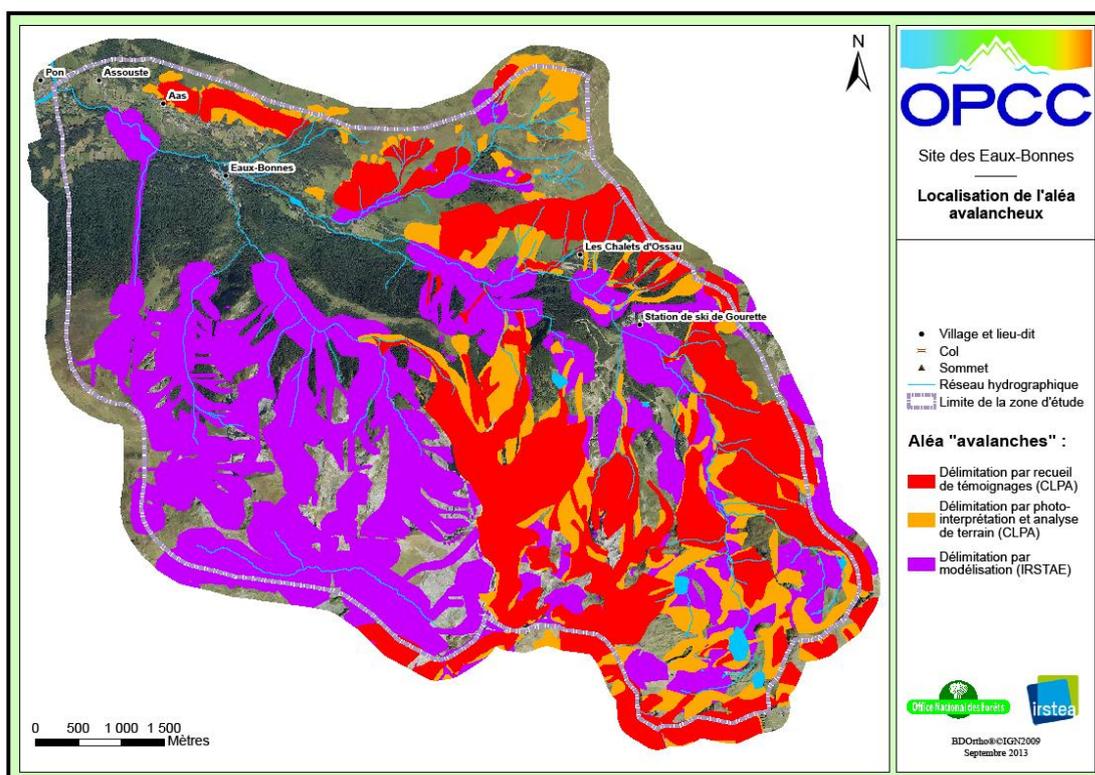


Figure 12 : Exemple de rendu cartographique du croisement entre la localisation du phénomène avalancheux selon le modèle IRSTEA et selon la CLPA

II.2.2 – Aléas rocheux ⁽³⁾

□ Définition de l'aléa

Particulièrement rependus en zone de montagne, les chutes de blocs et les éboulements sont des phénomènes rapides et isolés qui mobilisent des compartiments de roches plus ou moins homogènes et volumineux.

C'est la « chute libre ou le roulement [...] de blocs formés par fragmentation ; le mouvement pouvant ensuite se poursuivre dans le cas d'une pente régulière, par une série de rebonds de hauteur décroissante ».

On parle de « pierre » lorsque le volume considéré est de l'ordre de la dizaine de centimètre cube et de « bloc » lorsque celui-ci est de l'ordre de 1 à 100 m³.

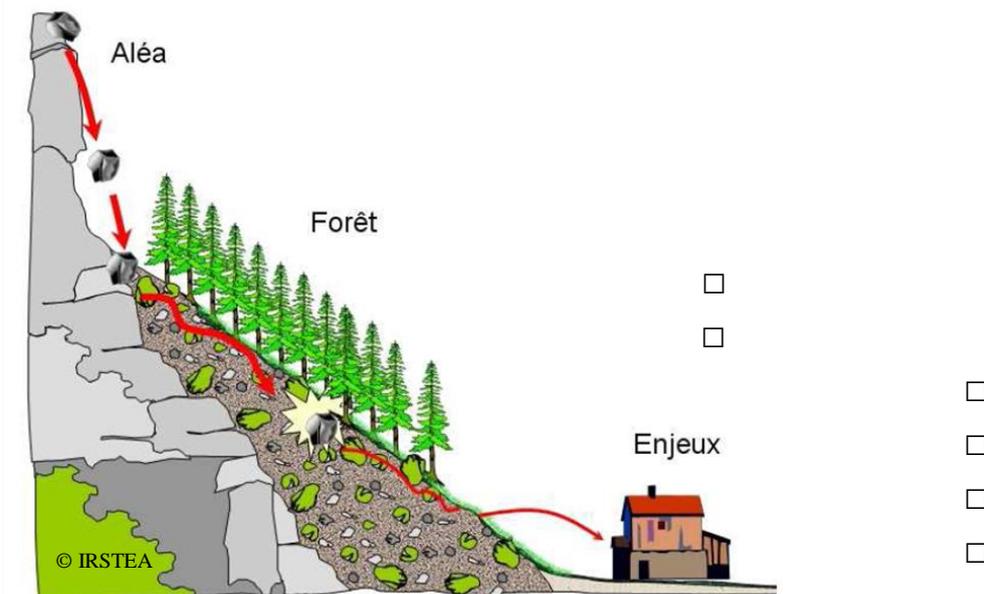
Lorsque les blocs se décrochent de la zone de départ, ils suivent généralement, en zone de propagation, la ligne de plus grande pente pour, après avoir roulés ou rebondis, s'arrêter en zone d'atterrissement dès lors que la pente s'adoucit suffisamment.

Ces chutes se déclenchent le plus souvent à partir d'escarpements rocheux, de falaises, de formations meubles à blocs (colluvions ou moraines par exemple), ou plus rarement de blocs rocheux ou éboulis immobilisés de façon instable sur une pente.

Lorsque les forces motrices sont alors plus fortes que les forces de résistance, divers mécanismes se mettent en jeu et provoquent la rupture selon différents processus: basculement, rupture de pied, de surplomb, glissement banc sur banc, fauchage, etc. Ces mécanismes d'évolution et de démantèlement du matériel rocheux conduisant à l'instabilité résultent d'une longue phase de préparation qui peut passer plus ou moins inaperçue.

La position de la zone de départ dans le versant, la topographie, le volume des blocs et la nature de la couverture superficielle du sol (végétation ou autre) vont grandement influencer les distances parcourues par les blocs.

De part le caractère spontané de ce phénomène événementiel, des volumes de masse rocheuse pouvant être mis en mouvement à des vitesses élevées, les chutes de blocs peuvent occasionner d'importants dommages aux biens, aux infrastructures et aux personnes.



⁽³⁾ Est ici considérée comme aléa rocheux la chute de pierres et de blocs individualisés. Sont exclus les éboulements, éboulements en masse et écroulements

□ **Méthodologie**

→ **Aspects opérationnels**

ETAPE 1 - Critères de déterminations des zones de départ potentiel de chutes de pierres et de blocs

Les zones de départ réelles de chutes de blocs sont des barres rocheuses et des falaises. La localisation de ces zones peut se faire soit par reconnaissance de terrain, soit par photo-interprétation soit en utilisant un MNT. Les deux premières méthodes nécessitent de réaliser une vision exhaustive de ces sites. Lors des inventaires de terrain il n'est pas toujours possible de parcourir la totalité du territoire étudié. La photo-interprétation peut s'avérer impossible à réaliser, s'il existe des zones d'ombres portées sur les documents photographiques et/ou si le couvert forestier masque des barres rocheuses. Par contre l'emploi d'un MNT, s'il est de qualité et si le traitement est robuste, offre la possibilité d'avoir une vision exhaustive des zones de départ probable présentes sur l'ensemble du site étudié.

Dans un MNT, les falaises et les barres rocheuses peuvent être identifiées soit par visualisation en 3 dimensions du secteur d'étude soit à partir du plan dérivé du MNT qu'est la carte des pentes. En fonction de la résolution du MNT (aussi dénommé le « pas » du MNT), il faut définir la valeur de pente minimale permettant de détecter le plus grand nombre possible de falaises et barres rocheuses.

Ainsi par exemple, dans un MNT au pas de 50 m, une falaise d'une hauteur de 20 m, dont la pente est égale à 60° et situé à l'amont d'une pente d'éboulis ayant une pente de 35°, l'angle α évalué par le MNT au pas de 50 m sera égal à 43°.

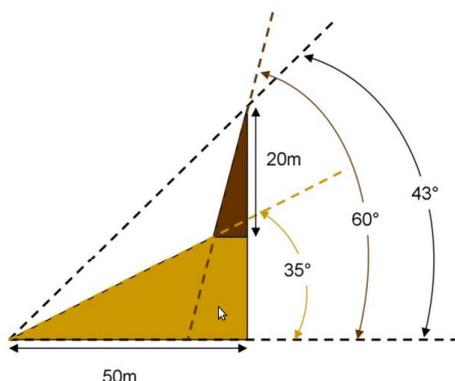


Figure 13 : Exemple de valeur d'angle de pente sur MNT et dans la réalité (pour des questions de lisibilité de la représentation schématique les angles ont volontairement exagérés sur le schéma).

Par conséquent il est nécessaire pour un MNT donné, d'estimer l'angle α évalué par celui-ci dans la carte des pentes qui permet de caractériser les falaises le plus précisément possible. A partir de l'analyse des zones de départ de plusieurs sites d'étude situés en France, Suisse et Autriche nous avons construit un modèle permettant de calculer la valeur cet angle α . La formule de ce modèle mathématique est la suivante :

$$\alpha = 55^\circ * \text{RES} - 0,075 \quad (1)$$

Avec RES = la résolution du MNT

(Par exemple si la, résolution est de 15x15 m alors RES = 15)

Comme pour tout modèle, les résultats obtenus avec cette valeur d'angle doivent être impérativement validés par comparaisons avec la réalité du terrain et les données relatives aux phénomènes passés.

ETAPE 2 - Modèle statistique pour déterminer le point d'arrêt maximal probable d'un projectile rocheux.

Il existe un type de modèle dit statistique qui permet d'estimer à partir d'une zone de départ la localisation du point d'arrêt maximal probable d'un projectile et qui ne nécessite pas à proprement parlé de détermination des coefficients de réponse des sols. Ce modèle est basé sur le principe de la ligne d'énergie développée par HEIM A. en 1932 et repose sur un principe simple et trivial : un bloc ne peut progresser sur une pente que si celle-ci est suffisamment raide.

Ainsi, si la pente est supérieure à un angle limite β , il accélère. Si elle est inférieure à β , il ralentit. En partant de ce constat, un bloc peut aller d'une zone de départ A jusqu'à B, point d'intersection du relief avec une ligne imaginaire partant de la zone de départ et formant un angle β avec l'horizontal (Cf. Fig. 14). Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β , l'angle de la ligne d'énergie.

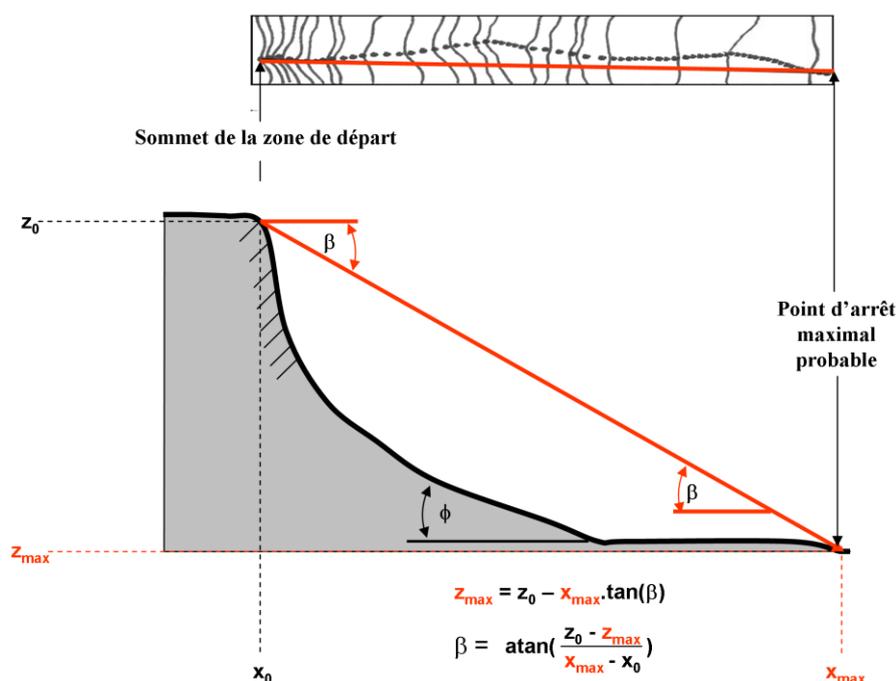


Figure 14 : Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β

A partir du profil en long de la pente à partir d'une zone de départ, on peut alors, si on connaît la valeur de l'angle β , déterminer le point maximal probable qu'atteindra tout projectile qui se détachera de la zone de départ.

Compte tenu de la possibilité de déviation des trajectoires des blocs que ce soit à cause de leur forme ou des obstacles rencontrés, ils peuvent donc progresser dans un cône, appelé cône de propagation. Ce cône a une pente β et son sommet est placé au niveau de la zone de départ A.

Depuis sa formalisation, ce principe a fait l'objet de nombreuses études. Différents auteurs se sont, entre autre, intéressés à l'adaptation de cette méthode en fonction de la localisation du point de départ A et du type de profil en long à utiliser pour les calculs.

Ainsi des auteurs tels que Lied (1977), Wiczorek et al. (1990) et Evans and Hungr (1993) proposent d'utiliser non le point sommital des falaises mais les sommets des « talus » (intersection entre la pente et le pied de falaise). Ils ont ainsi élaboré le principe « d'angle d'ombrage » (Shadow angle) (cf. Fig.5). La valeur de l'angle de la ligne d'énergie étant pour chacun de ces auteurs de respectivement : 28°, 22° et 27,5°. L'utilisation du shadow angle nécessite de déterminer le sommet des « talus ». Une telle détermination n'est pas chose aisée à réaliser de façon automatique à partir de l'analyse d'un MNT.

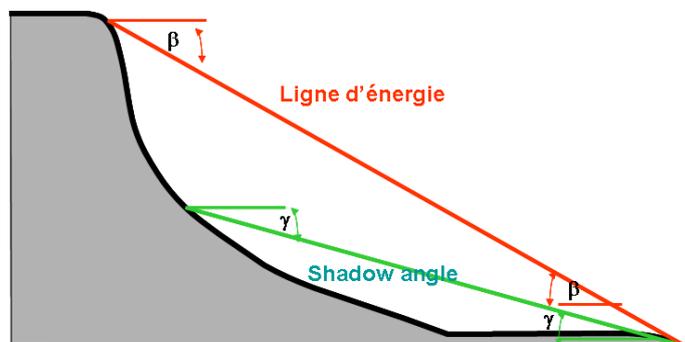


Figure 15 : Principe de la ligne d'énergie selon Heim (1932) et principe du shadow angle selon Lied (1977)

En ce qui concerne le choix d'implantation du profil en long, il existe deux grandes écoles de pensées. La première préconise d'utiliser la ligne de plus grande pente et est à l'origine du concept de l'angle géométrique (aussi dénommé « reach angle »). La deuxième quant à elle propose d'utiliser le profil en long correspondant au trajet le plus probable sur la pente et est ainsi à l'origine du concept de « l'angle de trajet » (travel angle). La figure 7 présente ces deux concepts.

Avec le principe de l'angle de trajet, l'angle de la ligne d'énergie est plus faible qu'avec le principe de l'angle géométrique. La différence entre les deux angles est de l'ordre du degré. Le principe de la ligne d'énergie avec l'angle de trajet est là encore plus difficile à traduire dans un utilitaire de calcul permettant de travailler sur de vastes surfaces géographiques. En effet, il faut développer ou utiliser un principe de calcul d'écoulement permettant de déterminer les lignes de plus grandes pentes, les thalwegs et micro-thalwegs présents.

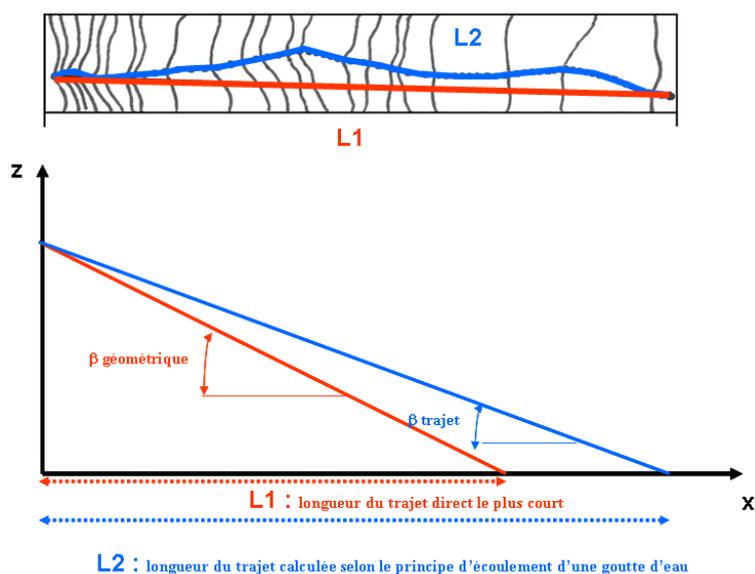


Figure 16 : Présentation des principes de calcul de la ligne d'énergie avec le principe de l'angle géométrique et de l'angle de trajet. Dans les deux cas le point d'arrêt géographique est le même mais par contre les distances des trajets d'atteintes sont différentes.

Plusieurs auteurs ont travaillé sur la détermination de l'angle β de la ligne d'énergie selon le principe de Heim (1932) et celui de l'angle de trajet. Le tableau ci-dessous donne ces valeurs.

Auteur/Source	Valeur de l'angle de la ligne d'énergie (entre parenthèse valeur de l'angle géométrique)	
	Minimum ou intervalle	Moyenne
Shreve (1968)	(26,57° - 38,66°)	---
Hsü (1975)	31° (32°)	---
Onofri & Candian (1979)	28,34° - 40,73° (28,84° - 41,73°)	---
Grunder (1984)	32,6° - 33,4° (33,1° - 34,4°)	---
Moser (1986)	33° - 42° (34° - 43°)	---
Domaas (1985 in Toppe 1987)	32° (33°)	---
Mac ewen (1989)	(30,96°) \approx (31°)	
Gerber (1994)	33° - 37° (33,5° - 38°)	---
Meissl (1998)	29° - 47,5° (29,5° - 48,5°)	38° (38°)
Heinimann et al. (1998)	33° - 37° (33,5° - 38°)	---
Focardi & lotti (2001)	27° - 29° (27,5° - 30°)	---
Ayala-carcedo et al. (2001)	(29,1° - 38,9°)	(31,9°) pour la valeur minimale
Jaboyedoff & Labouise (2003)	32° (33°)	---
Jaboyedoff & Labouise (2011)	(32,6° - 35,6°)	34°
Corominas et al. (2003)	26° - 54° (27° 55°)	---
Dorren & Berger (2005, 2006)	31,3° - 37° (31,9° - 38°)	---
Copons et al.(2009) site a	(36,87° - 56,3°)	---
Copons et al.(2009) site b	(28,81° - 42,0°)	---
Hutter et al. (2005) modèle réduit	(30° - 37°)	---
Scheidegger (1973)	(29,68° - 39,69°)	---
Marquinez et al. (2002) cas 1	(32,5° - 40,9°)	(31,5° - 40,2°)
Marquinez et al. (2002) cas 2	(29,4° - 38,5°)	
Antoniou & Lekkas (2009)	(35°)	---
Deparis et al (2008)	(31,61° - 47,20°)	---
Hyndman & Hyndman (2009)	(33°)	---
Berger et al. (2009) sans forêt	(27,67° - 33,88°)	---
Berger et al. (2009) avec forêt	(31,32° - 37,86°)	---
Berger et al. (2009) modèle réduit	(32,57° - 48,99°)	---

Valeurs de l'angle β (trajet et géométrique) suivant différents auteurs.

Le tableau ci-après présente les résultats de l'analyse statistique réalisée sur les données du tableau ci-dessus.

Statistique	Angle géométrique minimal	Angle géométrique maximal
Moyenne	31,14°	39,30°
Min	26,57°	30°
1 ^{er} quartile	29,45°	36,97°
2 ^{ème} quartile	31,61°	38,58
3 ^{ème} quartile	33°	41,80°
Max	36,87°	48,99°

Analyse statistique des données publiées et relative à l'angle de ligne d'énergie

La bibliographie indique des valeurs de β variant de 26,57 à 48,99°. Cependant, les études de Gerber (1994) et de Meissl (1986) préconisent de déterminer la valeur de cet angle en tenant compte de la dimension des projectiles et de la rugosité du sol.

Type de projectile	Valeur de l'angle de la ligne d'énergie et rugosité du sol		
	33° et faible rugosité	35° et rugosité moyenne	37° et forte rugosité
Pierre (inférieure au dm ³)	Prairie	Broussaille	Arbres
	Pas d'irrégularités	Petites irrégularités	Grosses irrégularités
	Sol superficiel	Sol superficiele	Sol profond
1dm ³ <Pierre-Bloc<1m ³	Broussaille	Arbres	
	Petites irrégularités	Grosses irrégularités	
	Sol superficiele	Sol profond	
Bloc>1m ³	Arbres		
	Grosses irrégularités		
	Sol profond		

Valeurs de l'angle géométrique β en fonction de la rugosité du sol et de la dimension des projectiles (d'après Meissl 1986 et Gerber 1994).

Au regard des expériences grandeur nature de chutes de blocs du Cemagref sur le site de Vaujany (Isère) (Dorren L.K.A et al., 2005), des valeurs des 3 tableaux précédents et des résultats que obtenus lors des travaux d'expertise et de contre-expertise des PPRn de Veyrier-du-lac et de Talloires, les analyses des résultats font ressortir les critères d'angle suivants pour le calcul de la ligne d'énergie selon les principes de l'angle géométrique et de Heim (1932) :

Niveau de probabilité d'atteinte d'un point	Angle de la ligne d'énergie sans prise en compte de la forêt	Angle de la ligne d'énergie avec prise en compte de la forêt	Différence d'angle : avec forêt – sans forêt
Fort	33,88°	37,86°	3,99°
Moyen	30,22°	34,13°	3,91°
Faible	27,67°	31,32°	3,65°

Valeur des angles géométriques pour le calcul de la ligne d'énergie obtenus par la rétro analyse de phénomènes passés et du zonage de 2 PPRn.

Il est intéressant de noter que la présence de la forêt se traduit par une augmentation systématique de la valeur d'angle de l'ordre de 3.8° (≈ 4°) par rapport au terrain nu.

Pour la cartographie des forêts à fonction de protection, nous utilisons les valeurs suivantes :

Valeur seuil de l'angle géométrique	Niveau de probabilité d'atteinte d'un point par un bloc unitaire
$\geq 38^\circ$	Fort
$35^\circ \leq < 38^\circ$	Moyen
$32^\circ \leq < 35^\circ$	faible
$26^\circ \leq < 32^\circ$	très faible mais non nul

Valeurs de seuillage des angles géométriques pouvant être utilisés pour l'aide à l'expertise et la réalisation d'une pré-cartographie de l'aléa chutes de pierres et de blocs.

Il est important de préciser que nous avons fixé (à partir de notre expérience acquise lors de nos expertises) l'angle de propagation maximale en terrain nu à la valeur de 32°.

ETAPE 3 – La cotation de l'aléa

Une validation des cartes d'aléas produites est nécessaire, et cela pour deux raisons :

- Vérifier l'exactitude des cartes issues du modèle IRSTEA.

L'expérience issue des travaux similaires réalisés dans les Alpes montre que la modélisation IRSTEA de l'aléa chute de bloc est correcte à 95 %. Il convient toutefois de prêter attention aux excès du modèle (exemple de talus instables) et aux possibles erreurs provenant d'un manque de précision du Modèle Numérique de Terrain utilisé.

- Coter l'aléa

La principale difficulté provient du fait que la cotation se base sur le volume des blocs. Les blocs de volume moyen inférieur à 1 m³ seront notés "2" et ceux dont le volume moyen est supérieur à 1 m³ seront notés "3".

L'expérience montre à nouveau que cette cotation peut être réalisée "à dire d'experts".

Il conviendra toutefois d'expliquer au personnel interrogé la différence résultant de l'utilisation de la méthode de ligne d'énergie à 32° et celle à 38°, cette dernière constituant ce qui est le plus communément rencontré sur le terrain.

Dans certains cas toutefois, notamment le cas où une zone est considérée comme potentiellement productrice de blocs, une validation *in-situ* peut être nécessaire. En effet, à ce stade de l'analyse on ne tient pas compte de la productivité des zones, aussi des projectiles peuvent avoir été arrêtés avant les enjeux ou sur des zones non visibles aux observateurs alors qu'aucun évènement n'est connu.

Le volume de propagation est toujours celui qui se propage sur la pente et qui est donc le résultat final de la fragmentation du volume de départ en falaise ou barre rocheuse.

□ **Rendu cartographique** (CARTE A NE PAS DIFFUSER HORS CONSEIL SCIENTIFIQUE et PARTENARIAT OPCC)

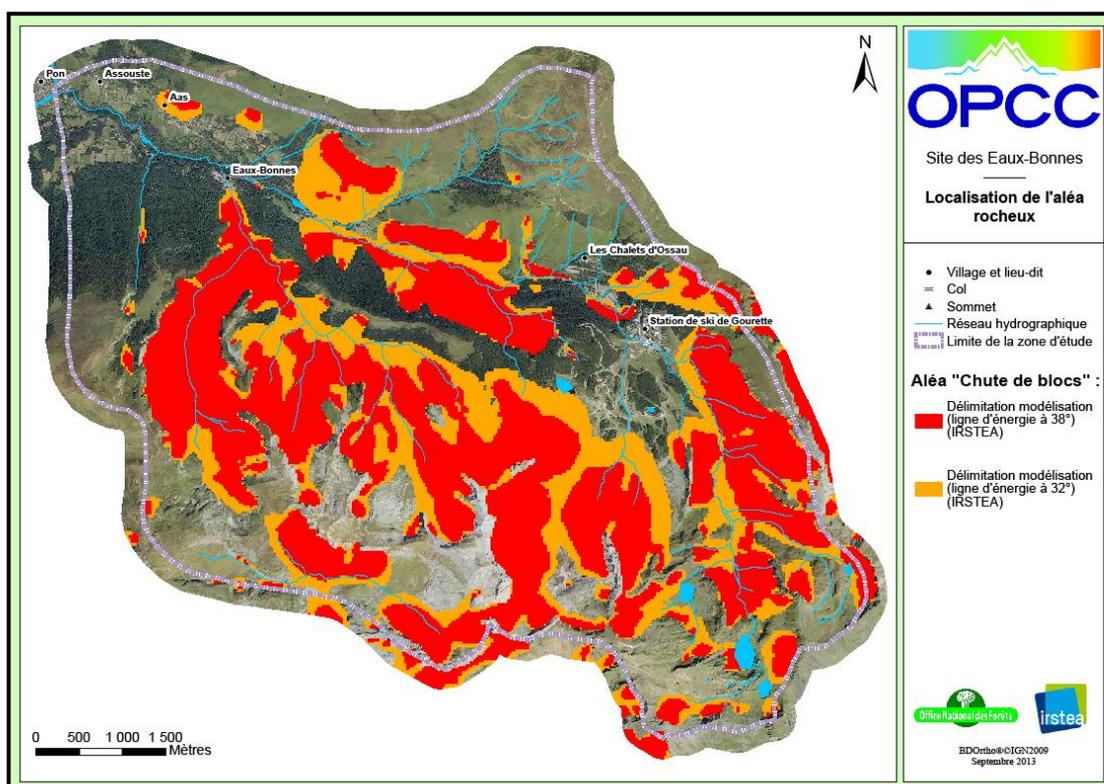


Figure 17: Exemple de rendu cartographique de la localisation du phénomène chute de blocs selon le modèle IRSTEA

II.2.3 – Aléa torrentiel

□ *Définition de l'aléa*

Une crue désigne une élévation du niveau d'un cours d'eau qui peut être à l'origine d'inondations. Le caractère torrentiel renvoie à la définition même du torrent qui est un cours d'eau de montagne dont la pente en long est supérieure à 6%, rapide et irrégulier, caractérisé par des crues soudaines et violentes. La principale particularité des écoulements torrentiels consiste dans leur vitesse et en un transport plus ou moins important de sédiments en période de crues.

L'activité du torrent est fonction de la quantité d'eau amenée par la pluie, de la capacité de la végétation et des sols à en retenir une partie dans le bassin d'alimentation mais aussi de la capacité du bassin versant à produire des matériaux (éléments minéraux, corps flottants) qui pourront être mobilisés par les écoulements torrentiels.

La végétation présente dans le bassin versant permet ainsi d'atténuer les crues, en repoussant le seuil de déclenchement et en écrêtant les pointes. Il est cependant admis que les crues torrentielles potentiellement les plus dévastatrices sont dues à de très fortes pluies pour lesquelles le rôle de la végétation dans la zone amont du bassin versant torrentiel est négligeable, ses capacités de rétention étant largement dépassées.

L'enveloppe de l'unité «bassin versant torrentiel» est constituée par un bassin versant drainé par un « site » torrentiel, en incluant le linéaire de torrent et son cône de déjection. Elle peut être découpée en :

- une zone de départ : bassin d'alimentation, qui correspond à une zone de réception et d'accumulation des eaux, et de déclenchement (érosions, ravinements) des matériaux ;
- une zone de transit : linéaire de torrent, qui correspond à une zone de concentration des eaux et des matériaux dans un chenal plus ou moins étroit et encaissé ;
- une zone de dépôt : cône de déjection et certaines larges zones de régulation au sein du linéaire de torrent, qui correspondent à des zones d'étalement des eaux et dépôt des matériaux transportés.

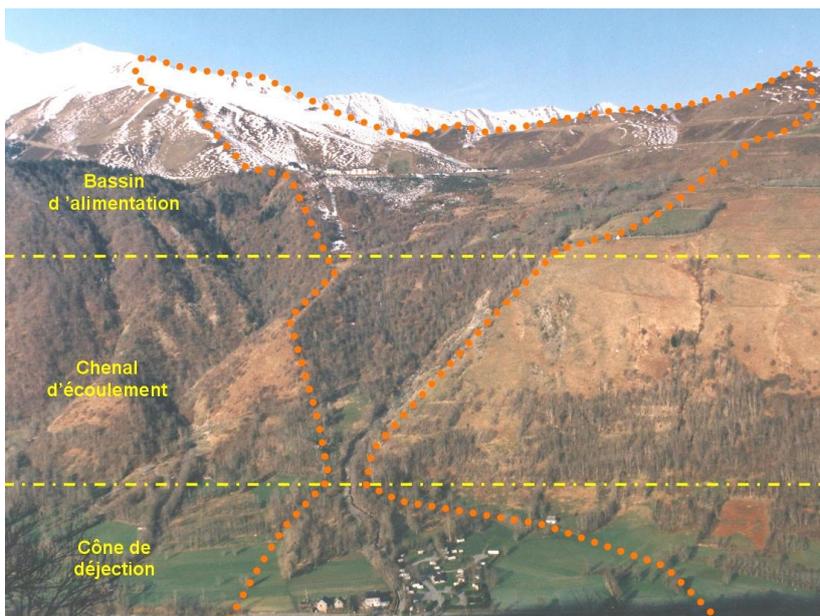


Figure 18 : L'unité « bassin versant torrentiel »

Différents facteurs « déclencheurs » influent sur l'intensité des épisodes de crues et du phénomène érosif susceptible de venir alimenter en matériaux le transport torrentiel dans un bassin versant :

- l'intensité des **pluies** : c'est lors de pluies intenses que se produisent la plupart des phénomènes importants d'érosion et de crues torrentielles. Ces phénomènes sont importants sur toute la chaîne pyrénéenne ;
- la **pente** : plus la pente est forte et plus le risque est élevé, en augmentant l'effet de la gravité, et en accélérant la vitesse d'écoulement de l'eau et des matériaux charriés et donc aussi son pouvoir érosif ;
- la nature des **substrats** dans les zones de réception et d'écoulement:
 - substrats fortement sensibles à l'érosion : formations d'origine fluvioglaciale, anciennes moraines, formation détritiques et alluvionnaire ;
 - Substrats moyennement sensibles : schistes et marnes ;
 - Substrats résistants : roches en places, calcaires, granites, gneiss. Pour ces roches, ce sont les couches d'altération et les sols qui sont à considérer (plus leur altération de surface est marquée, plus l'érodabilité est potentiellement forte).
- une **végétation inefficace** :
 - La forêt aura tendance à atténuer les crues en repoussant le seuil de déclenchement et écrétant les pointes ;
 - La forêt remplit partout une fonction de protection vis-à-vis des crues habituelles.
 - Toutefois, le rôle de la végétation devient marginal dans le cas de phénomènes dévastateurs. Dans ce cas, elle contribue à alimenter le torrent en corps flottants et accentue donc les dégâts potentiels.

En effet en cas de précipitations intenses sur un sol déjà saturé, la forêt ne remplit plus de fonction de protection. Mais heureusement les crues dévastatrices sont les plus rares, et donc la forêt remplit partout une fonction de protection vis à vis des crues plus habituelles. Pour cette raison, toute surface boisée, même en plaine, remplit une fonction de maîtrise de l'aléa... mais à des degrés divers.

L'activité du torrent est donc fonction de la quantité d'eau amenée par la pluie, de la capacité de la végétation et des sols à en retenir une partie, mais aussi de la capacité du bassin versant à alimenter le torrent en matériaux.

□ **Méthodologie**

→ **Aspects généraux**

- Les différents rôles de la végétation conduisent à appréhender l'aléa « crue torrentielle » de deux façons :
 - Soit on s'intéresse aux événements les plus dévastateurs et à leurs impacts sur les enjeux humains proches ; on se cantonne alors au torrent lui-même (chenal d'écoulement, berges) pour le diagnostic.
 - Soit on s'intéresse au fonctionnement global du phénomène à l'échelle du bassin versant et au rôle que peut jouer la végétation pour l'atténuer. On considère alors l'ensemble du bassin versant et l'on définit une unité fonctionnelle d'aléa « bassin versant torrentiel » comprenant : une zone de départ, une zone de transit et une zone d'arrêt (ou cône de déjection).

La méthode proposée consiste à faire l'analyse pente / substrat / taille du bassin versant / localisation amont aval par tronçons homogènes afin de définir l'importance de chaque secteur (secteurs pentus affouillables, zone de régulation des transports solides, secteurs non affouillables).

→ **Aspects opérationnels**

L'objectif de cette méthodologie est de définir une enveloppe d'impact au sein de laquelle pourront être déterminés les enjeux susceptibles d'être impactés par un aléa de type crue torrentielle.

Pour cette méthodologie, trois données en entrée sont utilisées :

- le réseau hydrographique de la BD Topo (vecteurs de type linéaire) ;
- les plans d'eau de la BD Topo (vecteurs de type surfacique) ;
- le MNT au pas de 5 mètres (raster) ;

Présentation des données :

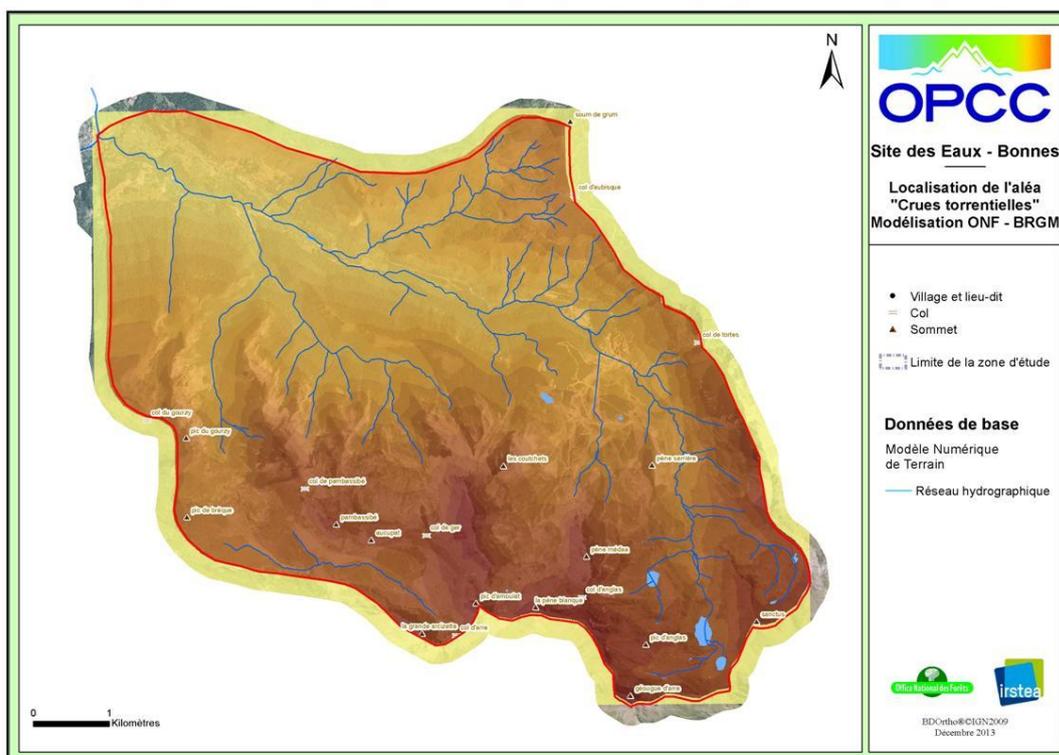


Figure 19 : MNT et réseau hydrographique

Le but de ce travail est de savoir quelles seront les zones potentiellement inondées en cas de débordement du cours d'eau dû principalement à un événement pluvieux de grande importance. Les phénomènes d'affouillement ou d'engrèvement ne sont pas pris en compte dans cette méthode.

ETAPE 1 : Définition des classes de pente

La première étape a consisté à découper le réseau hydrographique selon 3 classes de pentes issues directement du Modèle Numérique de Terrain :

- < 2% = Rivière
- 2 a 6% = Rivière torrentielle
- > 6% = Torrent

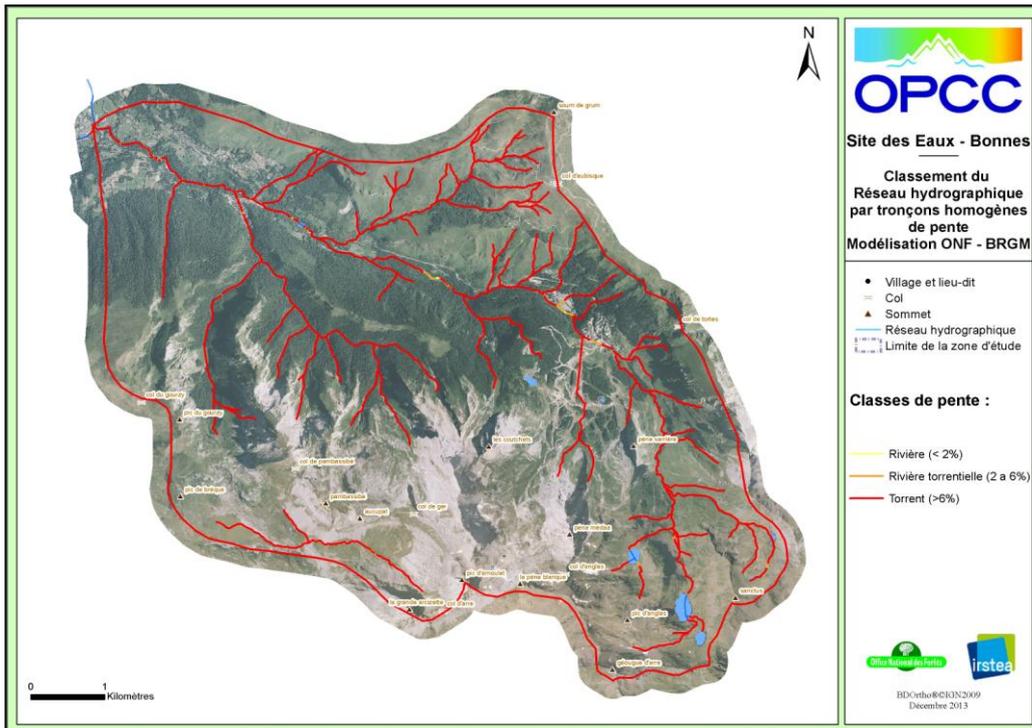


Figure 20 : Réseau hydrographique par classes de pente

ETAPE 2 : Hiérarchisation du réseau hydrologique

Dans un deuxième temps, afin de prendre en compte le phénomène d'accumulation de l'eau dans la zone aval, le réseau hydrologique a été hiérarchisé selon la méthode de Strahler.

La hiérarchisation d'écoulement est une méthode d'attribution d'un ordre numérique aux liaisons d'un réseau hydrographique. Cet ordre est un moyen qui permet d'identifier et de classer des types de cours d'eau en fonction de leur nombre d'affluents. Certaines caractéristiques de cours d'eau peuvent être appréciées, sans difficulté, d'après leur ordre.

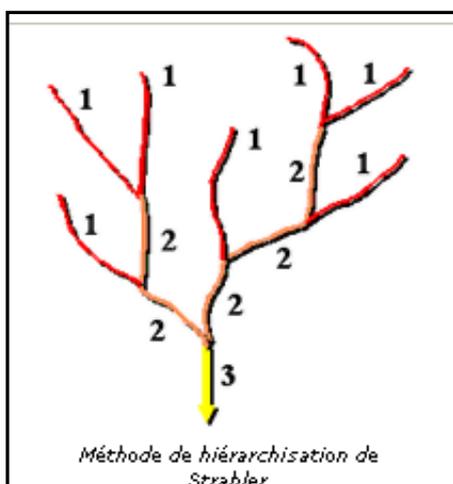


Figure 21 : Méthode de Strahler

Résultat de la méthode de Strahler sur la zone d'étude des Eaux Bonnes :

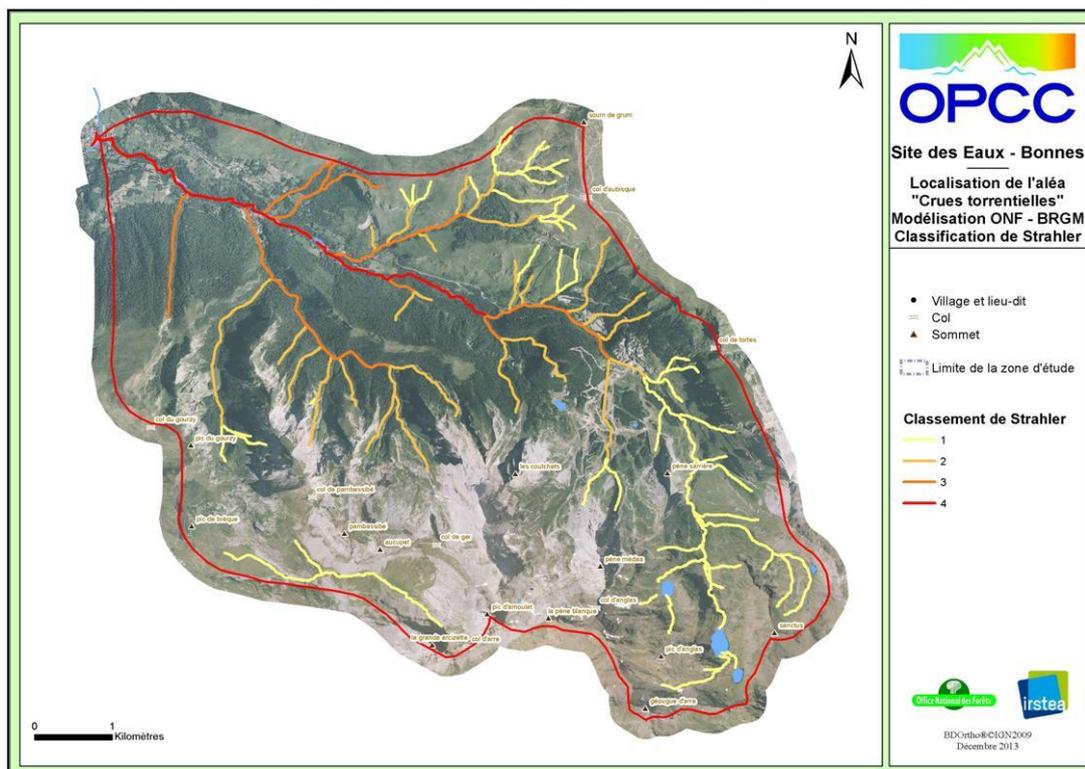


Figure 22 : Rendu de la méthode de Strahler sur la zone Eaux-Bonnes

L'intérêt de ce résultat sera d'augmenter le niveau d'eau potentiel suite à un débordement du cours d'eau en majorant l'impact dans le sens amont – aval.

ETAPE 3 : Définition de l'élévation potentielle du débit des cours d'eau

La troisième variable utilisée est celle transmise par le BRGM concernant le phénomène de sensibilité des formations superficielles aux glissements de terrain. Le résultat de leur expertise est découpé en 4 classes selon le niveau de sensibilité :

- très faible
- faible
- moyen
- fort

Résultat de l'analyse des sensibilités aux formations superficielles ci-dessous :

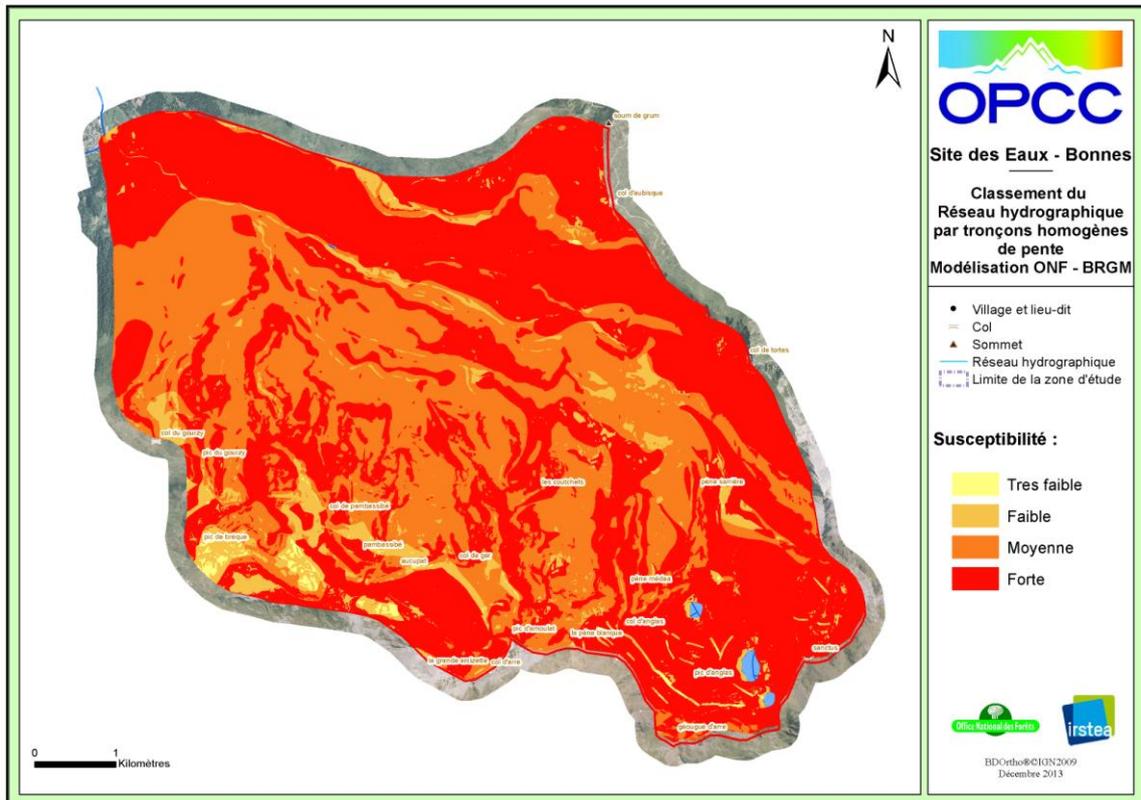


Figure 23 : Sensibilité des formations superficielles aux glissements de terrain

Après expertise, et afin d'affiner la simulation d'élévation du débit des cours d'eau et donc de hauteur d'eau, il a été décidé de prendre en compte une variable supplémentaire : la superficie des bassins versants de chaque tronçon du réseau hydrographique.

Pour cela nous avons classifié les bassins versant en 3 classes selon leur superficie. Cette classification est propre à la zone d'étude et sera affinée pour chacune d'elle (méthode de classification des écarts types) :

- petit bassin versant < 100ha
- moyen bassin versant > 100ha et < 300 ha
- grand bassin versant > 300 ha

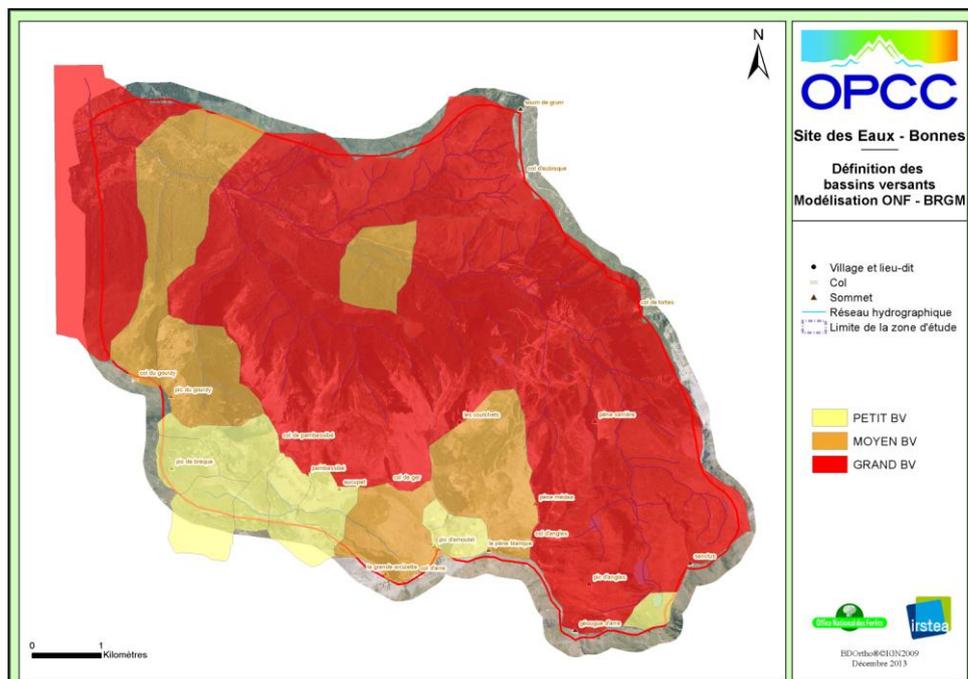


Figure 24 : Analyse de la superficie des bassins versants

Après cette première étape de génération des quatre variables et pour pouvoir « simuler » la zone « de débordement », des profils en travers ont été implantés sur le réseau hydrographique avec un pas de distance différent pour chaque niveau d'écoulement :

- niveau 1 : écartement de 20 m entre chaque profil et profil de 20 m de large de part et d'autre du cours d'eau.
- niveau 2 : écartement de 30 m entre chaque profil et profil de 40 m de large de part et d'autre du cours d'eau.
- niveau 3 : écartement de 40 m entre chaque profil et profil de 60 m de large de part et d'autre du cours d'eau.
- niveau 4 : écartement de 50 m entre chaque profil et profil de 100 m de large de part et d'autre du cours d'eau.

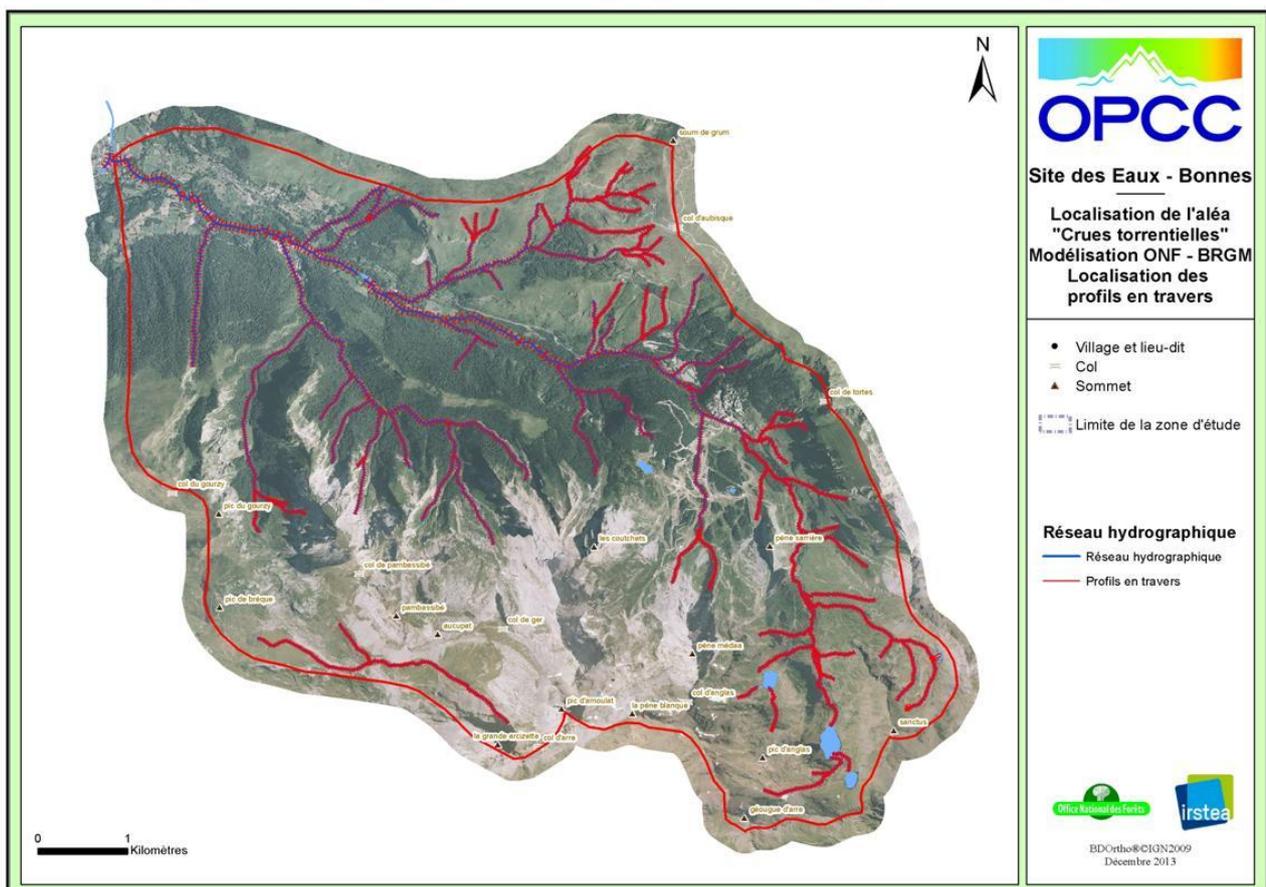


Figure 25 : Localisation des profils en travers

La taille des différents profils sous entend que les débordements potentiels n'iront pas au delà de ces emprises. Ces dernières sont sûrement trop limitantes dans le cas de cônes de déjection mais nos connaissances du phénomène et les données utilisées ne nous permettent pas de prendre en compte ce type d'évènement.

Afin de rendre le traitement le plus précis possible, des profils en travers qui se croisent ont été modifiés manuellement et de la même façon, des profils en travers ont été rajoutés pour les plans d'eau afin de simuler aussi leur débordement.

ArclInfo ne permet pas de donner une valeur d'altitude au sein d'un fichier linéaire ; un fichier de points a donc été généré à l'intersection des profils en travers et du réseau hydrographique et à partir du MNT. Cette manipulation a été employée afin de définir l'altitude de chacun de ces points.

Cette information d'altitude des points d'intersection a été rattachée à chacun des profils en travers ce qui a permis d'avoir pour chaque profil une information d'altitude.

L'étape suivante a consisté à estimer pour chaque tronçon homogène du réseau hydrographique une augmentation potentielle du niveau d'eau en se basant sur les 4 variables précédentes (localisation amont-aval, sensibilité aux formations superficielles, taille du bassin versant et pente).

Pour cela nous avons croisé ces variables en associant une valeur numérique à chacune des valeurs et en prenant un facteur de pondération pour chaque variable en fonction de leur « importance » dans le phénomène de crue torrentiel.

A dire d'expert, la pente, la sensibilité aux formations superficielles et la taille des bassins versants ont un rôle plus important dans les simulations de hauteur de débordement que la classification amont-aval (Strahler). Chacune de ces variables a donc été pondérée et prise compte de la façon suivante :

Variable classe de strahler

	POID NUMERIQUE	FACTEUR DE PONDERATION	TOTAL NUMERIQUE
1 (amont)	1	1	1
2	2	1	2
3	3	1	3
4 (aval)	4	1	4

Variable Sensibilité des formations superficielles

	POID NUMERIQUE	FACTEUR DE PONDERATION	TOTAL NUMERIQUE
Très faible	1	2	2
Faible	2	2	4
Moyen	3	2	6
Fort	4	2	8

Variable classe de bassin versant

	POID NUMERIQUE	FACTEUR DE PONDERATION	TOTAL NUMERIQUE
Petit BV (<100ha)	1	2	2
Moyen BV (>100ha et <300ha)	2	2	4
Grand BV (>300ha)	3	2	6

Variable classe de pente :

	POID NUMERIQUE	FACTEUR DE PONDERATION	TOTAL NUMERIQUE
Rivière < 2%	1	2	2
Rivière torrentielle 2 à 6%	2	2	4
torrent	3	2	6

Pour chaque tronçon nous avons calculé la somme des valeurs numériques en prenant en compte leurs facteurs de pondération. A chacun des résultats est associée une augmentation de hauteur d'eau comprise entre 0,5 m et 2,5 m au-delà du lit majeur du cours d'eau situé en aval, selon la méthode proposée dans le tableau ci-dessous.

SOMME DES TOTAUX NUMERIQUES	AUGMENTATION HAUTEUR D'EAU
7	0,5
8	0,5
9	0,5
10	1
11	1
12	1
13	1,5
14	1,5
15	1,5
16	1,5
17	1,5
18	2
19	2
20	2
21	2
22	2
23	2,5
24	2,5

Après avoir associé pour chaque tronçon du réseau hydrographique une estimation de l'augmentation de la hauteur d'eau nous avons associé via une jointure spatiale ces valeurs aux profils en travers qui intersectent ces zones.

A partir de ces profils en travers (+ de 5000 sur la zone) un MNT au format TIN a été créé en se basant sur une méthode de lignes rigides malléable et en prenant l'altitude sol + l'augmentation ci-dessus qui simule une hauteur d'eau en cas de crue. Le MNT crée respecte l'emprise des profils en travers et interpole en tout point de cette zone les hauteurs d'eau ci-dessus.

Le MNT ainsi crée a été comparé avec le MNT de départ. Toutes les surfaces supérieures au MNT de départ sont par définition les zones impactées par une inondation qui suivrait les paramètres d'augmentation du niveau du cours d'eau.

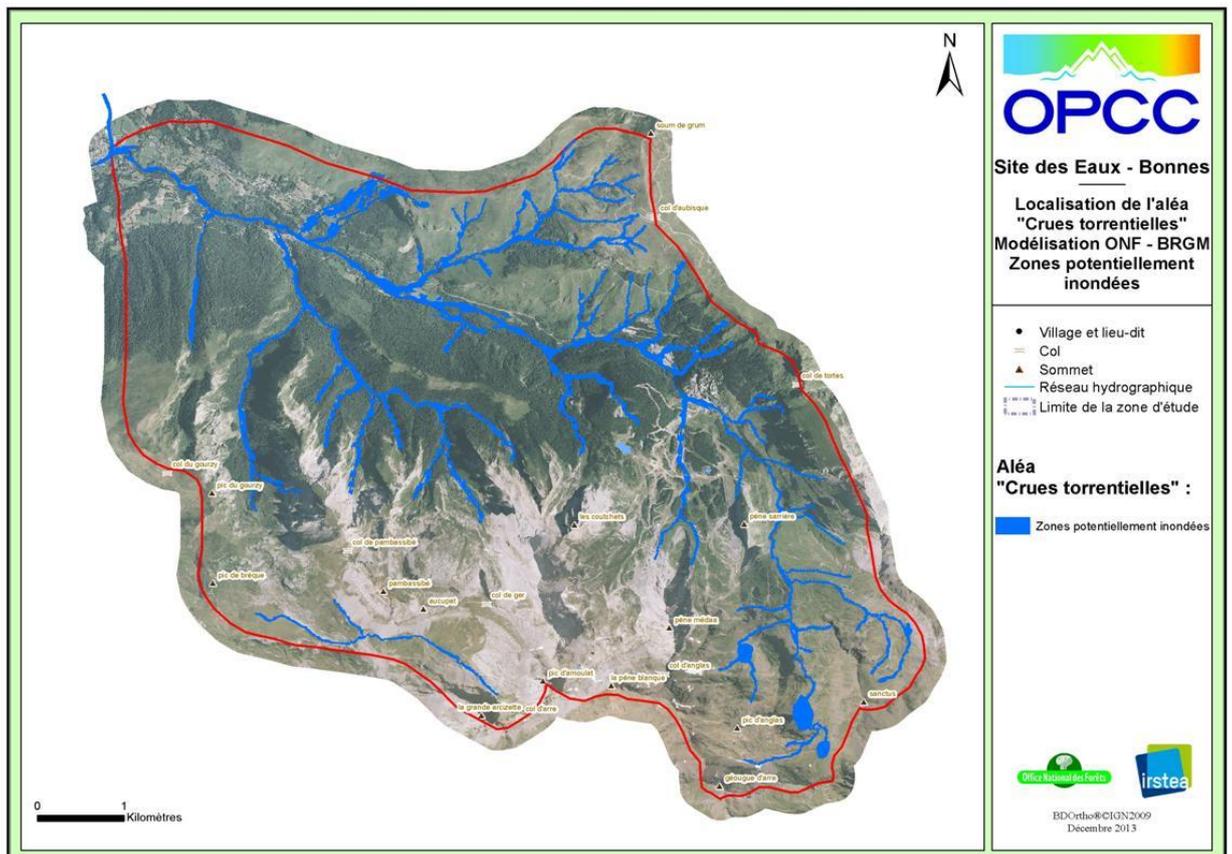


Figure 26: Zones potentiellement inondées

La carte ci-dessus montre donc les zones inondées pour une crue torrentielle potentielle.

Cette méthode critiquable sur certains points,

- le MNT à une précision de 5 m
- pas de prise en compte des hauteurs de berge
- pas de prise en compte des ouvrages de protection

Mais offre néanmoins quelques avantages :

- méthode automatisable, elle est donc rapide à effectuer sur n'importe quelle zone d'étude
- pas d'utilisations de logiciels de simulation de crue ou d'inondation très coûteux
- malgré un résultat critiquable, elle donne une idée générale assez précise de la zone d'extension des crues

ETAPE 4 – Définition des enjeux concernés

L'intérêt final de ce travail est bien sûr de pouvoir définir les enjeux réellement impactés au sein de la zone d'extension des crues.

Le tableau ci-dessous synthétise les enjeux directement concernés :

Enjeux	Unités	Enjeux totaux	Enjeux impactés	% enjeux impactés
habitat	Unité	575	93	16,2
Batiment industriel - commercial	Unité	5	1	20,0
Batiment agricole	Unité	27	2	7,4
Enjeux touristiques	Unité	37	17	45,9
Enjeux touristiques	ml	14231	1205	8,5
Enjeux publics	Unité	13	5	38,5
Patrimoine culturel	Unité	5	1	20,0
Réseau	ml	8592	1550	18,0
Voie de communication	ml	188739	15130	8,0
Voie de communication	Unité	557	216	38,8
Voie de communication (parking)	Unité	3	2	66,7
Forêts	ha	16492	376	2,3

ETAPE 5 – La cotation de l'aléa

Dans le cas retenu en l'espèce, c'est-à-dire la prise en compte de secteurs affectés par des crues torrentielles suivant l'augmentation théorique par classe de hauteur d'eau, la cotation de l'aléa s'effectue à l'échelle de zones homogènes au sein de la zone inondable.

On caractérisera le torrent selon trois secteurs (voir tableau ci-dessous) et on détermine la cotation générale de la surface affectée par l'inondation suivant des niveaux d'augmentation de la lame d'eau.

Aléa faible : Secteurs avec augmentation du niveau compris entre 0,5 et 1 mètre	Note 0
Aléa moyen : Secteurs avec augmentation du niveau compris entre 1 et 1,5 mètre	Note 2
Aléa fort : Secteurs avec augmentation du niveau compris entre 1,5 et 2,5 mètres	Note 3

II.2.4 - Aléa "Glissement de terrain"

□ *Définition de l'aléa*

Les glissements sont des déplacements sur une pente, le long d'une surface de rupture plane (glissement « plan »), courbe (glissements « rotationnels »), ou plus complexe, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseurs variables. La profondeur de la surface de rupture (ou surface de glissement) peut varier de quelques décimètres à quelques mètres (glissements dits superficiels) à plusieurs dizaines de mètres (glissements dits profonds). De façon plus exceptionnelle, cette profondeur peut atteindre plusieurs centaines de mètres dans le cas de glissements de versant de grande ampleur.

Les matériaux mobilisés peuvent concerner soit le substratum rocheux (roche marneuse ou schisteuse, roche très fracturée, lentille d'argile dans les formations molassiques, etc.), soit les formations superficielles (colluvions fines, moraines plus ou moins argileuses, couverture d'altération, produits résiduels argileux, marnes voire calcaires marneux, etc.).

Les volumes mis en jeu varient de quelques mètres cubes (glissements pelliculaires de talus par exemple) à plusieurs millions de mètres cubes.

Selon leur typologie, la dynamique des glissements est également très variable, avec des vitesses de déplacement comprises entre quelques millimètres par an et quelques dizaines de mètres par jours, expliquant ainsi (avec la profondeur de sols mobilisée) la grande diversité des dégâts pouvant être causés par ces phénomènes

Les coulées boueuses concernent le mouvement rapide d'une masse de matériaux remaniés, à forte teneur en eau et de consistance plus ou moins visqueuse. Elles prennent fréquemment naissance à l'aval, et par évolution, d'un glissement de terrain. Les coulées se produisent quasi-systématiquement à la suite de conditions météorologiques marquées par une forte pluviosité.

Les **facteurs permanents** essentiels (facteurs de prédisposition) aux glissements de terrain sont :

- La nature et la structure des terrains (constitution géologique) : les formations à forte teneur en argile, les formations fluvio-glaciaires, les colluvions, les flyschs, les couches d'altération de schistes ou de marnes sont parmi les formations les plus sensibles ;
- La pente est un critère essentiel de stabilité. Des glissements peuvent, dans des matériaux très argileux, se déclencher pour des inclinaisons du terrain naturel relativement faibles (de l'ordre de quelques degrés pour certaines formations aux caractéristiques mécaniques très médiocres)

Les **facteurs essentiels dans le déclenchement** des glissements (ou facteurs aggravants) sont :

- Les modifications du régime hydraulique (saturation du matériau, développement de pressions interstitielles, etc.). La présence d'eau modifie fortement les conditions de stabilité de certaines formations à constitution limono-argileuse prépondérante. Les épisodes pluvieux marqués sont à l'origine d'une grande partie des glissements de terrain, de même que les rejets d'eau anthropiques inadaptés ;
- les travaux de terrassement (déblais, surcharge dus à des remblais, etc.) ;
- l'érosion naturelle (ruissellements, ravinement, érosion de berges) ;
- Les vibrations des terrains (secousse sismique par exemple) ;

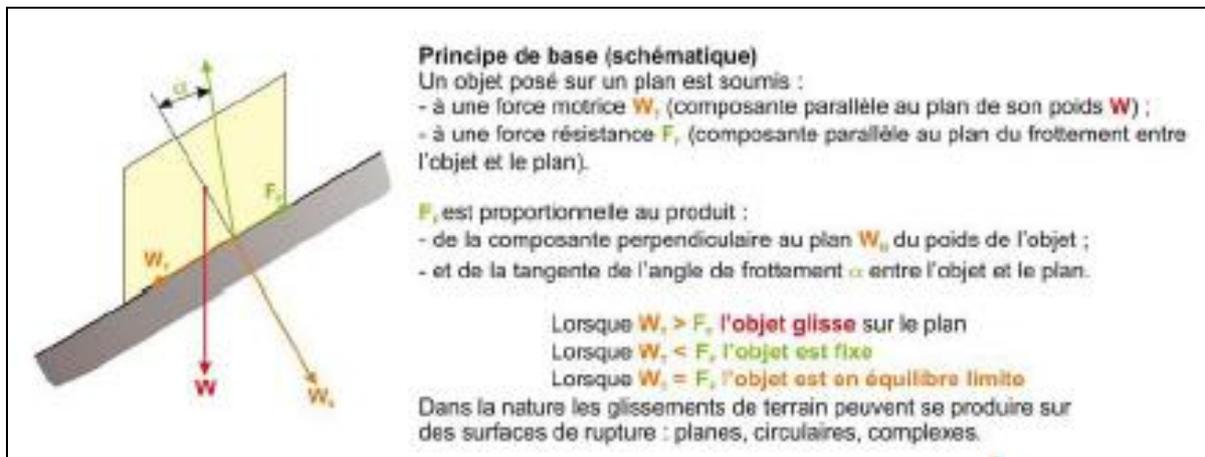


Figure 27 : Schéma de principe de la dynamique en jeu dans le phénomène de glissement (extrait du classeur « le risque de mouvements de terrain en Provence Côte-d'Azur », 2011 – BRGM, Région et DREAL PACA)

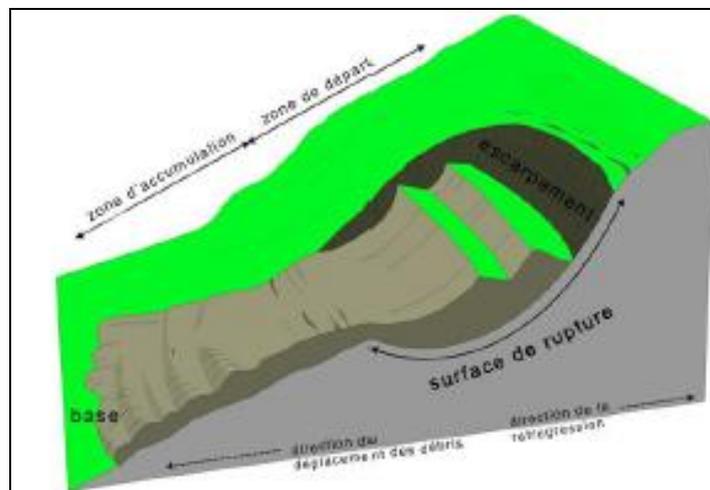


Figure 28 : Schéma de principe d'un glissement rotationnel

□ Méthodologie

→ Aspects généraux

Le programme de travail vise à établir une cartographie à l'échelle du 1/50 000 de l'aléa glissement de terrain sur les 4 zones de référence de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique.

Pour ce type de document, deux grandes approches méthodologiques sont principalement envisageables en fonction notamment du niveau de restitution souhaité en termes de zonage cartographique de l'aléa :

- Cartographie basée sur la susceptibilité des formations géologiques à l'apparition des phénomènes étudiés (oui ou non peut-on avoir un glissement de terrain au sein de telle formation géologique) ;
- Cartographie basée sur une hiérarchisation fine des niveaux d'aléa traduisant la probabilité d'occurrence d'un glissement d'intensité donnée au cours d'une période donnée.

La 2nde approche, pouvant être qualifiée de *probabiliste*, est difficilement envisageable (et assez peu souvent mise en œuvre), surtout sur une zone relativement étendue, compte tenu de la grande complexité de ce type d'analyse et de la multiplicité des facteurs entrant en jeu (typologie variable des glissements de terrain, difficultés d'évaluation des probabilités de déclenchement, etc.). La méthodologie proposée vise donc à traduire la susceptibilité des formations géologiques en place, au regard notamment du contexte géomorphologique local, à l'apparition d'une activité de type glissements de terrain. L'approche envisagée s'apparente ainsi à une démarche *qualitative*.

→ **Aspects opérationnels**

La finalité du projet est la production d'une cartographie informative des aléas de type glissement de terrain (y compris coulée de boue). La démarche proposée est basée, en premier lieu, sur une analyse de la susceptibilité des faciès géologiques en présence, croisée avec la topographie (facteurs dits *permanents*). Les cartes de susceptibilité produites s'apparentent à des cartes d'aléas dans le sens où la quantité (et/ou l'intensité) de phénomènes amenés à se déclencher dans un intervalle de temps donné (de plusieurs dizaines d'années au minimum), dans deux zones d'*aléa* définies distinctes, seront nécessairement différentes.

La méthode mise en œuvre repose sur les différentes étapes suivantes :

1. Collecte et mise en forme des données de base ;
2. Identification des événements historiques et zones actives avérées ; caractérisation des principaux événements recensés ;
3. Evaluation de la sensibilité intrinsèque au glissement ;
4. Détermination de seuils de pente par familles de formation ;
5. Evaluation du niveau de susceptibilité (~ aléa) au glissement ;
6. Validation experte.

La figure ci-après synthétise l'enchaînement de ces étapes de travail.

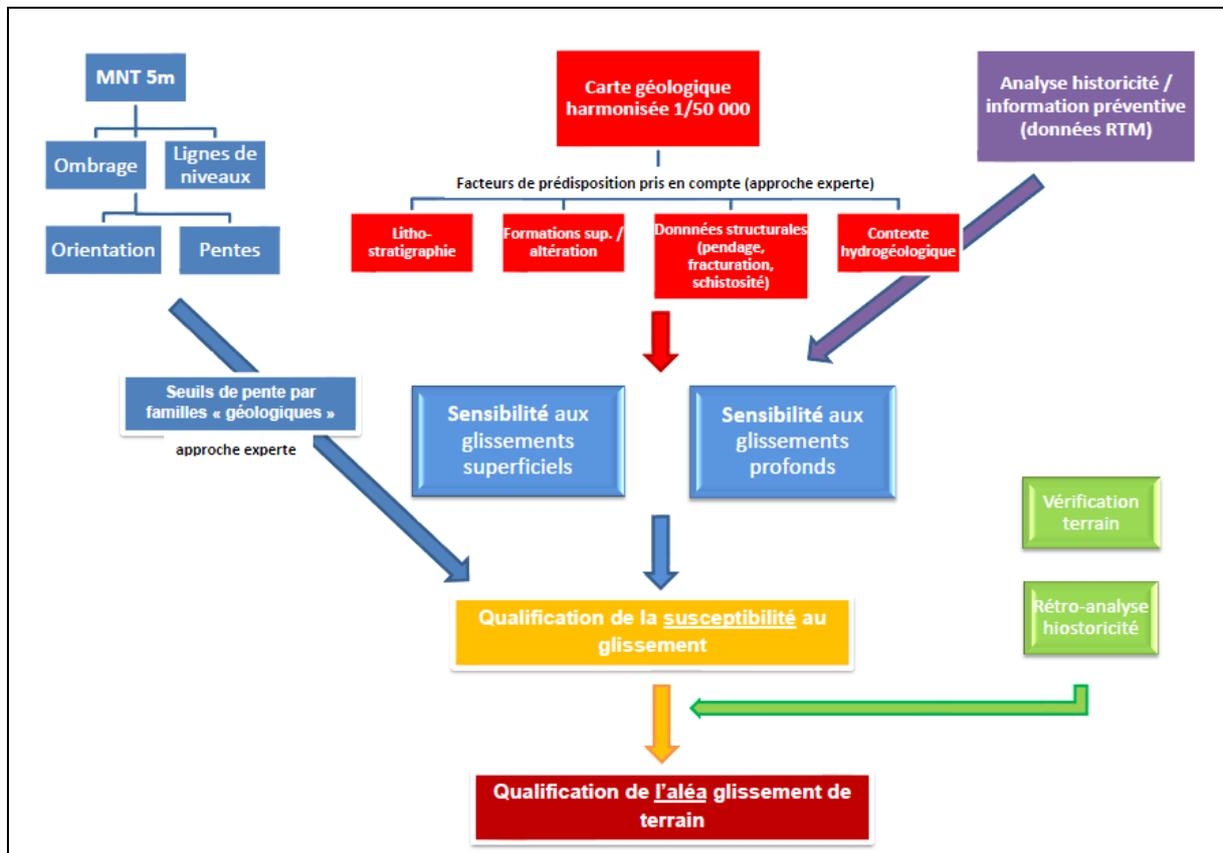


Figure 29 : Logigramme de l'évaluation de l'aléa glissement de terrain

ETAPE 1 – Collecte et mise en forme des données de base

Les principales sources de données et d'information exploitées pour les besoins de cette étape sont les suivantes :

- Carte géologique départementale vectorielle harmonisée au 1/50 000 (BRGM) ;
- Modèle Numérique de Terrain au pas de 5 m, acquis dans le cadre du projet OPCC, et cartographies dérivées ;
- Fonds topographiques au 1/25 000 (IGN) ;

Les figures ci-dessous présentent, pour la zone de référence de Laruns (Pyrénées-Atlantiques), une représentation du MNT et les principales dérivées issues de son traitement.

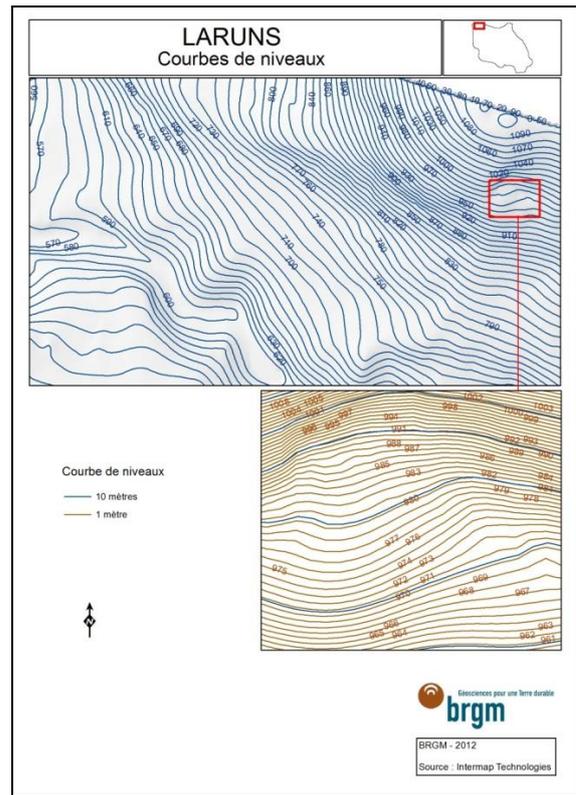
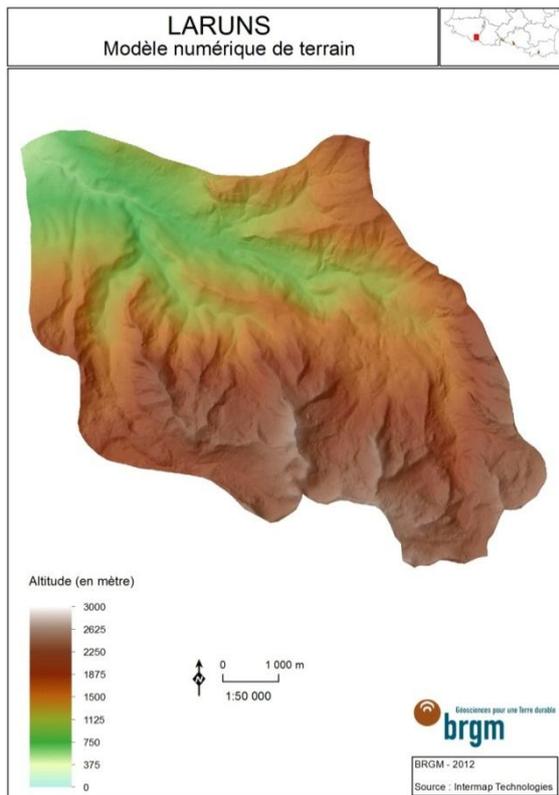


Figure 30 : MNT sur la zone de Laruns et extraction sur un secteur des courbes de niveaux

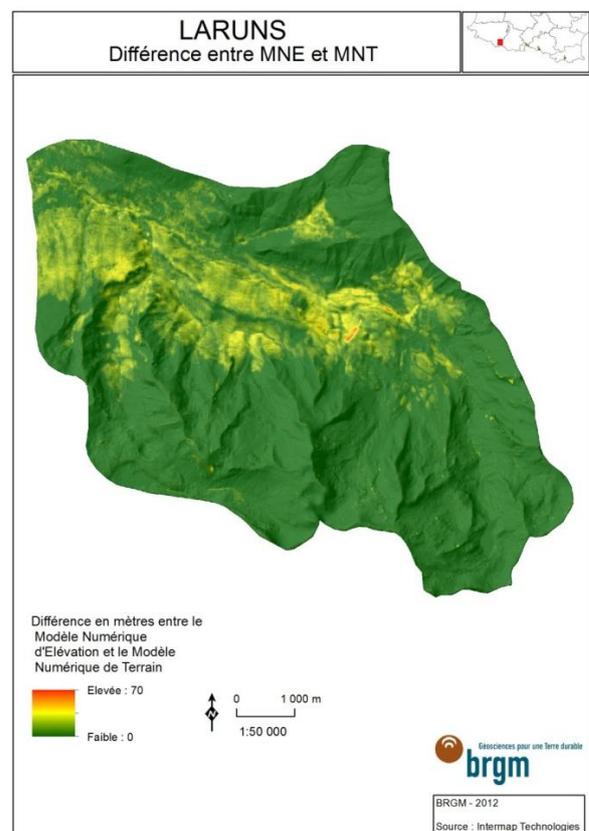
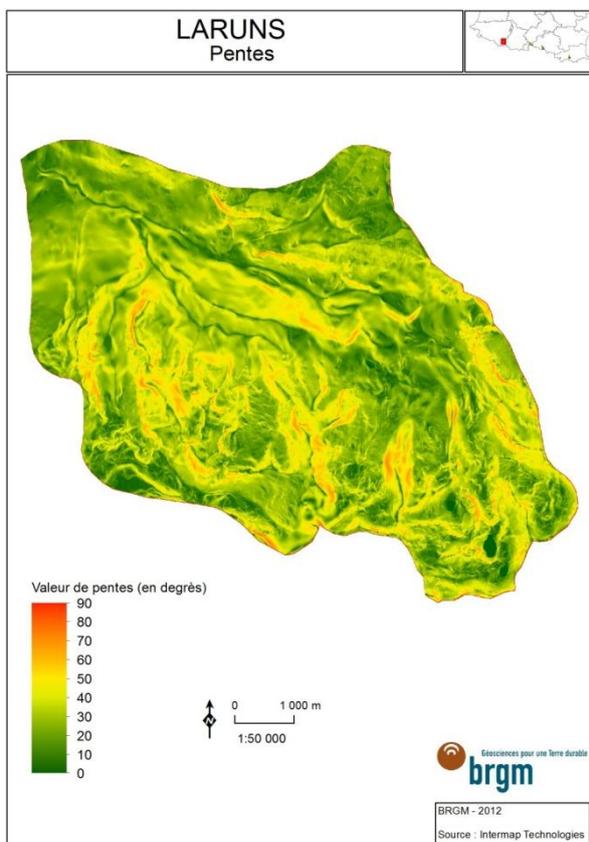


Figure 31 : Cartes des pentes et différence MNE/MNT - zone de Laruns

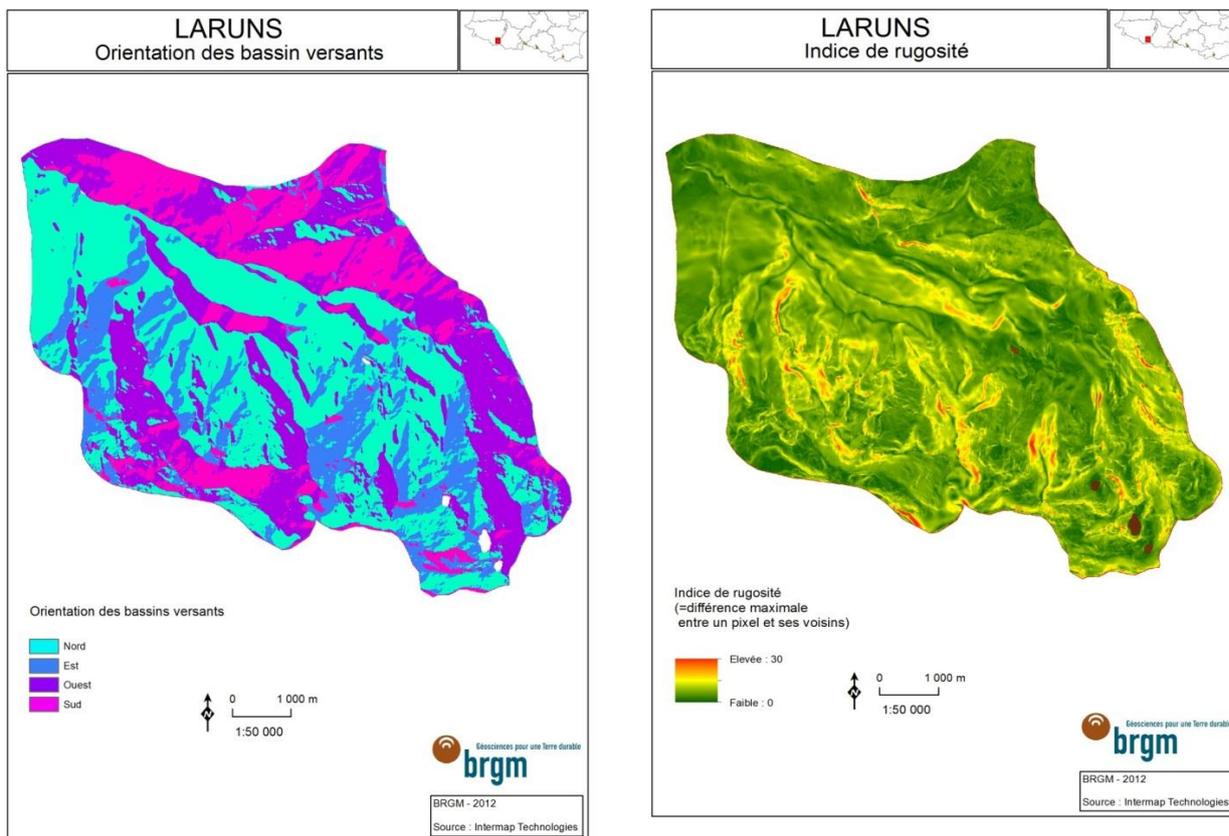


Figure 32 : Orientation des bassins versants et indice de rugosité issus du MNT - zone de Laruns

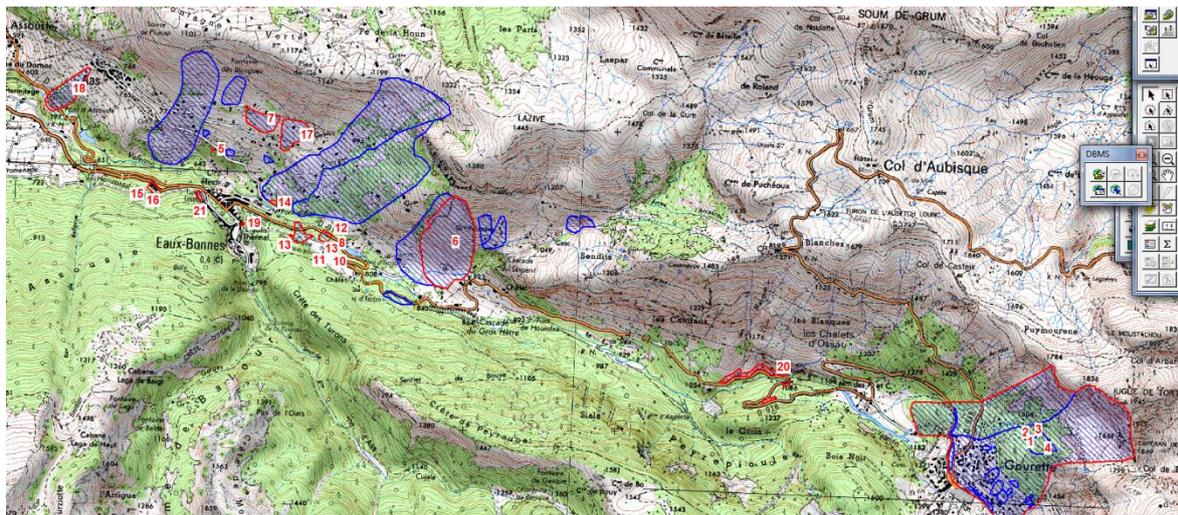
ETAPE 2 – Identification des événements historiques et zones actives avérées

La collecte des événements historiques constitue une étape essentielle de ce type de démarche dans la mesure où elle apporte un éclairage important sur la prédisposition d'une zone.

Les principales sources de données et d'information exploitées pour les besoins de cette étape sont les suivantes :

- Base de données nationale sur les mouvements de terrain, gérée par le BRGM (www.bdmvt.net) ;
- Base de données RTM, gérée par le service RTM (<http://rtm-onf.ifn.fr/>) ;
- Glissements de terrain récents et non intégrés dans la base de données nationale et autre connaissance de terrain (activité historique supposée ou avérée, appréciation sur la sensibilité des terrains) ;
- Cartographies existantes à vocation informative (CRISPY, etc.) ou réglementaire (PPR, etc.).

La figure suivante présente, respectivement sur les zones de référence de Laruns et St-Béat, les phénomènes historiques recensés à partir des sources d'information mobilisées.



RTM	Phénomène de l'événement	Nom du site	Date de l'événement	Précision sur la date de l'événement	Victimes ?	Dégâts ?	Perturbations ?	Autres précisions
1	Glissement de terrain	Gourette	05 octobre 1992	jour	non	oui	oui	
2	Glissement de terrain	Gourette	année 1992	année	non	oui	non	Glissement de terrain à l'ouest des chalets DINET et ALMEIDA
3	Glissement de terrain	Gourette	année 1992	année	non	oui	non	Glissement de terrain de grande ampleur
4	Glissement de terrain	Gourette	année 1996	année	non	non	non	
5	Glissement de terrain	Quartier de Vit	25 décembre 1993	jour	non	oui	non	glissement de terrain entraînant une coulée de boue
6	Glissement de terrain	Pleysses	août 1982	mois	non	oui	oui	glissement de Pleysses (3 000 000 m3)
7	Glissement de terrain	Pleysses	année 1936	année	non	oui	inconnu	
8	Glissement de terrain	Entre CD 918 et Chemin Impératrice - Rte Gourette	mai 1905	mois	non	oui	non	Eboulement sur la nouvelle route de Laruns au Eaux-Bonnes emportant un mur de soutènement dur 15 m
9	Glissement de terrain	Entre CD 918 et Chemin Impératrice - Rte Gourette	juillet 1897	mois	oui	oui	non	éboulement jusqu'au Valentin
10	Glissement de terrain	Entre CD 918 et Chemin Impératrice - Rte Gourette	24 septembre 1993	jour	non	oui	oui	Eboulement sur la RD 918 (proche événement semblable 1992)
11	Glissement de terrain	Entre CD 918 et Chemin Impératrice - Rte Gourette	23 octobre 1992	jour	non	oui	oui	glissement de terrain (terre, blocs, arbres) de 1500 m3
12	Glissement de terrain	Entre CD 918 et Chemin Impératrice - Rte Gourette	mars 1941	mois	non	oui	oui	Affaïsement
13	Glissement de terrain	Entre CD 918 et Chemin Impératrice - Rte Gourette	année 1992	année	non	oui	oui	Eboulement sur la RD 918
14	Glissement de terrain	Pont de Batault	17 mai 2004	jour	non	oui	oui	Glissement de terrain
15	Glissement de terrain	Promenade Horizontale	01 mars 1935	jour	oui	oui	non	Le talus situé sous la promenade horizontale s'est éboulé contre deux maisons de la famille Baratz, ce talus est constitué de sable glaciaire,
16	Glissement de terrain	Promenade Horizontale	octobre 1992	mois	non	oui	non	Glissement de terrain
17	Glissement de terrain	Soulane de Aas	année 1987	année	non	oui	non	Grand glissement de terrain au dessus de la grange Laborde, parcelle cadastrale n°85
18	Glissement de terrain	Soulane de Aas	année 1936	année	non	inconnu	inconnu	glissement de terrain sur le CIC 240 entre Assuste et les Eaux-Bonnes
19	Glissement de terrain	Promenade Eynard	octobre 1991	mois	non	oui	oui	éboulement
20	Glissement de terrain	Quartier le Goua	21 janvier 2005	jour	non	oui	inconnu	Ecrolement de terrain sous la RD918 allant du village des Eaux Bonnes à Gourette
21	Glissement de terrain	Village	Siècle 1977	siècle	non	oui	inconnu	glissement de terrain derrière le Casino des Eaux-Bonnes, d'une hauteur d'environ 35m.

Figure 33 : Données historiques - zone de Laruns

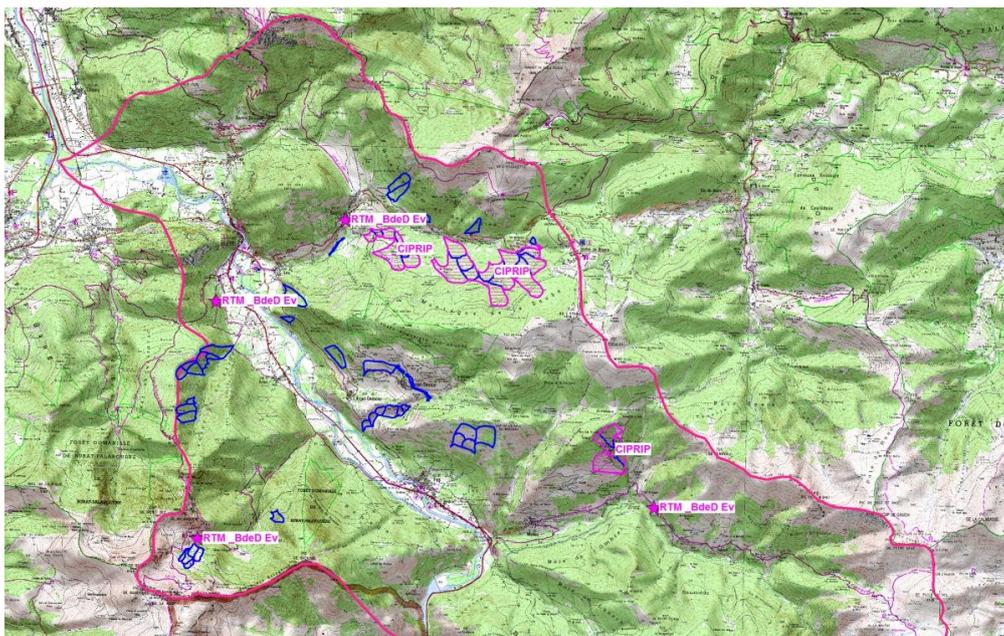


Figure 34 : Données historiques - zone de St-Béat
(en rose données BDMVT, en bleu données CRISPY « zones observées »)

ETAPE 3 – Evaluation de la sensibilité intrinsèque au glissement

L'objectif de cette étape est d'effectuer une évaluation du potentiel de déclenchement de glissement de terrain au regard des caractéristiques lithologiques et stratigraphiques des formations (des faciès similaires pouvant avoir des comportements différents en fonction de leur histoire géologique). Cette analyse a été réalisée pour chacune des formations géologiques présentes sur les zones de référence, en s'appuyant sur les cartographies géologiques départementales harmonisées. Une évaluation à dire d'expert a été réalisée sur les principaux facteurs suivants :

- Lithologie (faciès rocheux, rocheux tendre, rocheux plastique, meuble) ;
- Présence éventuelle et appréciation de l'épaisseur de la couverture superficielle (nature et type de terrain de couverture, tranche d'altération) ;
- Facteurs structuraux (fracturation, pendage, schistosité) ;
- Contexte hydrologique (favorable ou défavorable en fonction du potentiel de karstification, de la perméabilité, etc.) ;

L'appréciation de chacun de ces critères, associé au nombre d'événements historique recensés pour chaque formation, conduit à une appréciation (selon un code couleur – cf. figure 7) sur la sensibilité « intrinsèque » de chaque faciès vis-à-vis des phénomènes considérés. Ont été distinguées une sensibilité vis-à-vis des glissements superficiels (jusqu'à 5 m de profondeur environ) et une sensibilité vis-à-vis des glissements dits « profonds ».

PERIODE / AGE	CODE	NOTATION	DESCRIPTION	EPAISSEUR	FACTEURS DE PREDISPOSITION PRIS EN COMPTE				NOMBRE D'EVENEMENTS "GLISSEMENTS" RECENSES AU SEIN DE LA FORMATION	CLASSE DE SENSIBILITE					
					1-LITHOLOGIE NON ALTERE - R : rocheux dur - Rt : rocheux tendre - Rp : rocheux plastique - M : meuble	Note Litho	2-FORMATIONS SUPERFICIELLES ET ALTERATION (Mo : Moraines, C : Colluvions, E : Eboulis, All : Alluvions, A : Altérites)	Note Altération		3-DONNEES STRUCTURALES (FRACTURATION, SCHISTOSITE, PENDAGE)	Note structurale	4-CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE (F : favorable, DEF : défavorable)	Concentration d'écoulement	SENSIBILITE AUX GLISSEMENTS SUPERFICIELS	SENSIBILITE AUX GLISSEMENTS PROFONDS
Formations superficielles de pente (Quaternaire)															
Quaternaire	5	E	Eboulis actuels ou récents : cônes d'éboulis, limons et terres masquant parfois les terrasses, remaniement de moraines	Très variable	M - Meuble angulaire grossier hétérométrique ; Cimentation secondaire possible localement	E				Perméabilité moyenne à forte. Souvent le siège d'importantes circulations d'eau météoriques. Forte sensibilité aux variations de teneur en eau (chute de cohésion)	30				
	7	C	Colluvions : limons soliflués, loess colluvionnés, colluvions de fond de vallons, limons, sables argileux		M - Meuble grossier à fin, hétérométrique à hétérométrique ; Cimentation secondaire possible (localement grésification)	C		Néant : Pas de structuration, fracturation, ni pendage. Un litage est possible parallèlement à la pente.				4			
Formations superficielles fluvioglacière (Quaternaire)															
Quaternaire	13	LT	Comblement alluvial de cuvettes, alluvions lacustres, replats marécageux, tourbes	Très variable, d'après thèse Martini-Campana 25m max? sur Pleyssé	M - Meuble très fin (sablo-argileux riche en matière organique)					Niveau imperméable					
	19	Fz	Alluvions fluviatiles actuelles, subactuelles et Würm, sables, argiles, tourbes, galets, graviers, limons		M - Meuble angulaire à faiblement roulé	All									
	30	Fdy	Alluvions remanant des moraines du stade de retrait									18			
	23	Fz	Cônes de déjection tardif à postglaciaires												
	28	Gsb	Arcs et cordons du postglaciaire ancien				All-Mo								
	30	arcc	Arcs et cordons morainiques du tardiglaciaire et du postglaciaire						Néant : Pas de structuration, fracturation, ni pendage.			Perméabilité moyenne à forte. Souvent le siège d'importantes circulations d'eau météoriques. Forte sensibilité aux variations de teneur en eau (chute de cohésion)			
	35	GaM	Moraines d'altitude postglaciaire ancien		M - Meuble angulaire grossier hétérométrique	Mo									
	37	GaM	Moraines d'altitude tardiglaciaire												
38	GyM	Moraines anciennes en position basse : moraines du stade de retrait													
47	GaM	Stade d'extension maximum													
Couverture flyshoïdes ("nappe Crétacé" N-S)															
Campanien	117	c5(1)	Flysch argilo-gréseux et calcaire-marneux (niveaux de bancs calcaire-gréseux minces ("Pélagites") et de pelites.	100-200 m environ	R/R - Schisto-gréseux avec alternances de bancs durs et de bancs tendres	A - Développement d'altérites plus ou moins érolées (argiles à blocs) sur des épaisseurs variant de quelques mètres à potentiellement 20-30 m. Le contact altérites / substratum est un niveau fréquent de surface de glissement			Déformé, non schistosité. Factures peu exprimées - Fauchage possible des couches	Altérites globalement peu perméables, forte sensibilité aux variations de teneur en eau (chute de cohésion). Circulations préférentielles au contact altérites / roche saine préjudiciables à la stabilité					

Figure 35 : Extrait du tableau d'évaluation de la sensibilité au glissement sur la zone de Laruns

ETAPE 4 – Détermination de seuils de pente par familles de formation

Dans l'optique au cours de l'étape suivante d'effectuer un croisement litho-stratigraphie / morphologie, il a été définie pour chaque formation géologique des classes de pentes en fonction de leur « comportement » géotechnique apprécié sur la base des connaissances historiques au sein des zones d'étude et de l'expertise du BRGM. Les tableaux ci-dessous présentent, pour la zone de Laruns, les tableaux d'évaluation de la susceptibilité au glissement en fonction de la sensibilité (étape 3) et de ces classes de pente, pour 8 familles de formations en fonction de leurs caractéristiques mécaniques supposées.

Famille 1 : Colluvions

Sensibilité	Gradient de pente		
	0 – 3°	3 – 10°	>10°
Faible	Susceptibilité très faible	Faible	Moyenne
moyenne	Faible	Moyenne	Forte
forte	Faible	Forte	Forte

Famille 2 : Autres formations superficielles

Sensibilité	Gradient de pente		
	0 – 5°	5 – 10°	>10°
Faible	Susceptibilité très faible	Faible	Moyenne
moyenne	Faible	Moyenne	Forte
forte	Faible	Forte	Forte

Famille 3 : Couverture flyschöide de la nappe crétacée

Sensibilité	Gradient de pente		
	0 – 5°	5 – 20°	>20°
Faible	Susceptibilité très faible	Faible	Moyenne
moyenne	Faible	Moyenne	Forte
forte	Faible	Forte	Forte

Famille 4 : Couverture carbonatée de la Nappe Crétacé + formations à dominante calcaire du Socle Dévonien-Carbonifère

Sensibilité	Gradient de pente		
	0 – 10°	10 – 40°	>40°
Faible	Susceptibilité très faible	Faible	Moyenne
moyenne	Faible	Moyenne	Forte
forte	Faible	Forte	Forte

Famille 5 : Formations à dominante schisteuse du Socle Dévonien-Carbonifère (formations h₍₁₎, d₃₋₅ et d) + Socle Dévonien de la Nappe du Pic de Gourzy (série de Lariste d₆₋₇)

Sensibilité	Gradient de pente		
	0 – 5°	5 – 20°	>20°
Faible	Susceptibilité très faible	Faible	Moyenne
Moyenne	Faible	Moyenne	Forte
Forte	Faible	Forte	Forte

Famille 6 : Autres formations du Socle Dévonien-Carbonifère + Socle Dévonien de la Nappe du Pic de Gourzy (d₅₋₆)

Sensibilité	Gradient de pente		
	0 – 10°	10 – 40°	>40°
Faible	Susceptibilité très faible	Faible	Moyenne
moyenne	Faible	Moyenne	Forte
forte	Faible	Forte	Forte

Famille 7 : Granitoïdes

Sensibilité	Gradient de pente		
	0 – 20°	20 – 50°	>50°
Faible	Susceptibilité très faible	Faible	Moyenne
moyenne	Faible	Moyenne	Forte
forte	Faible	Forte	Forte

Famille 8 : Formations associées aux zones de faille

Sensibilité	Gradient de pente		
	0 – 5°	5 – 15°	>15°
Faible	Susceptibilité très faible	Faible	Moyenne
moyenne	Faible	Moyenne	Forte
forte	Faible	Forte	Forte

ETAPE 5 – Evaluation du niveau de susceptibilité au glissement (rendu cartographique)

Il s'agit ici d'effectuer par traitement SIG, le croisement entre litho-stratigraphie (sensibilité) et morphologie (classes de pente) pour évaluer la **susceptibilité** au glissement. L'échelle de validité de la cartographie produite est celle des cartes géologiques à partir desquelles la démarche est mise en œuvre (1 /50 000). La figure suivante présente l'évaluation du niveau de susceptibilité au glissement sur la zone de Laruns.

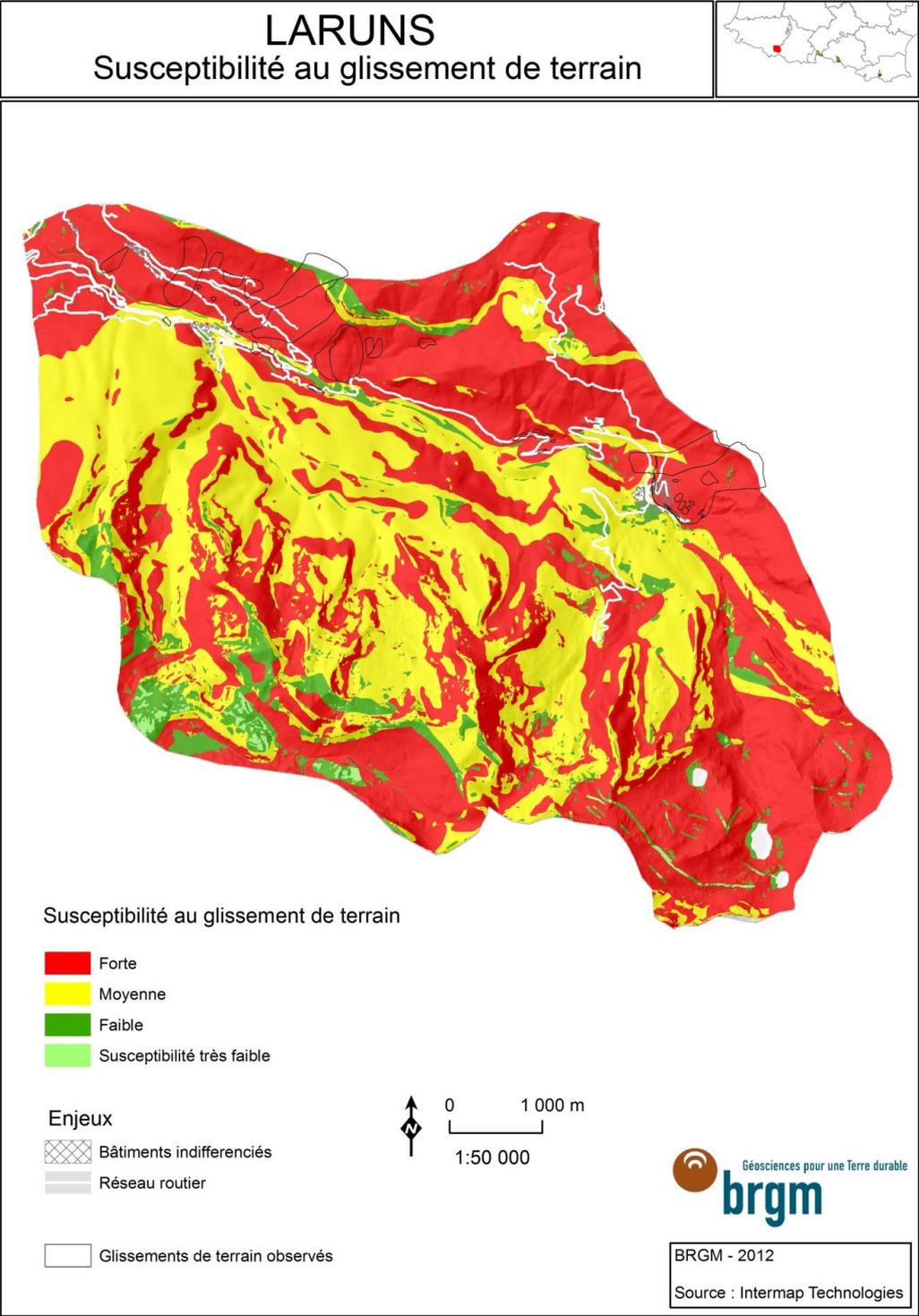


Figure 36 : Cartographie de susceptibilité au glissement - zone de Laruns

ETAPE 6 – Contrôle de la cartographie d'aléas produite et validation terrain:

Cette étape comporte les phases suivantes :

- contrôle de la cartographie par rétro-analyse à partir des événements qui auront été collectés (densité par faciès, occurrence, etc.), en fonction de l'expertise du BRGM sur ce thème ;
- contrôle de la cartographie à partir de la connaissance sur l'aléa glissements de terrain issue des documents d'information préventive ou réglementaire existants ;
- visites de terrain *a posteriori* visant à contrôler le zonage produit et à la prise en compte de facteurs aggravants locaux susceptibles d'avoir une influence sur la qualification des aléas. En fonction de ces investigations, des corrections éventuelles pourront être apportées, soit par évolution des méthodes de traitement SIG (seuils de pente), soit par modification relative à la susceptibilité de telle ou telle formation.
- croisement du rendu final avec la CRISPY (maintenant appelée la CIPRIP)

ETAPE 7– Cotation de l'aléa

La méthode de cartographie du phénomène glissement de terrain permet d'aboutir à une classification du niveau de susceptibilité au glissement de la zone étudiée.

Cette classification prend la forme d'une notation allant de 0 (susceptibilité très faible au glissement) à 3 (susceptibilité forte au glissement). C'est cette classification qui est directement reprise pour coter l'aléa.

Glissement de terrain	→ Susceptibilité très faible au glissement	0
	→ Susceptibilité faible au glissement	1
	→ Susceptibilité moyenne au glissement	2
	→ Susceptibilité forte au glissement	3

La méthode "traditionnellement" utilisée (notamment dans les Alpes du Nord et du Sud) consiste à coter l'aléa en fonction du facteur de profondeur (glissement inférieur ou supérieur à une profondeur de 2 mètres). Cette notion, bien qu'importante pour tenir compte de l'impact du couvert forestier sur l'activité du phénomène (donc utilisée dans la méthode de détermination de l'Indice de Maîtrise de l'Aléas), est toutefois difficile à mettre en œuvre à l'échelle de zones qui dépassent le simple événement et compte-tenu de l'échelle de validité des documents produits (elle-même liée à l'échelle des données d'entrée utilisées, à savoir 1/50 000). Il convient par ailleurs de considérer la grande diversité possible des phénomènes de glissement de terrain, et notamment le fait qu'une même formation géologique est en mesure de donner « naissance » à la fois à des glissements superficiels et à des glissements plus profonds (supérieurs aux 2 m. considérés).

II.3 – Synthèse concernant la réalisation des cartes d'aléas

Le travail réalisé et les nombreux échanges techniques nécessaires ont également conduit les partenaires à mettre en évidence certaines limites et contraintes.

Concernant les glissements de terrain, on peut identifier les limites suivantes :

- L'échelle de validité est limitée au 1/50 000, correspondant à l'échelle de validité de la donnée de « base » utilisée, à savoir la connaissance géologique ;
- Il manque des connaissances sur les formations superficielles, non représentées sur la carte géologique utilisée comme source d'information prépondérante dans la démarche et présentant globalement une forte sensibilité aux glissements de terrain;
Cela nécessiterait des reconnaissances de terrain pour affiner cette connaissance géologique ;
- Des informations de terrain susceptibles d'influencer sur la « sensibilité » des formations au glissement (indices d'activité de surface, présence de sources ou autres paramètres aggravants, etc.) ne sont pas prises en compte. Ces campagnes de terrain permettraient ainsi de « fiabiliser » les documents produits ;
- les seuils de pente adoptés mériteraient d'être confortés notamment à partir, *a minima*, d'une analyse bibliographique poussée et idéalement par une caractérisation géotechnique des formations *a priori* sensibles au phénomène ;
- des contrôles de terrain sont indispensables pour valider la caractérisation et la cartographie des aléas.

Et les points « forts » suivants :

- Il s'agit d'une démarche généralisable à un grand territoire permettant de mettre en évidence les zones de plus forte sensibilité sur lesquelles des approches complémentaires (suivi ponctuel de l'activité glissement, qualification des aléas à plus grande échelle, mise en œuvre d'une approche par modélisation, etc.) peuvent être envisagées en fonction notamment de l'importance des enjeux exposés;
- Il s'agit d'une démarche basée sur des MNT précis ;
- Il s'agit d'une démarche basée sur une approche SIG, rapidement mise en œuvre et renouvelable autant que de besoin en fonction d'une éventuelle amélioration des données d'entrée (géologie à échelle plus détaillée que le 1/50 000 utilisé, représentation et caractérisation géotechniques des formations superficielles, MNT « updaté », connaissance historique affinée ou événement récent, etc.) ;

Concernant les avalanches, les crues torrentielles ou les glissements, nous nous sommes d'emblée interrogés sur une méthode de cotation qui tienne compte de l'intensité du phénomène ainsi que sur sa période de retour. Or, cela ne rentre pas forcément dans le cadre de notre action : il s'agit en effet d'un élément que nous recommandons de développer. De même, la susceptibilité de la géologie à produire des blocs n'est pas prise en compte dans le modèle utilisé.

D'une manière générale, l'exactitude des cartes d'aléas sera renforcé par l'utilisation d'un MNT précis ; il convient d'ajouter également à cette limite le caractère exclusif d'une modélisation informatique qui se base sur des seuils stricts et rejette par principe des

situations hors seuil. Il s'agit en effet de modéliser informatiquement des phénomènes naturels : il convient donc d'en apprécier le caractère aléatoire et la difficulté à en extraire des règles immuables.

La concomitance et l'addition de plusieurs phénomènes naturels susceptibles d'aggraver le phénomène initial (ex. érosion + torrentiel, avalanche + torrentiel, glissement + torrentiel, etc.) doivent aussi être approfondis.

Enfin, tant pour les phénomènes "Glissement de terrain" que "Crues torrentielles", il est important de continuer le travail de recherche tant sur les modèles (ALICE par exemple) que sur les données à produire : bien qu'étudiés, ces aspects sont relativement émergents. Le travail réalisé sur le phénomène torrentiel mériterait notamment des approfondissements en ce qui concerne les aspects de modélisation tel que cela existe sur AVALANCHE ET CDB. En effet pour le moment le processus est automatisable mais uniquement sous système SIG.

Récapitulatif des notes d'aléa en fonction du type de phénomène et des caractéristiques du milieu :

Phénomène	Caractéristiques	Note d'aléa
Crue torrentielle	→ Aléa faible : Secteurs avec augmentation du niveau compris entre 0,5 et 1 mètre	0
	→ Aléa moyen : Secteurs avec augmentation du niveau compris entre 1 et 1,5 mètre	2
	→ Aléa fort : Secteurs avec augmentation du niveau compris entre 1,5 et 2,5 mètres	3
Glissement de terrain	→ Susceptibilité très faible au glissement	0
	→ Susceptibilité faible au glissement	1
	→ Susceptibilité moyenne au glissement	2
	→ Susceptibilité forte au glissement	3
Chutes de blocs	→ Blocs de volume moyen inférieur à 1 m ³	2
	→ Blocs de volume moyen supérieur à 1 m ³	3
Avalanche	→ Avalanches « potentielles »	1
	→ Avalanches constatées	3

Figure 37 : Récapitulatif des notes d'aléa en fonction du type d'aléa et des caractéristiques du milieu

III – CARTOGRAPHIE DES ENJEUX SOCIO-ECONOMIQUES

III.1 - Appréciation des enjeux socio-économiques

La note d'enjeux socio-économiques est une note traduisant l'importance des enjeux socio-économiques présents dans la zone cartographiée.

Le niveau de chaque enjeu est déterminé selon la grille présentée à la page suivante, établie par la délégation nationale RTM avec IRSTEA et validé par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement.

Quelques modifications ont toutefois été apportées à cette grille (à travers plusieurs échanges techniques entre partenaires) afin de la rendre compatible avec les différents enjeux socio-économiques du massif des Pyrénées (Français, Espagnol et Andorran).

III.2 - Enjeux socio-économiques multiples :

Le cas des enjeux multiples sur un même site est traité en considérant globalement que trois enjeux d'un niveau donné conduisent à passer au niveau de cotation supérieur :

- ⇒ un ou plusieurs enjeux forts, ou 3 enjeux moyens 3 ou $3 + 3$ ou $2 + 2 + 2$ = niveau 3
- ⇒ un ou deux enjeux moyens, ou 3 enjeux faibles 2 ou $2 + 2$ ou $1 + 1 + 1$ = niveau 2
- ⇒ un ou deux enjeux faibles----- 1 ou $1 + 1$ = niveau 1
- ⇒ enjeux nuls, ou absence d'enjeu----- $0 + 0 + 0$ = niveau 0

Dans le cas d'enjeux multiples de différents niveaux ($1 + 2 + 3$ ou $2 + 2 + 3$), on retient la cotation la plus élevée.

III.3 - Enjeux indirectement exposés :

Les éléments précédents permettent l'identification et la cotation des enjeux directement exposés, qui se trouvent à l'intérieur de l'unité fonctionnelle d'aléa. Des enjeux situés plus loin peuvent également être indirectement menacés par l'aléa.

Cela concerne essentiellement les aléas érosion, crue torrentielle et glissement de terrain, pour lesquels il existe généralement au moins un enjeu faible à l'aval. Ces enjeux indirectement exposés se voient attribuer un poids décroissant de l'amont vers l'aval, selon leur position par rapport à l'unité d'aléa.

Le recensement réalisé par les services RTM permet d'identifier des sites "dépendants" et d'affecter automatiquement à chaque unité d'aléa le niveau d'enjeu résultant.

TABLEAU DE SYNTHESE PROPOSE POUR LE MASSIF DES PYRENEES

Type d'enjeu/ Niveau d'enjeu (cotation)	3 (Elevé)	2 (Moyen)	1 (Faible)	0 (Nul)
Habitat	Dense, plus de 10 logements	Dispersé, 2 à 10 logements	Habitation isolée	Sans
Voie de communication (route, rail)	Voies structurantes, y compris axes intercommunaux	Voies d'intérêt infra communal, Accès unique d'un pôle important d'activités	Voie de desserte publique ou privée locale, Parking public,	Chemin et piste non carrossable (y compris pistes forestières).
Réseaux	Ligne très haute tension (THT), gazoduc	Lignes HT et MT (≥ 20 kv)	Conduite forcée, Ligne de distribution locale d'électricité, d'eau ou de gaz	Réseau des particuliers
Tourisme	Equipements avec hébergement (ex. : camping, centre de vacances, colonie de vacances, hôtel)	Equipements sans hébergement (piscines publiques, domaines skiables des stations, y compris pistes et remontées mécaniques, ...)	Sites touristiques aménagés (Chemins et sentiers de randonnée, Parcours de pêche et Itinéraire de canoë, Aire de pique-nique aménagée).	
Industries et commerces	Centre industriel, Centre commercial	Commerces isolés, artisans	Entrepôts et garages sans personnel permanent.	
Agriculture		Coopérative agricole, Siège d'exploitation	Bâtiment agricole sans hébergement, terres agricoles cultivées	Equipements agricoles démontables, terres agricoles non cultivées, parcours pastoraux.
Forêt			Routes forestières (intercommunale, locale), Peuplement forestier de production	Espaces naturels (classés ou non), peuplements forestiers sans enjeu de production
Patrimoine culturel		Monument/Bâtiment historique (classé) visité ou non		
Autres enjeux publics	Hôpital, Centre d'incendie et de secours, Ecole, Maison de retraite	Captage d'eau, Réservoir d'eau communal, Station d'épuration	Antenne de télécommunication	Ouvrages de protection active ou passive

Figure 38 : Appréciation des enjeux socio-économiques

III.4 - Notion d'unité d'aléa-enjeu :

Le croisement ou la combinaison des unités fonctionnelles d'aléas avec les enjeux socio-économiques génère des unités d'aléa-enjeu. Une **unité d'aléa-enjeu** est une zone géographique caractérisée par une même notation d'aléa et une même notation d'enjeu.

Le plus souvent, les unités d'aléa-enjeu ont les mêmes limites que les unités fonctionnelles d'aléa dont elles découlent. Dans certains cas, cependant, la situation ou le niveau des enjeux peut imposer de découper l'unité fonctionnelle d'aléa en plusieurs unités d'aléa-enjeu. Cela peut se produire pour les glissements de terrain lorsqu'une partie seulement du glissement engendre un risque, pour les chutes de blocs avec des enjeux ponctuels sous un versant étendu, pour un versant avalancheux dont une partie menace un chalet, etc.

III.5 – Rendus cartographiques :

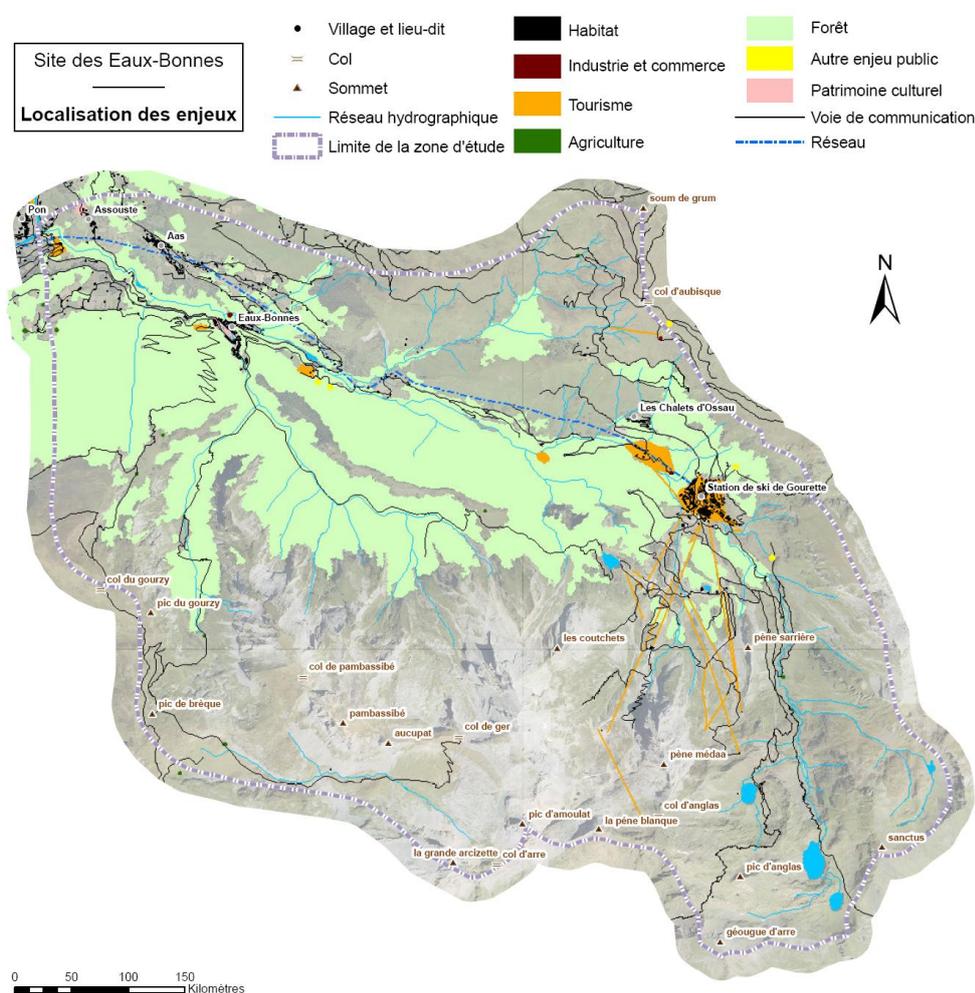


Figure 39 : Exemple de cartographie de localisation des enjeux socio-économiques

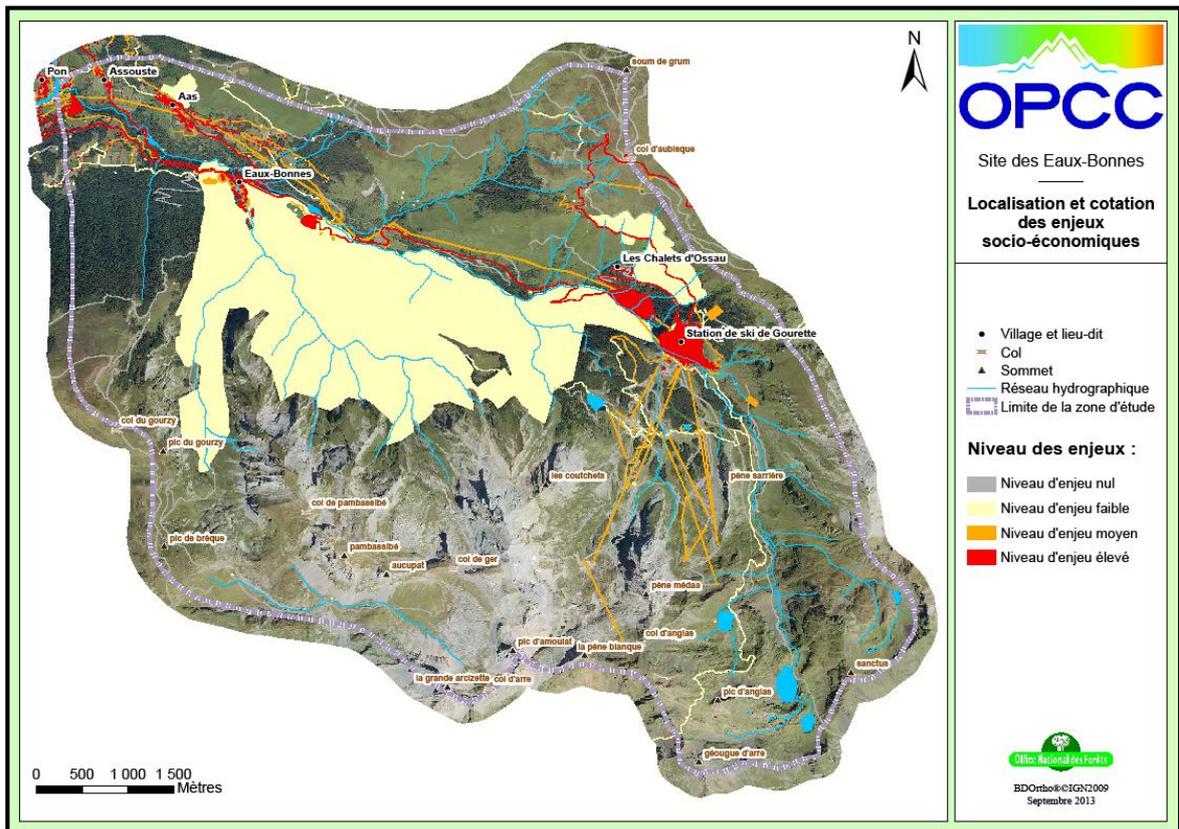


Figure 40: Exemple de cartographie de cotation des enjeux socio-économiques

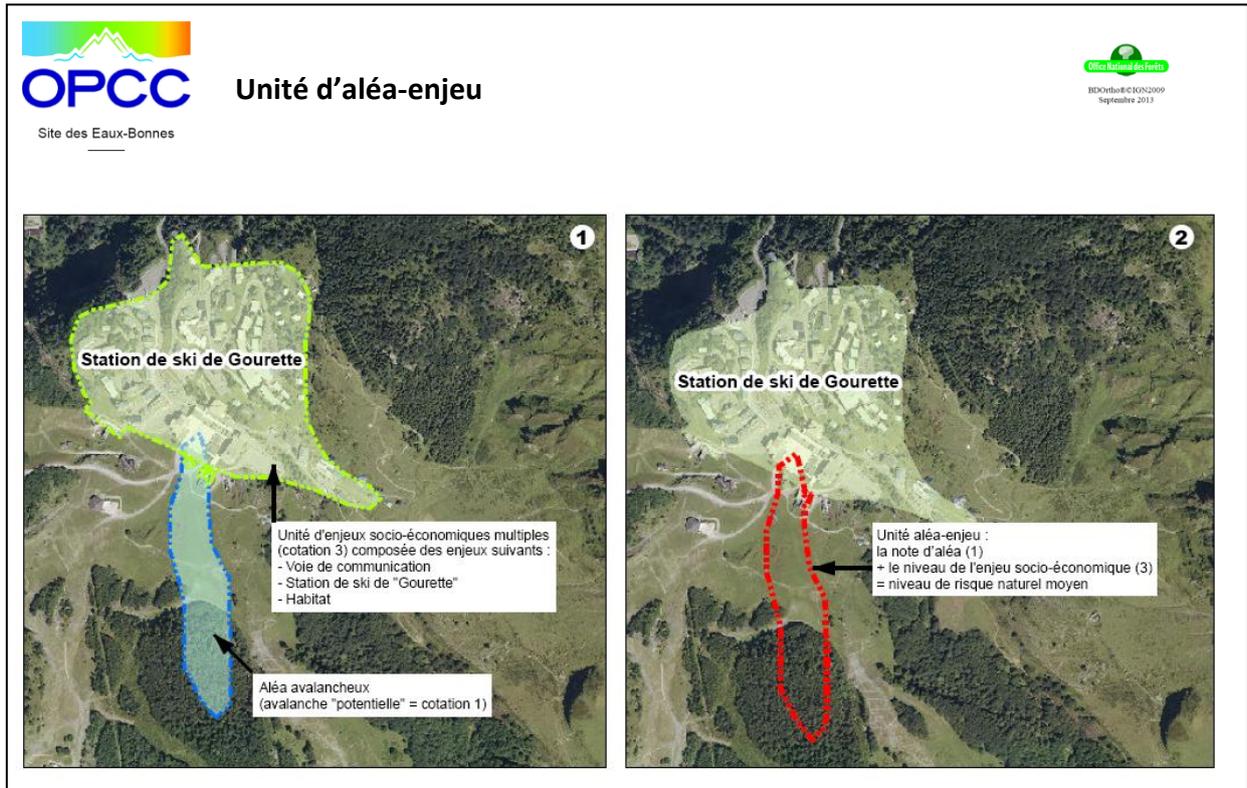


Figure 41 : Exemple de cartographie d'unité d'aléa-enjeu

IV – CARTOGRAPHIE DES RISQUES NATURELS

IV.1 - Notion de risque naturel

Un risque naturel est une menace qu'un aléa naturel fait peser sur des enjeux socio-économiques identifiés.

Un niveau de risque jugé trop élevé impose des interventions pour maîtriser l'aléa. Par contre en l'absence d'enjeux socio-économiques, un aléa même fort ne justifie pas de mesures spécifiques au titre de la protection.

IV.1 - Détermination du niveau de risque naturel :

La détermination du niveau de risque est classiquement réalisée en croisant la note d'aléa et le niveau d'enjeu socio-économique de chaque unité d'aléa-enjeu.

		Niveau d'enjeu socio-économique			
		Nul 0	Faible 1	Moyen 2	Fort 3
Note d'aléa	0	Risque nul	Risque nul	Risque nul	Risque nul
	1	Risque nul	Risque faible	Risque faible	Risque moyen
	2	Risque nul	Risque faible	Risque moyen	Risque fort
	3	Risque nul	Risque moyen	Risque fort	Risque fort

Figure 42 : Appréciation du niveau de risque naturel

Les notes d'aléa ne tenant pas compte de la présence éventuelle d'ouvrages ou de peuplements, il en est de même des niveaux de risques obtenus.

En cas d'aléas multiples, on retient l'évaluation maximale. Il ne paraît en effet pas utile d'ajouter les aléas dans la mesure où aucune considération de fréquence n'est prise en compte.

IV.2 – Rendu cartographique :

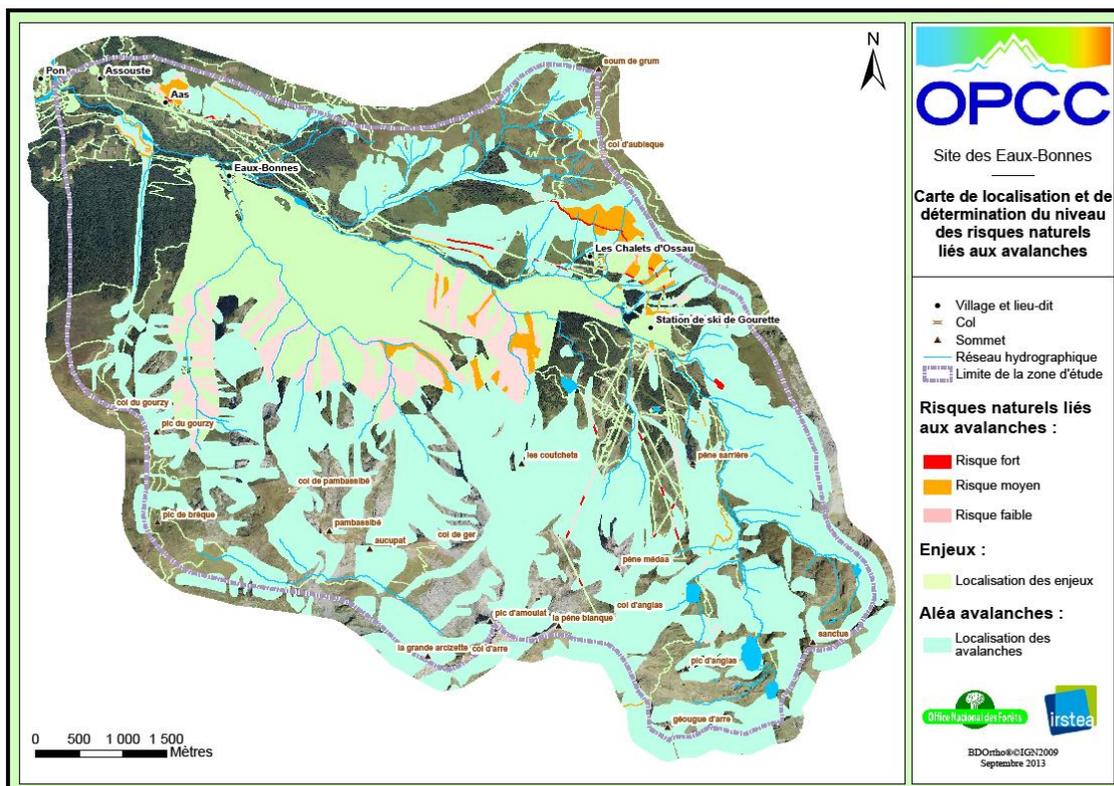


Figure 43 : Appréciation cartographique du niveau de risque naturel

A l'issue de cette phase, on est en mesure de répondre au premier objet de ce travail, à savoir « caractériser à l'aide d'outil SIG l'évolution des territoires à fort risque naturel ».

Le principe proposé est donc le suivant :

Sur la base de ce travail cartographique qui permet d'aboutir à l'appréciation du niveau de risque naturel sur une zone d'étude, un calcul sous logiciel SIG est effectué afin de définir la surface soumise à un niveau de RISQUE FORT, à un niveau de RISQUE MOYEN et à un niveau de RISQUE FAIBLE.

Le suivi quinquennal de cet indicateur permettra d'évaluer l'évolution cartographique des territoires à fort risque naturel ».

V – DEFINITION DU RÔLE ACTUEL DE LA VÉGÉTATION FORESTIÈRE

V.1 - Cartographie de la végétation forestière :

Contrairement à ce qui était initialement envisagé, les données utilisées ne sont pas issues de la cartographie des peuplements forestiers et de l'occupation du sol réalisée dans le cadre du projet INTERREG IIIA « SILVAPYR » mais de la cartographie des formations forestières des Pyrénées réalisée dans le cadre de l'action télédétection de l'OPCC à partir de série temporelles MODIS.

Cette cartographie de référence présente plusieurs avantages :

- les données forestières sont de bonne qualité et récentes,
- la précision géographique est très bonne
- la typologie est fine
- La nomenclature forestière est cohérente et homogène à l'échelle du massif
- Elle intègre la Principauté d'Andorre, que n'intégrait pas la carte SILVAPYR

La BD Forêt a été construite par l'École d'Ingénieurs de Purpan (Action télédétection de l'OPCC) à partir de données forestières sources collectées auprès des organismes de gestion compétents de chaque territoire concerné, à savoir :

- pour la France, l'Inventaire Forestier National (IFN) et ses inventaires départementaux disponibles en deux versions et pour des années d'inventaire différentes selon les départements (BD IFN V1 de 1996, 1999 ou 2001 ; BD IFN V2 de 2006 ou 2008),
- pour l'Espagne, la Mapa Forestal de España (MFE), dont les inventaires ont été réalisés entre 2000 et 2005 pour les Communautés Autonomes concernées,
- pour l'Andorre, la Mapa Forestal del Principat d'Andorra (MFPA), révision de 2002.

Ces données source sont très hétérogènes, tant en ce qui concerne la nature des informations communiquées (nomenclatures hétérogènes des formations végétales) que leur méthodologie de caractérisation (typologies distinctes, soit basées sur la prépondérance des essences, soit sur la densité des peuplements).

Afin de répondre à l'objectif de lisibilité et d'exploitation des connaissances à l'échelle des Pyrénées, une cartographie forestière de l'ensemble du massif a été constituée par un traitement de fond des données sources (analyse de l'ensemble des contenus, tri et reclassement des inventaires) pour retranscrire l'information sous la forme d'une nomenclature forestière cohérente et homogène à l'échelle du massif. Cette nomenclature, structure l'information selon un code et un libellé pour chacune des formations forestières et sub-forestières.

Cette cartographie forestière a été complétée par des données complémentaires : zone d'étude, masque des zones non forestières, données géographiques, administratives ainsi qu'une série d'images à moyenne résolution spatiale (images MODIS, produit MOD13Q1) entre 2000 et 2013.

Le système de projection global de la BD Forêt est le Lambert 2 étendu, NTF (informations détaillées).

Une présentation détaillée de la méthodologie de constitution de la carte de référence est consultable dans le document intitulé : "OPCC, cartographie des formations forestières des Pyrénées à partir de série temporelles MODIS - Création d'une carte forestière de référence".

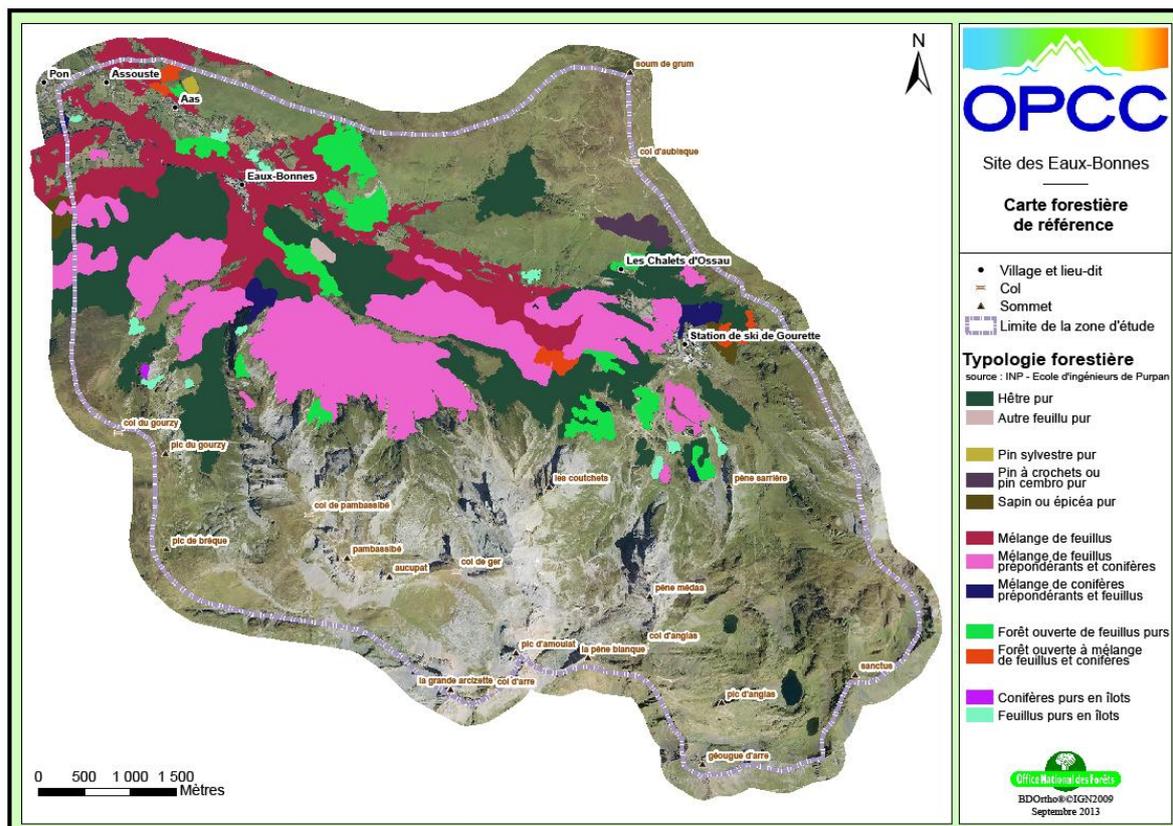
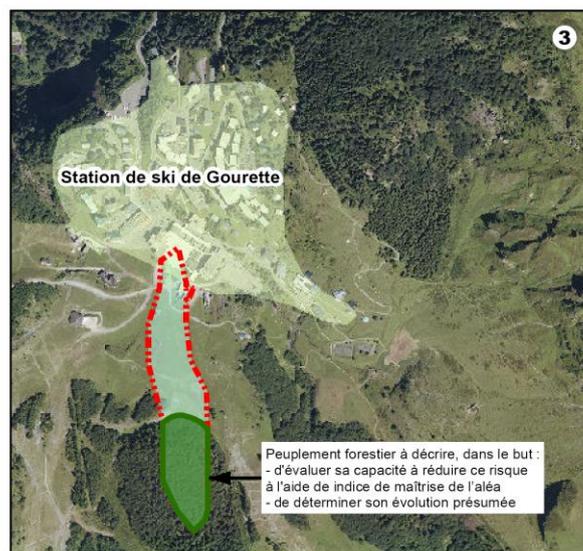
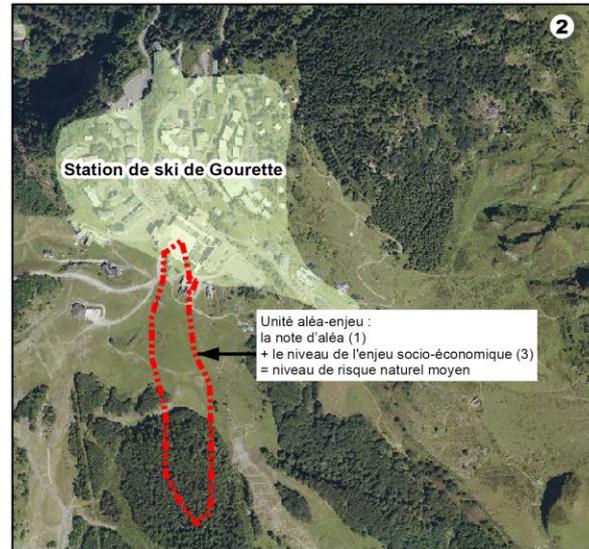
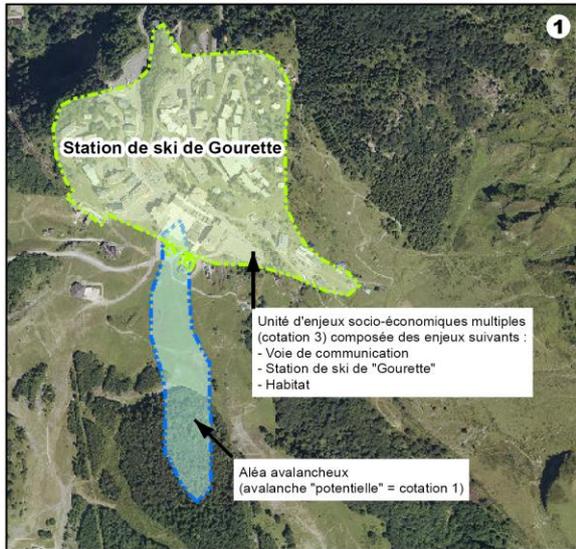


Figure 44 : Extrait de la carte forestière de référence sur la zone de référence des Eaux-bonnes

V.2 - Définir le rôle actuel de la végétation avec l'indice de maîtrise de l'aléa local :

Une fois la végétation identifiée sur la zone concernée, le rôle de la forêt et de la végétation dans la protection contre les aléas naturels doit être évalué à l'échelle d'une unité d'aléa-enjeu :

- Les unités aléa-enjeu combinées à de la végétation ayant un rôle de protection avéré ;
- Les unités aléa-enjeu pour lesquelles la végétation n'a pas un rôle de protection avéré ;
- Les espaces sans aléa ou sans enjeu.



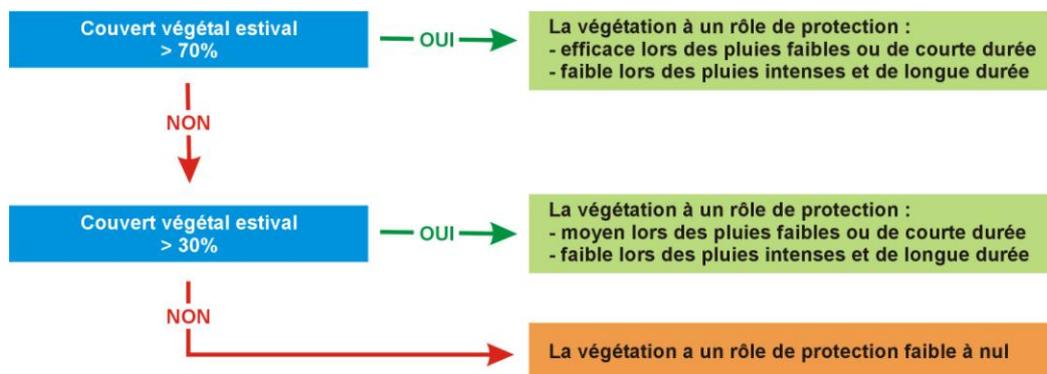
Ce rôle actuel de la végétation à réduire le risque vis-à-vis d'enjeux socio-économiques menacés par un ou plusieurs aléas est évalué par **l'Indice de Maîtrise des Aléas**. L'indice sera d'autant plus élevé que cette capacité de réduction du risque sera forte.

La note de l'IMA varie de 0 (efficacité nulle de la végétation vis-à-vis de l'aléa) à 6 (efficacité maximale de la végétation vis-à-vis de l'aléa) et la façon de l'évaluer varie également selon le type d'aléa.

Les méthodes de détermination (schémas) et d'évaluation de la note d'IMA (matrice) sont présentées ci-après. La détermination de cet IMA nécessite des données dendrométriques précises issues d'aménagements forestiers récents ou relevés sur le terrain.

Les crues torrentielles

Zone de départ : bassin versant de montagne

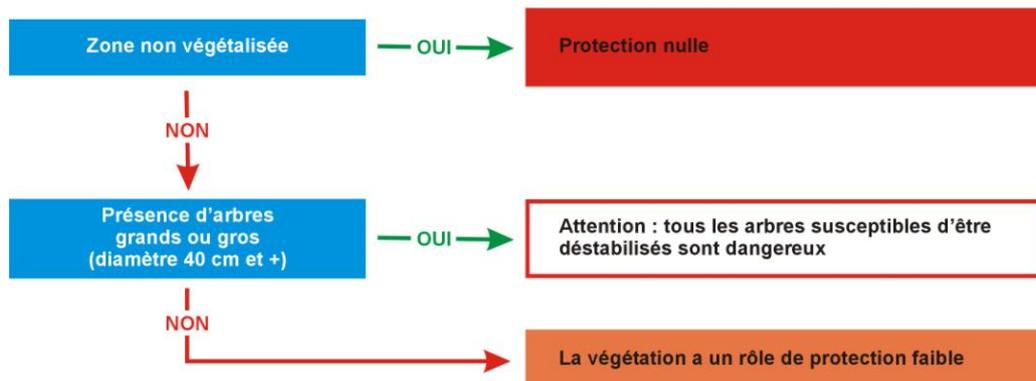


Indice de maîtrise de l'aléa IMA

ZONE DE DEPART*	Zone de départ = bassin d'alimentation	Couvert végétal en été (%) <i>arbres + arbustes + herbacées</i>		
		< 30%	30 - 70%	> 70%
		0	2	3

RAPPEL IMPORTANT : l'IMA "crues torrentielles" pour la zone de départ n'est décrit que pour la partie méditerranéenne du guide. Il n'est pas décrit pour la partie hors zone méditerranéenne.

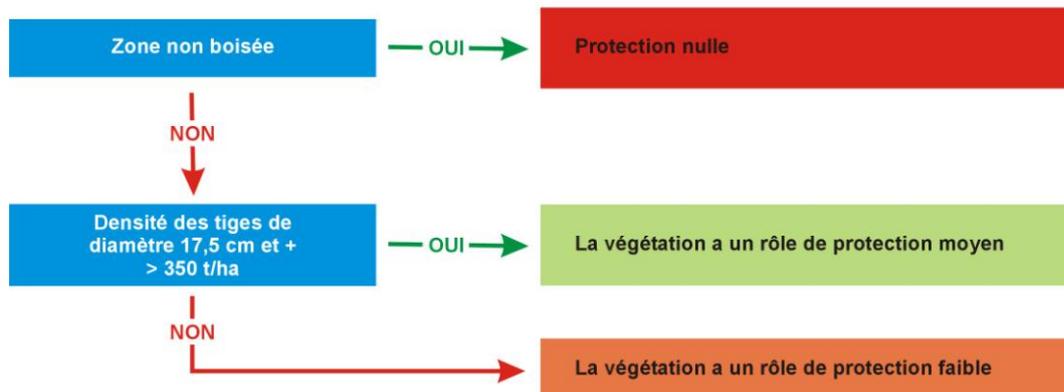
Zone de transit : lit et berges du torrent



Indice de maîtrise de l'aléa IMA

ZONE DE TRANSIT	Zone de transit = lit et berges du torrent	Zone non végétalisée <i>ni arbres, ni arbustes; ni herbacées</i>	Zone végétalisée	
			Présence bois 40cm et +	Absence bois 40cm et +
		0	0	2

Zone de dépôt : cône de déjection



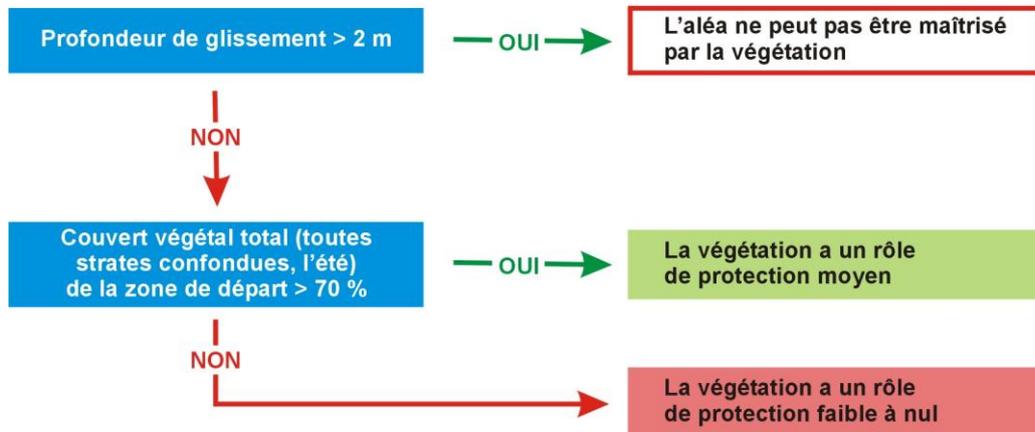
Indice de maîtrise de l'aléa IMA

		Zone non boisée	Zone boisée : densité de tiges (N/ha) de Ø 17,5 et +	
			N < 350	N > 350
ZONE DE DEPOT	Zone de dépôt = cône de déjection	0	2	4

Pour cet aléa, l'IMA est déterminé à l'échelle globale de chaque zone (départ, transit, dépôt) et non pas à l'échelle des peuplements élémentaires. Chaque zone peut comprendre des peuplements différents.

Les glissements de terrain

Partie de versant en glissement



Pour cet aléa, l'IMA est déterminé à l'échelle globale du glissement de terrain, et non pas à l'échelle des peuplements élémentaires. L'ensemble du glissement peut comprendre des peuplements différents.

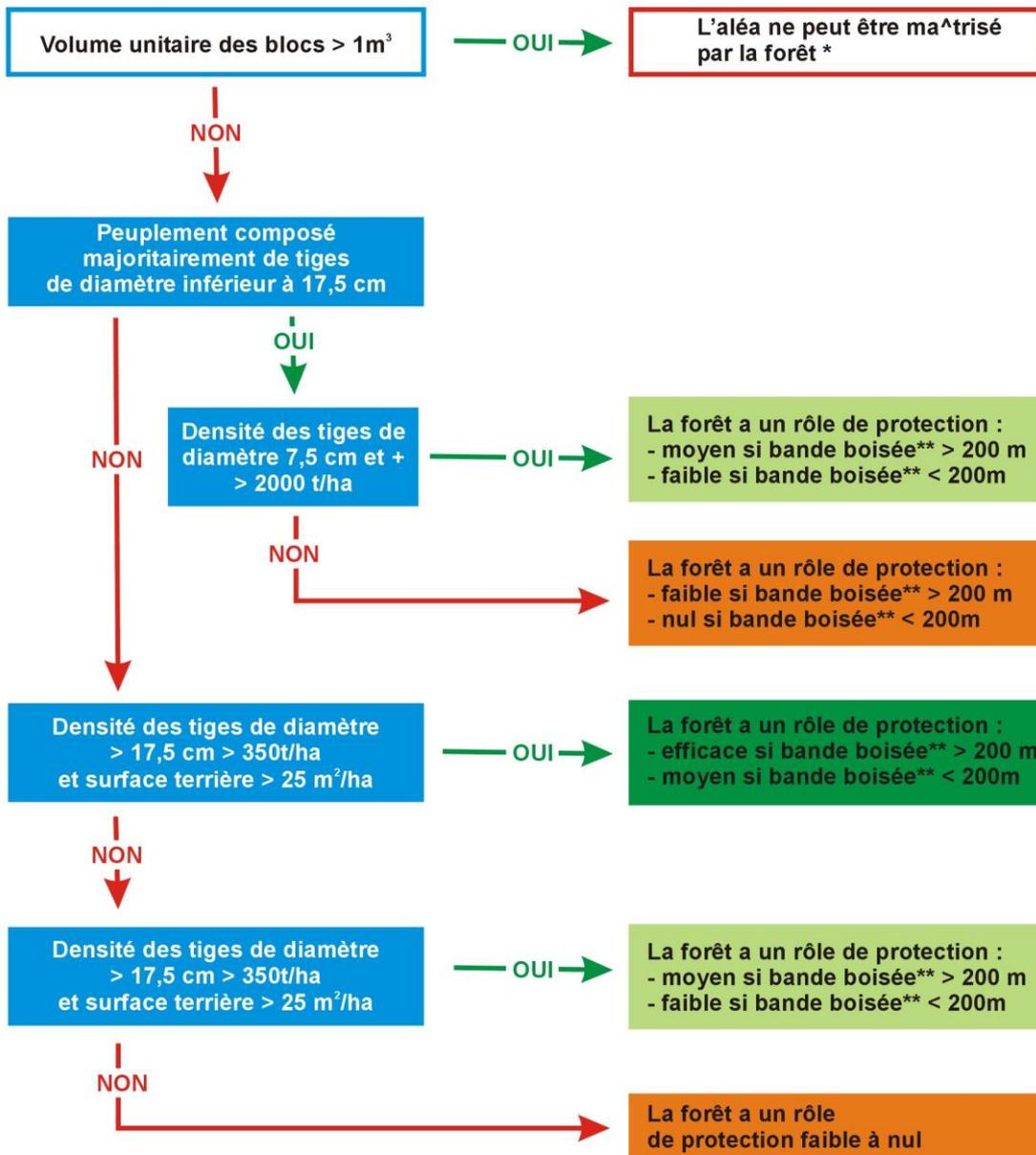
Indice de maîtrise de l'aléa IMA		Couvert végétal total en été (%) <i>arbres + arbustes + herbacées</i>	
		< 70%	> 70%
PROFONDEUR DU GLISSEMENT	Glissement > à 2 m	0 : la végétation n'a aucun rôle de maîtrise de l'aléa	
	Glissement < à 2 m	0	3

Les chutes de blocs

Dans la zone de départ

La forêt n'a pas de rôle de protection;
au contraire, les arbres instables peuvent déchausser des blocs

Dans la zone de transit et de dépôt



* Le maintien de la forêt est bénéfique même lorsqu'elle ne peut, à elle seule, assurer une protection efficace.

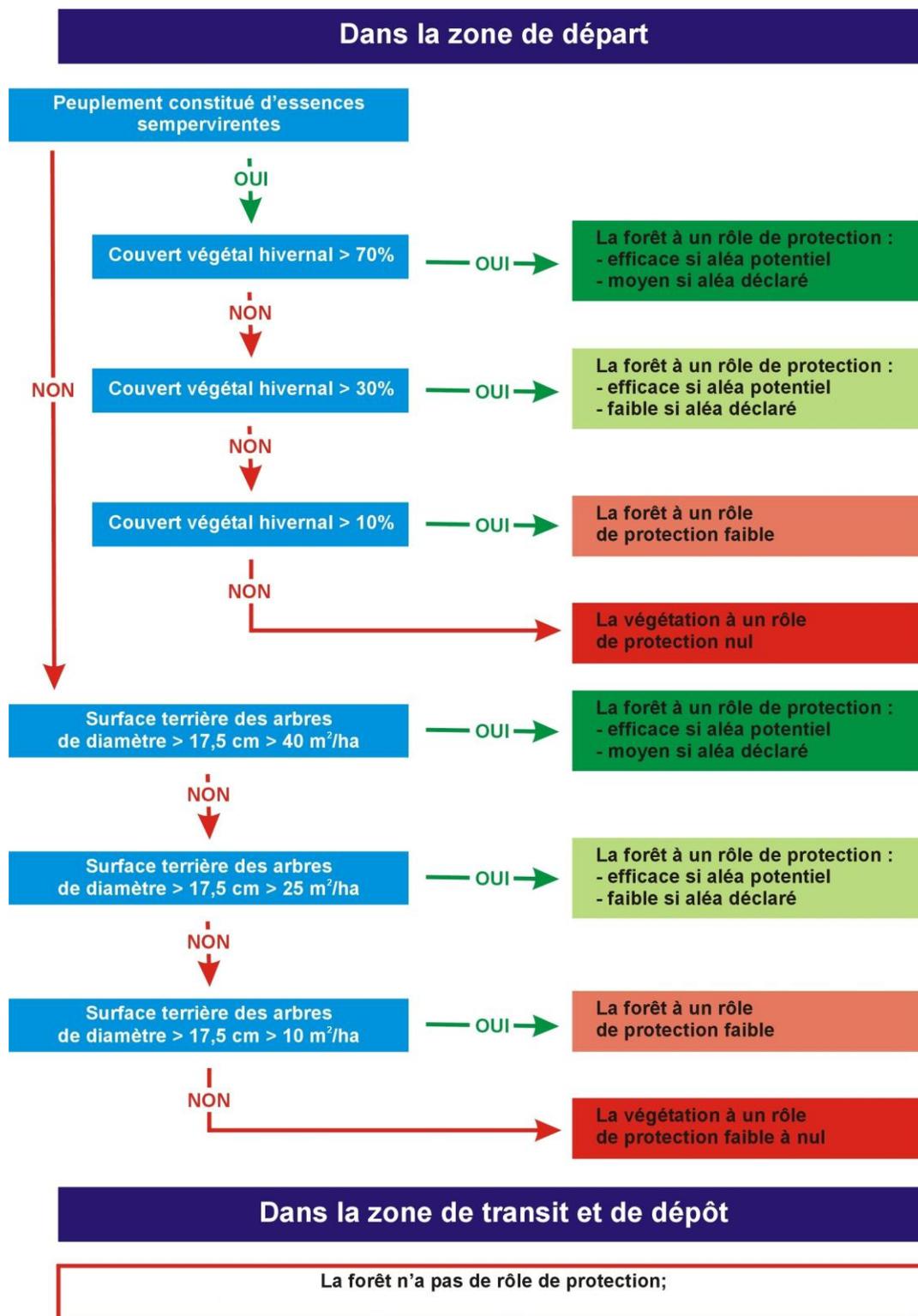
** Longueur planimétrique de la bande boisée dans le sens de la pente

Pour cet aléa, l'IMA est déterminé pour les chutes de blocs de volume unitaire < 1m³. L'aléa ne peut pas être maîtrisé par la forêt lorsque les blocs ont un volume unitaire > 1m³.

Indice de maîtrise de l'aléa IMA			Peuplement majoritairement non précomptable		Peuplement majoritairement précomptable	
			Densité de tiges (N/ha) de diamètre 7,5 à 17,5		Densité de tiges (N/ha) de diamètre 17,5 et +	
			N < 2000	N > 2000	N < 350	N > 350
ZONE DE TRANSIT ET DE DEPOT	Bande boisée > 200 m (planimétrique)	G < 25 m ² /ha	1	3	1	3
		G > 25 m ² /ha			4	5
	Bande boisée < 200 m (planimétrique)	G < 25 m ² /ha	0	2	0	1
		G > 25 m ² /ha			2	3
ZONE DE DEPART	→		La forêt n'a pas de rôle de protection. Au contraire, les arbres instables peuvent déchausser des blocs.			

G : surface terrière (m²/ha) des arbres précomptables

Les avalanches



CAS DES RESINEUX (SAUF MELEZE *conifère à feuilles caduques*)

Indice de maîtrise de l'aléa IMA		Couvert hivernal (en %) des résineux à feuilles persistantes (<i>Epicéas, Sapin, Pins</i>)			
		< 10%	10 - 30%	30 - 70%	> 70%
ZONE DE DEPART	Aléa déclaré en forêt	0	1	2	3
	Aléa potentiel en forêt	0	2	5	6

CAS DES FEUILLUS + MELEZE

Indice de maîtrise de l'aléa IMA		Surface terrière (m ² /ha) des arbres précomptables			
		G < 10	10 < G < 25	25 < G < 40	G > 40
ZONE DE DEPART	Aléa déclaré en forêt	0	1	2	3
	Aléa potentiel en forêt	0	2	3	5

ZONE DE TRANSIT ET DE DEPOT	→	La forêt peut freiner certaines coulées de neige, mais ne peut maîtriser l'avalanche.
-----------------------------	---	---

V.3 – Rendu cartographique :

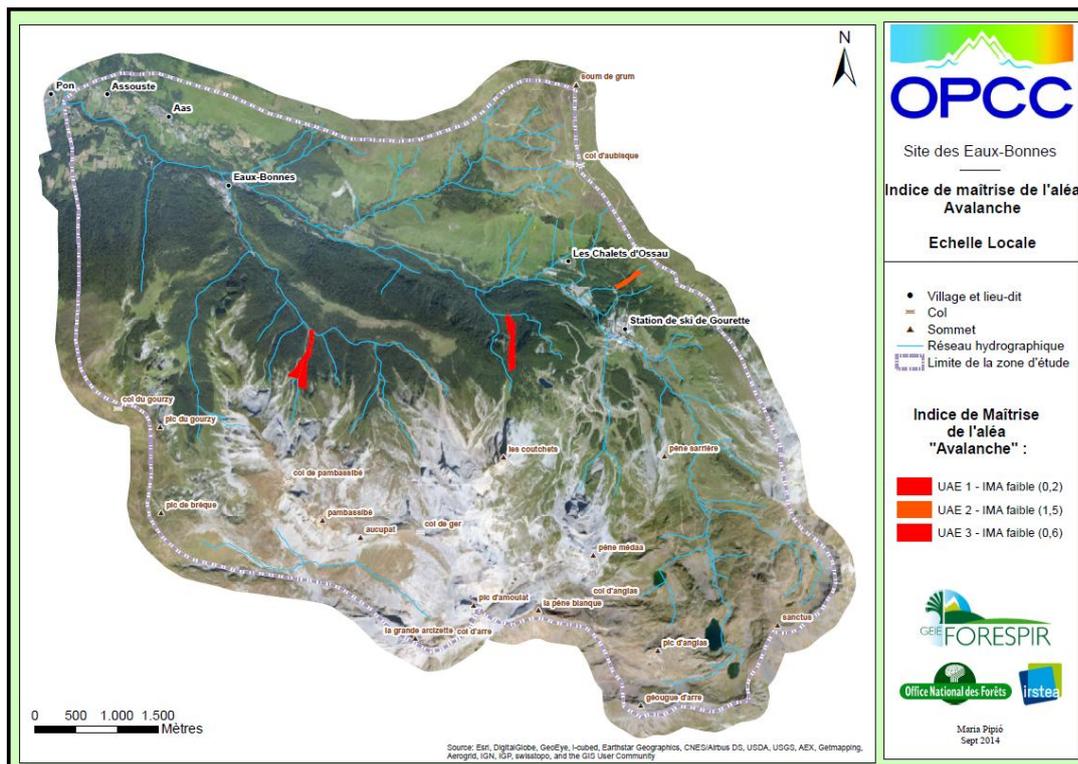


Figure 45 : IMA local AVALANCHE - zone de référence des Eaux-bonnes

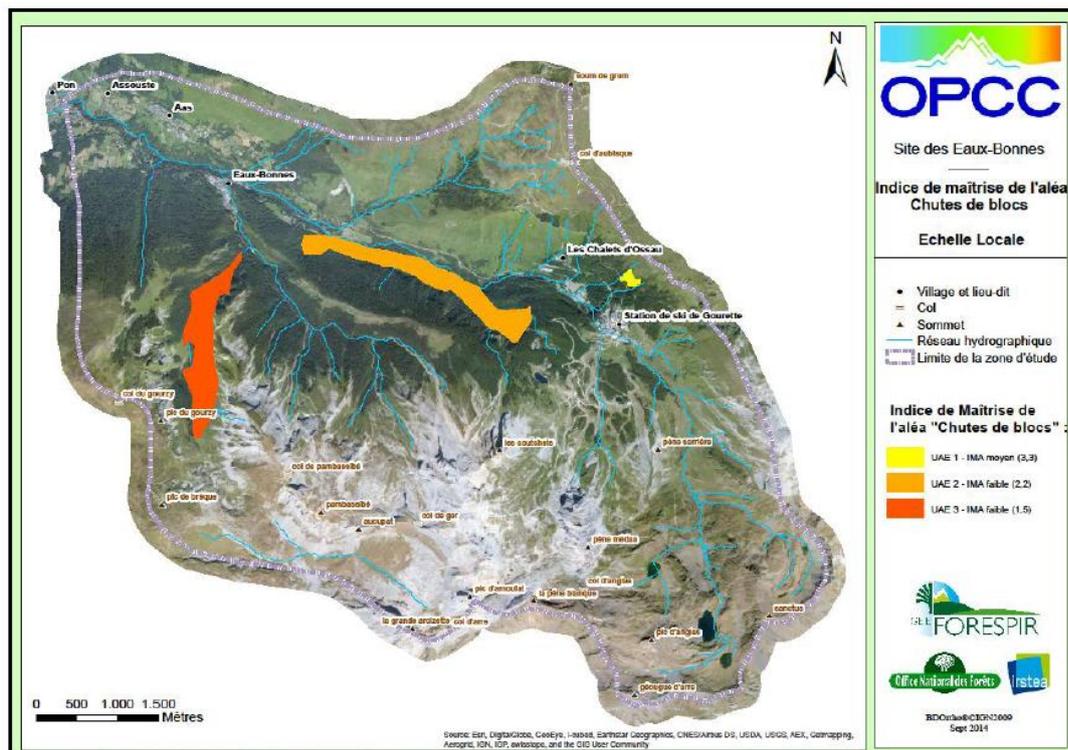


Figure 46 : IMA local CHUTES DE BLOCS - zone de référence des Eaux-bonnes

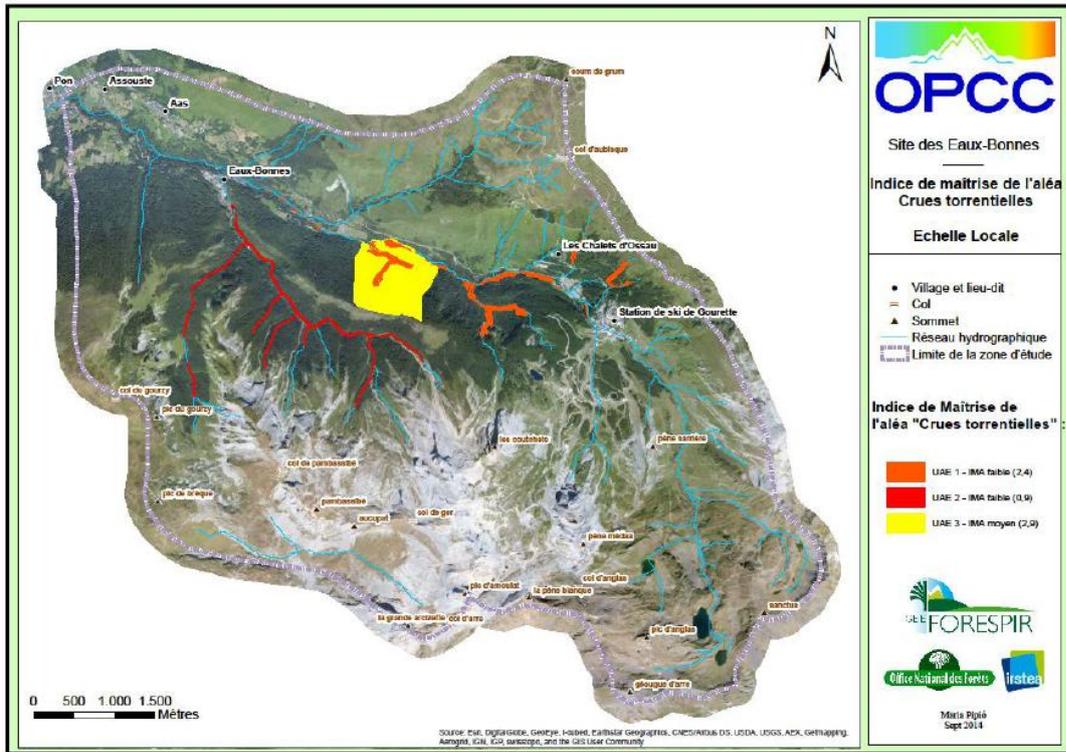


Figure 47 : IMA local CRUES TORRENTIELLES - zone de référence des Eaux-bonnes

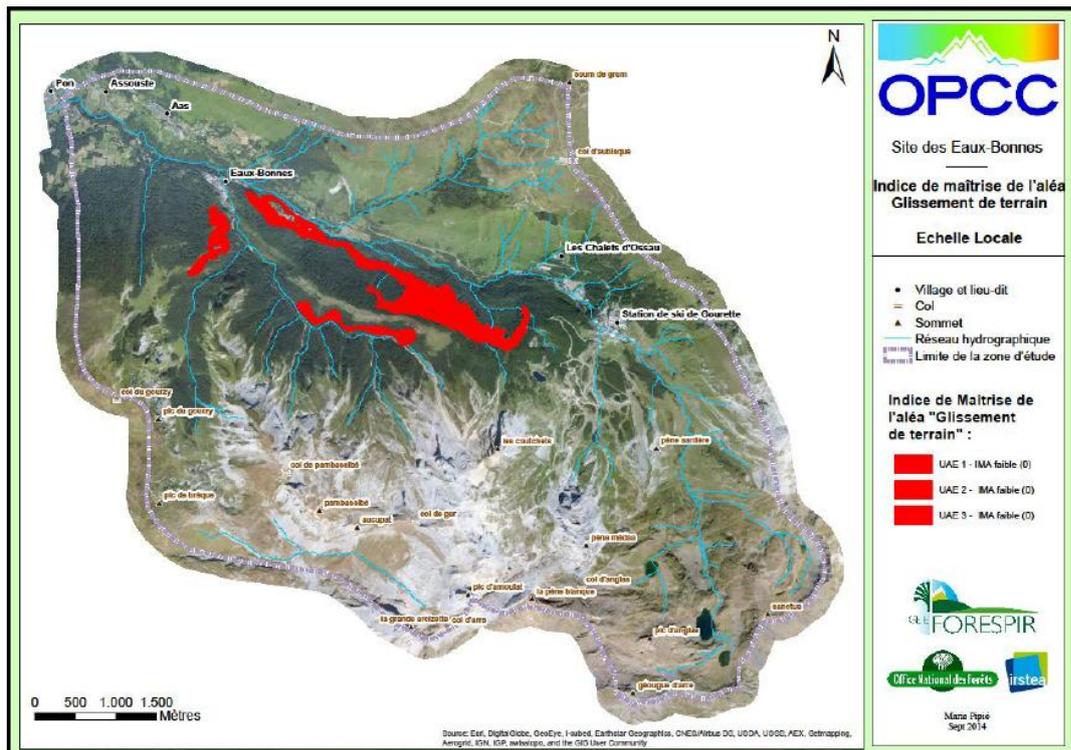


Figure 48 : IMA local GLISSEMENT TERRAIN- zone de référence des Eaux-bonnes

Comme précédemment indiqué la détermination de cet IMA nécessite des données dendrométriques précises issues d'aménagements forestiers récents ou relevés sur le terrain. Il est donc très fastidieux et très coûteux de le réaliser de manière systématique.

Compte tenu de cela, les partenaires ont travaillé à développer une méthode de détermination de l'IMA de façon globale, qui permet de définir pour chacun des aléas le niveau d'Indice de Maîtrise de l'Aléa des forêts à des échelles géographiques beaucoup plus importantes.

Dans ce cas, les données dendrométriques sont définies à dire d'experts. Dans le cas de cette étude les éléments suivants ont été utilisés:

- Cartographie des peuplements forestiers réalisée dans le cadre de l'OPCC par l'Ecole d'Ingénieurs de Purpan
- Cartographie des peuplements forestiers de l'IGN
- Définition des types de peuplements forestiers de l'IGN

Ce travail de cartographie d'IMA global a été réalisé dans le cadre de la thèse professionnelle de Mme. Maria PIPIO ADROHER ⁴ dont l'objectif a été d'analyser les deux méthodes (IMA local et IMA global) et de vérifier si la méthode globale systématique offre des résultats fiables par rapport à la méthode locale, obtenue à petite échelle.

⁴ THÈSE PROFESSIONNELLE, « Développement et comparaison de deux méthodes pour calculer l'Indice de Maîtrise des Aléas (IMA) des peuplements forestiers et de la végétation des Pyrénées », Maria PIPIO ADROHER, CHAMBRE DE COMMERCE ET D'INDUSTRIE DE TOULOUSE

VI - SYNTHÈSE ISSUE DE LA CARTOGRAPHIE

Les croisements de données ainsi obtenues par l'indice de maîtrise de l'aléa permettront d'évaluer la capacité d'un peuplement forestier à réduire le risque vis-à-vis d'enjeux socio-économiques menacés par un ou plusieurs aléas.

La synthèse générale aboutit à la définition de 3 classes :

- Efficace : IMA favorable Notes : 5 / 6
- Moyen : IMA moyen Notes : 3 / 4
- Faible : IMA faible Notes : 0 / 1 / 2

Le gestionnaire pourra donc s'appuyer sur cette notation pour identifier différents cas :

Les peuplements à rôle protecteur moyen à efficace (IMA favorable ou moyen) :

- Nécessitant des actions sylvicoles courantes ou d'amélioration pour assurer le maintien ou l'amélioration de leurs qualités protectrices ;
- Ne nécessitant pas d'actions sylvicoles, la dynamique naturelle ne dégradant pas leurs qualités protectrices à court ou moyen terme ;

Les peuplements à rôle protecteur faible (IMA faible), nécessitant :

- Soit une reconstitution importante (cas de peuplements dégradés dont la réhabilitation permet de retrouver une protection satisfaisante),
- Soit la réalisation de travaux de génie civil complémentaires lorsque le couvert forestier ne peut assurer à lui seul une protection suffisante.

A l'issue de cette démarche, le gestionnaire a tous les éléments techniques pour juger de la priorité d'une intervention au titre de la protection contre les aléas naturels.

En cas de nécessité, et seulement dans ce cas, il doit se reporter à la partie 2 "Gestion des forêts à rôle de protection contre les aléas naturels" du "Guide de gestion des forêts pyrénéennes à enjeu de protection" où sont déclinées les interventions préconisées.

Cette cartographie prend toute sa valeur pour les gestionnaires dans une vision d'ensemble. Elle ne peut prétendre remplacer les choix d'aménagement et d'exploitation déjà opérés, elle ne fait que leur donner un nouvel éclairage.

Cette note méthodologique reprend textuellement de nombreux paragraphes de documents internes ONF :

- Fiches techniques du manuel d'Aménagement – fonction de protection des forêts contre les risques naturels – Mars 2011- ONF Direction territoriale Rhône-Alpes (en collaboration avec IRSTEA)
- Guide des Sylvicultures de Montagne pour les Alpes du Sud françaises – 2012 – ONF, IRSTEA, INRA, CRPF.
- Rendez-vous techniques, n°38 – automne 2012 – Changement climatique et évolution des usages du bois, quelles incidences sur nos orientations sylvicoles ? – ONF
- OPCC, cartographie des formations forestières des Pyrénées à partir de série temporelles MODIS - Création d'une carte forestière de référence

TABLE DES ILLUSTRATIONS

- Figure 1 : Lien entre cartographie aléas/enjeux et Guide de gestion des Forêt Pyrénéennes à enjeu de protection
- Figure 2 : Démarche générale de l'action
- Figure 3 : Détermination de l'existence d'un risque naturel
- Figure 4 : Démarche proposée pour la cartographie aléa/enjeux
- Figure 5 : Exemple d'unité fonctionnelle d'aléa torrentiel
- Figure 6 : Illustration du l'unité fonctionnelle d'aléa avalancheux
- Figure 7 : Critères de détermination des zones de départ potentiel d'avalanche
- Figure 8 : Principe du modèle statistique norvégien pour estimer le point d'arrêt maximal d'une avalanche.
- Figure 9 : Représentation graphique de l'angle α en fonction de l'angle β pour les 113 couloirs étudiés de la vallée de Chamonix. (y correspond à l'angle α et x correspond à l'angle β)
- Figure 10 : Exemple de rendu cartographique de la localisation du phénomène avalancheux selon la CLPA
- Figure 11 : Exemple de rendu cartographique de la localisation du phénomène avalancheux selon le modèle IRSTEA
- Figure 12 : Exemple de rendu cartographique du croisement entre la localisation du phénomène avalancheux selon le modèle IRSTEA et selon la CLPA
- Figure 13 : Exemple de valeur d'angle de pente sur MNT et dans la réalité (pour des questions de lisibilité de la représentation schématique les angles ont volontairement exagérés sur le schéma).
- Figure 14 : Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β
- Figure 15 : Principe de la ligne d'énergie selon Heim (1932) et principe du shadow angle selon Lied (1977)
- Figure 16 : Présentation des principes de calcul de la ligne d'énergie avec le principe de l'angle géométrique et de l'angle de trajet. Dans les deux cas le point d'arrêt géographique est le même mais par contre les distances des trajets d'atteintes sont différentes.
- Figure 17: Exemple de rendu cartographique de la localisation du phénomène chute de blocs selon le modèle IRSTEA
- Figure 18 : L'unité « bassin versant torrentiel »
- Figure 19 : MNT et réseau hydrographique
- Figure 20 : Réseau hydrographique par classes de pente
- Figure 21 : Méthode de Strahler
- Figure 22 : Rendu de la méthode de Strahler sur la zone Eaux-Bonnes
- Figure 23 : Sensibilité des formations superficielles aux glissements de terrain
- Figure 24 : Analyse de la superficie des bassins versants
- Figure 25 : Localisation des profils en travers

- Figure 26: Zones potentiellement inondées
- Figure 27 : Schéma de principe de la dynamique en jeu dans le phénomène de glissement (extrait du classeur « le risque de mouvements de terrain en Provence Côte-d'Azur », 2011 – BRGM, Région et DREAL PACA)
- Figure 28 : Schéma de principe d'un glissement rotationnel
- Figure 29 : Logigramme de l'évaluation de l'aléa glissement de terrain
- Figure 30 : MNT sur la zone de Laruns et extraction sur un secteur des courbes de niveaux
- Figure 31 : Cartes des pentes et différence MNE/MNT - zone de Laruns
- Figure 32 : Orientation des bassins versants et indice de rugosité issus du MNT - zone de Laruns
- Figure 33 : Données historiques - zone de Laruns
- Figure 34 : Données historiques - zone de St-Béat
- Figure 35 : Extrait du tableau d'évaluation de la sensibilité au glissement sur la zone de Laruns
- Figure 36 : Cartographie de susceptibilité au glissement - zone de Laruns
- Figure 37 : Récapitulatif des notes d'aléa en fonction du type d'aléa et des caractéristiques du milieu
- Figure 38 : Appréciation des enjeux socio-économiques
- Figure 39 : Exemple de cartographie de localisation des enjeux socio-économiques
- Figure 40: Exemple de cartographie de cotation des enjeux socio-économiques
- Figure 41 : Exemple de cartographie d'unité d'aléa-enjeu
- Figure 42 : Appréciation du niveau de risque naturel
- Figure 43 : Appréciation cartographique du niveau de risque naturel
- Figure 44 : Extrait de la carte forestière de référence sur la zone de référence des Eaux-bonnes
- Figure 45 : IMA local AVALANCHE - zone de référence des Eaux-bonnes
- Figure 46 : IMA local CHUTES DE BLOCS - zone de référence des Eaux-bonnes
- Figure 47 : IMA local CRUES TORRENTIELLES - zone de référence des Eaux-bonnes
- Figure 48 : IMA local GLISSEMENT TERRAIN- zone de référence des Eaux-bonnes

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 – « Développement et tests opérationnels d'une méthodologie pour l'aide à la mise en place progressive d'une cartographie nationale des forêts de montagne à rôle de protection vis-à-vis des risques naturels : réalisation d'une opération pilote à l'échelle d'un département (Isère) et d'un massif (Pyrénées), RAPPORT INTERMEDIAIRE

Annexe 2 - THÈSE PROFESSIONNELLE, « Développement et comparaison de deux méthodes pour calculer l'Indice de Maîtrise des Aléas (IMA) des peuplements forestiers et de la végétation des Pyrénées », Maria PIPIÓ ADROHER, CHAMBRE DE COMMERCE ET D'INDUSTRIE DE TOULOUSE, 2014.