



Action "Evolutions Climatiques et Forêt de Montagne" (Axes "Forêt" et "Risques Naturels")
Acción "Evoluciones Climáticas y Bosques de Montaña" (Ejes "Bosque" y "Riesgos Naturales")

Les partenaires / Los socios :



Appui technique :
Apoyo técnico :



LA PRISE EN COMPTE DES EVOLUTIONS CLIMATIQUES

dans les travaux de
**cartographie du phénomène
« glissement de terrain »**

et dans les travaux
**d'analyse de la maîtrise des aléas
par les peuplements forestiers et la
végétation des Pyrénées**

Avec le concours financier / Con el apoyo financiero



PREAMBULE

Actuellement, comme cela résulte de l'analyse bibliographique qui a servi à réaliser la synthèse " Les phénomènes naturels et la forêt pyrénéenne : Synthèse et glossaire", il est très difficile de mettre en évidence, de façon empirique, un impact des évolutions climatiques sur les phénomènes naturels (intensité et période de retours).

Au mieux peut-on, sur la base de ces travaux, proposer des hypothèses.

Le Pôle Alpin d'études et de recherche pour la prévention des Risques Naturels résume assez bien la situation en précisant que "*l'ensemble des services techniques en charge de la gestion des risques naturels note dans l'évolution des tâches qui leur incombent, souvent sans pouvoir le quantifier réellement, une augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques intenses : pluies diluviennes, amplitudes thermiques importantes sur des laps de temps très restreints (vagues de chaleur, sécheresses, périodes de gel/dégel intenses). De nombreux événements météorologiques sont ainsi perçus comme plus brutaux et pouvant être très localisés, donc de ce fait très difficiles à prévoir. Ces phénomènes entraînent au quotidien une intensification apparente des crues torrentielles [...], une augmentation apparente des phénomènes de type érosif [...], ainsi qu'une modification de la période d'occurrence de certains phénomènes (chutes de pierre en hiver, coulées de neige plus tôt en saison). Les acteurs s'attendent désormais à voir certains sites réagir de manière plus intense et plus rapide aux événements météorologiques [...]. De façon générale, tous s'accordent sur le fait que ce sont les valeurs extrêmes plutôt que les valeurs moyennes qui risquent d'impacter les phénomènes générateurs de risques*".

Ainsi, si les événements météorologiques extrêmes sont une composante essentielle des risques naturels, nous convenons, et cela est largement rappelé dans la littérature, qu'il manque des données et des analyses afin d'affirmer "qu'il y a plus (ou moins) de phénomènes naturels à cause du changement climatique". C'est une partie des objectifs de notre action : contribuer à améliorer la connaissance en la matière en permettant la mise en place d'indicateurs de suivi de l'impact du Changement Climatique.

Ceci étant, les partenaires investis dans la mise en œuvre de l'action "Evolutions Climatiques et Forêt de Montagne (axes "Risques Naturels" et "Forêt" du projet POCTEFA de l'OPCC), ont abordé l'impact des évolutions climatiques sur les risques naturels et sur le rôle de protection de la forêt contre les risques naturels en privilégiant deux approches :

La première consiste à **apprécier l'aléa glissements de terrain à l'aide du logiciel ALICE©** (p.4).

En parallèle de la méthodologie réalisée¹ pour qualifier l'aléa glissement de terrain sur les quatre zones de référence françaises, le choix a été fait d'utiliser le logiciel ALICE©, présenté ci-après, sur la zone de « Laruns-Eaux Bonnes » - Pyrénées-Atlantiques.

¹ 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.

Outre de permettre une évaluation de l'aléa basée sur une appréciation quantitative de la probabilité de rupture, ALICE© présente la double fonctionnalité suivante dont la mise en œuvre et les résultats s'inscrivent parfaitement dans le cadre de l'appréciation des impacts dus au changement climatique :

- Prise en compte des niveaux d'eau dans le sous-sol ;
- Prise en compte des effets de la végétation.

La seconde approche consiste à **apprécier la vulnérabilité au changement climatique des principales essences forestière qui jouent un rôle de protection contre les risques naturels** (p.23).

L'appréciation de l'aléa glissements de terrain à l'aide du logiciel ALICE[®]

□ Présentation d'ALICE[®]

ALICE[®] (Assessment of Landslides Induced by Climatic Events), est un logiciel d'aide à la cartographie de l'aléa glissements de terrain, dans le cadre d'étude régionale de plusieurs dizaines de kilomètres carrés ou pour des zones plus restreinte (à l'échelle d'un versant par exemple). Il s'appuie sur un modèle mécanique et géotechnique dans lequel les principales caractéristiques physiques du milieu sont quantifiées et utilisées dans un modèle mathématique calculant un facteur de sécurité. Ces modèles nécessitent de connaître la répartition spatiale (et parfois temporelle) des paramètres qui vont conditionner la stabilité des sols (caractéristiques mécaniques, paramètres de la nappe,...). L'intérêt principal de ce logiciel est de permettre la prise en compte des incertitudes liées à certains paramètres du modèle grâce à une approche probabiliste. En effet, les caractéristiques géotechniques sont définies par des distributions, et non pas par des valeurs constantes.

Pour la modélisation de la stabilité des terrains, le logiciel calcul des facteurs de sécurité au glissement en utilisant la méthode de Morgenstern and Price (1965, 1967), un modèle de stabilité de pente finie avec géométrie de rupture quelconque. Cette méthode est appliquée le long de profils topographiques 2D suivant les lignes de plus grandes pentes de la zone d'étude (Illustration 41). Ces profils sont automatiquement générés par le logiciel grâce à quatre données d'entrée (sous forme de cartes rasters) : un Modèle Numérique de Terrain (MNT), une carte des pentes, une carte de directions d'écoulement et une carte des zones d'accumulation. Les trois dernières cartes peuvent toutes être produites à partir du MNT grâce à des outils SIG.

Au niveau des données du sol, la géologie et la pédologie du secteur d'étude sont intégrées au modèle par l'intermédiaire de cartes d'altitudes des interfaces entre chaque couche. Les caractéristiques géotechniques nécessaires au calcul du facteur de sécurité vis-à-vis des glissements (cohésion, angle de frottement et poids volumique) sont entrées sous forme de distributions afin de prendre en compte la variabilité et l'incertitude de ces paramètres.

Pour le calcul du facteur de sécurité, il est également nécessaire de fixer un type (plan ou rotationnel) et une taille de glissement. Par taille de glissement, on entend dans cette étude la distance entre la tête et le pied du glissement. Le niveau de la nappe est défini par rapport à un taux de remplissage entre deux cartes piézométriques : la première définissant un niveau de nappe minimale (à l'étiage) et la seconde un niveau maximal (souvent la surface topographique).

Le principe de modélisation du logiciel est basé sur le calcul de facteurs de sécurité pour plusieurs positions de glissements le long des profils (Illustrations 42). Plusieurs calculs sont réalisés pour chaque position en utilisant un tirage de type Monte-Carlo dans les distributions des caractéristiques géotechniques. La probabilité d'obtenir un facteur de sécurité inférieur à 1 représente la probabilité d'occurrence du glissement pour un scénario de déclenchement déterminé (type et taille de glissement, profondeur de la nappe).

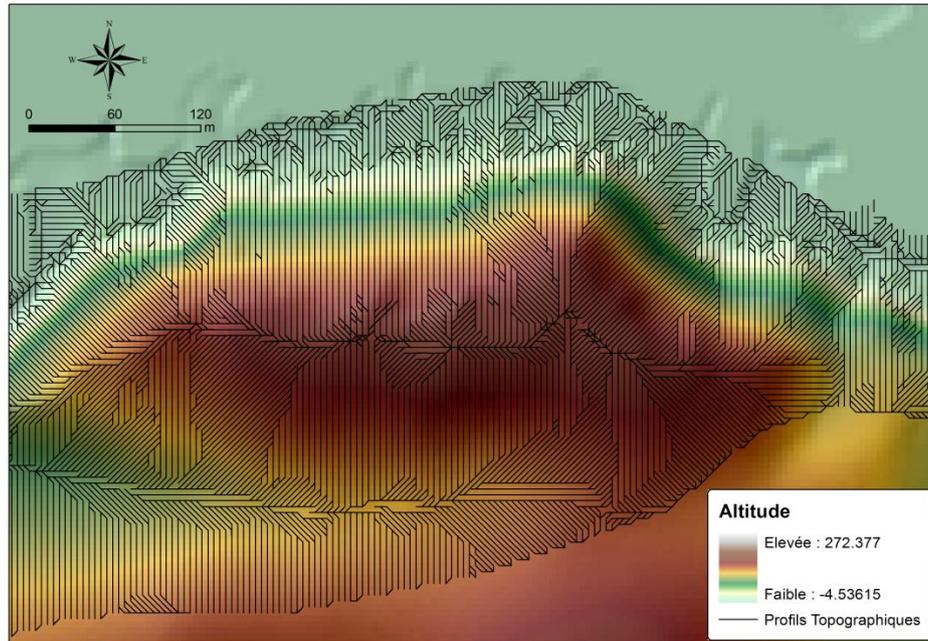


Illustration 1 – Profils topographiques suivant les lignes de plus grande pente d’un Modèle Numérique de Terrain, le long desquels sont effectués les calculs de stabilité. Le relief du front de mer fait face au nord. Les profils sont générés automatiquement par le logiciel et leur espacement dépend de la résolution des données. Sur cet extrait de la Côte Basque, les profils sont espacés de 5m.

La probabilité d’occurrence calculée est ensuite attribuée à tous les pixels situés sur le profil et à l’intérieur de l’emprise du glissement. Un pixel peut donc recevoir autant de probabilités différentes que de glissements dans lesquels il est inclus. Finalement, le logiciel crée une carte affichant pour chaque pixel la probabilité d’occurrence de glissement la plus haute qui a été calculée.

L’intérêt et la particularité de cette méthode est donc de fournir à l’utilisateur une probabilité d’occurrence du glissement du terrain et non pas une valeur fixe de facteur de sécurité qui ne permet pas de hiérarchiser les différents secteurs de glissement afin par exemple de définir les sites prioritaires à sécuriser. Une carte peut être établie pour plusieurs scénarios afin de couvrir toutes les éventualités (climatologiques par exemple). Ces résultats peuvent également être utilisés dans le but de réaliser des cartes d’aléa glissements de terrain pour des utilisations plus « classiques », pour les politiques publiques de prévention des risques et d’aménagement du territoire par exemple.

Les explications sur le fonctionnement d’*ALICE*[®] développées ci-dessus sont basées sur la version 7.0 du logiciel. Celui-ci étant toujours en développement, de nouvelles fonctionnalités peuvent y être ajoutées et d’autres devenir obsolètes.

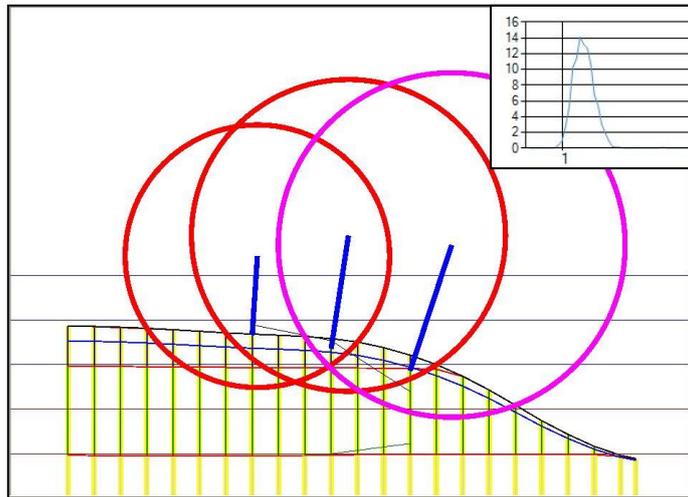


Illustration 2 – Illustration du fonctionnement du logiciel lors du calcul des facteurs de sécurité le long d'un profil. Les unités géologiques sont séparées par les traits horizontaux rouges, le niveau piézométrique est représenté par le trait bleu intersectant la surface topographique à droite du profil. L'équidistance entre les hachures verticales est fonction de la taille des pixels, ici 5 m. Plusieurs positions sont définies (cercles rouges) en fonction d'un pas de calcul fixé (ici 15m). Le cercle rose représente la position de glissement possédant la probabilité d'occurrence la plus élevée. Celle-ci est présentée dans le graphique en haut à droite qui montre tous les facteurs de sécurité calculés pour cette position.

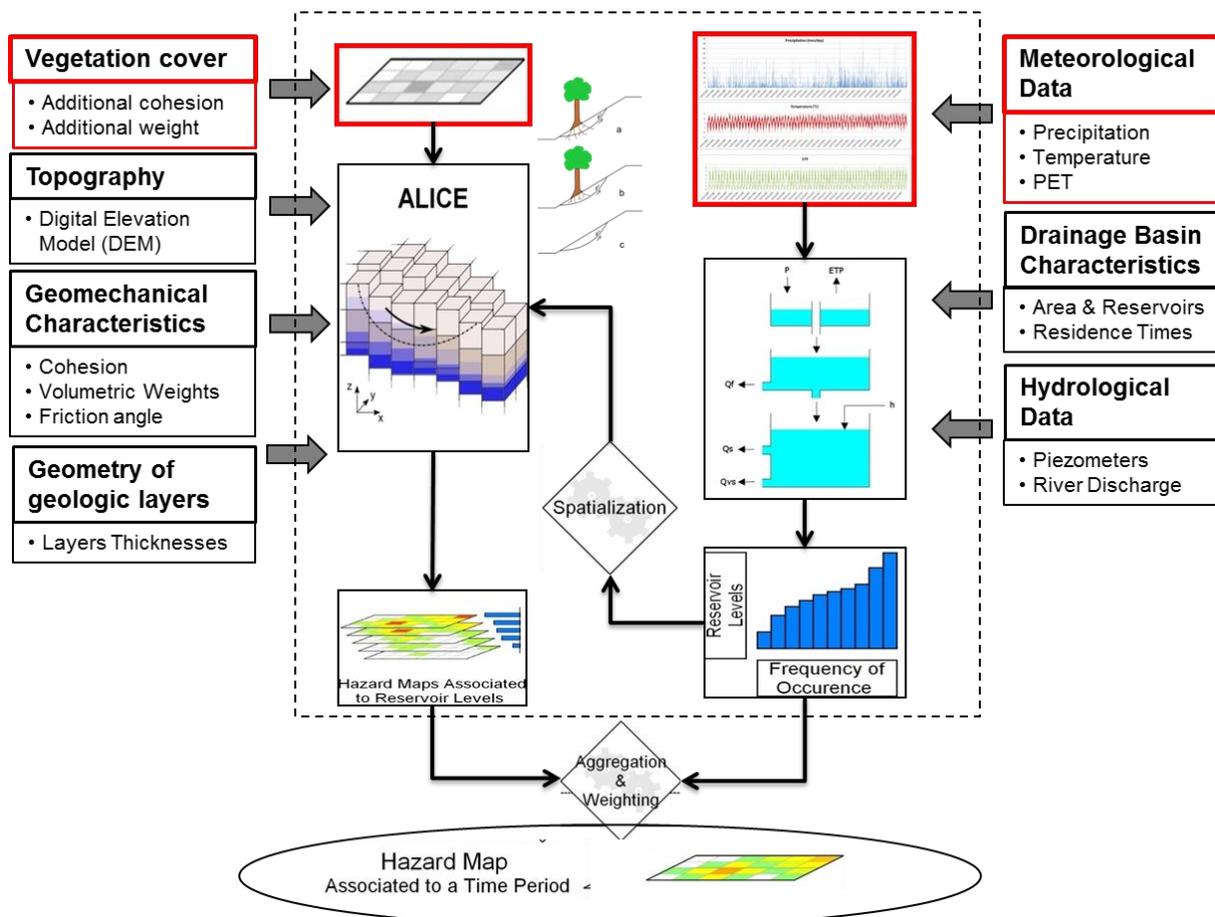


Figure 3 : Schématisation du principe de fonctionnement d'Alice et des entrées / sorties

Les principales données d'entrée d'Alice sont :

- Une carte des profils topographiques de la zone d'étude (dérivée du MNT) ;
- Une carte des formations géotechniques, où une formation est caractérisée par une colonne de sol, chaque couche de sol étant définie par une épaisseur, une cohésion, un angle de frottement et un poids volumique ;
- Une carte des niveaux de nappe ;
- Les caractéristiques de glissement typiques de la zone d'étude : forme de la surface de rupture (plane ou circulaire), taille moyenne du glissement, interface ou intervalle de profondeur du glissement.

Les données de sortie du logiciel sont une carte de probabilité de glissement ou une carte de facteurs de sécurité de la zone étudiée.

□ Démarche mise en œuvre

La démarche a été mise en deux temps :

- Approche sur l'ensemble de la zone de référence de Laruns/Eaux Bonnes ;
- Approche circonscrite au secteur de Gourette, connu pour son activité glissement de terrain, avec prise en compte de l'influence de la végétation.

* **Approche « globale » sur la zone de référence**

Modèle géotechnique

Le modèle géotechnique est une représentation en 3 dimensions de la répartition des différentes couches de terrain présentes dans la zone d'étude, qui sont susceptibles d'être impliquées dans la problématique des glissements de terrain. Par représentation on entend d'une part la géométrie de ces couches (présence, épaisseur, etc. et d'autre part leurs caractéristiques mécaniques.

Le territoire de la zone d'étude est divisé en un certain nombre de zones. A chaque zone correspond une coupe de sol type. Les caractéristiques de chaque couche sont spécifiques à la zone. Pour chaque zone, l'épaisseur des couches et leurs caractéristiques mécaniques sont renseignées. La dernière couche représente le substratum. Chaque zone est nommée, et les couches qu'elle contient sont renseignées avec la cohésion (en Kpa), l'angle de frottement interne (en degrés) et le poids volumique (en kN/m^3). Ces paramètres sont explicités sous forme de distributions probabilistes.

Pour la zone d'étude du Laruns, les formations géologiques ont été regroupées pour former des zones lithologiques homogènes. Les quatre formations décrites précédemment ont été réutilisées : quaternaires, mésozoïques, paléozoïques et gneissiques (éruptives et magmatiques). Dans un premier temps, nous supposons que chacune de ces formations repose sur un substratum épais et stable. Pour chaque zone, la coupe de sol est donc constituée de 2 couches.

Description « lithologique » des 4 couches situées en surface :

- 1 - Formations quaternaires et « sub-actuelles » (appelées *formations meubles* et numérotées zone 1 dans le modèle) : elles regroupent les éboulis actuels ou récents, les alluvions fluvioglaciales, les moraines, les cônes de déjection (ces matériaux sont généralement situés dans des zones plates, les piémonts et les fonds de vallée).

Ce sont des matériaux meubles (par rapport à ceux présents sur la zone d'étude) et dont l'épaisseur est variable. Une épaisseur maximale de 25 m est utilisée dans un premier temps.

- 2 - Formations paléozoïques (appelées *pélites* et numérotées zone 2 dans le modèle) : les principales formations représentées sont des formations calcaires ainsi que des pélites à lit gréseux. Ces formations sont très épaisses sur la zone d'étude (plusieurs centaines de mètres) et présentent une altération variable. Pour l'élaboration du modèle, nous supposons que cette zone est constituée par une couche altérée de 30 m d'épaisseur reposant sur un épais substratum plus résistant. Cette formation est le siège de plusieurs glissements de terrain importants (dont le glissement de Pleyssé) ;
- 3 - Formations mésozoïques (appelées *calcaires* et numérotées zone 3 dans le modèle), représentées en particulier par des calcaires gréseux, des dolomies, des calcaires à silex et des flyschs argilo-gréseux. L'épaisseur de cette formation peut varier entre 15 m et plusieurs centaines de mètres. Ces formations sont plutôt « résistantes » et globalement de faible sensibilité aux glissements de terrain. Seule la partie superficielle altérée, supposée d'épaisseur métrique dans un premier temps, est susceptible d'être instable ;
- 4 - Formations gneissiques (appelées *granites* et numérotées zone 4 dans le modèle), éruptives et magmatiques, représentées notamment par des dykes et des sills de Lamprophyres. Ces formations sont supposées très résistantes par rapport aux autres formations de la zone d'étude.

Zone	Cohésion (kPa)	Angle de frottement (°)	Gamma (kN.m⁻³)	Epaisseur (m)
1 – Formations meubles	5	30	18	25
2 – Pélites	2	30	17	30
3 – Calcaires	2	35	18	2
4 – Granites	80	40	19	100
Substratum	40	35	19	100

Figure 4 : propriétés attribuées à chaque couche supérieure de chaque zone

Pour les zones « Pélites » et « Calcaires », la partie susceptible de glisser est l'épaisseur « plus meuble » de matériaux altérés situés dans la partie supérieure de la colonne de sol (épaisseur pouvant atteindre en première approche 30 m dans les pélites et seulement 2 m dans les calcaires).

La figure 45 représente la délimitation géographique des 4 zones retenues.

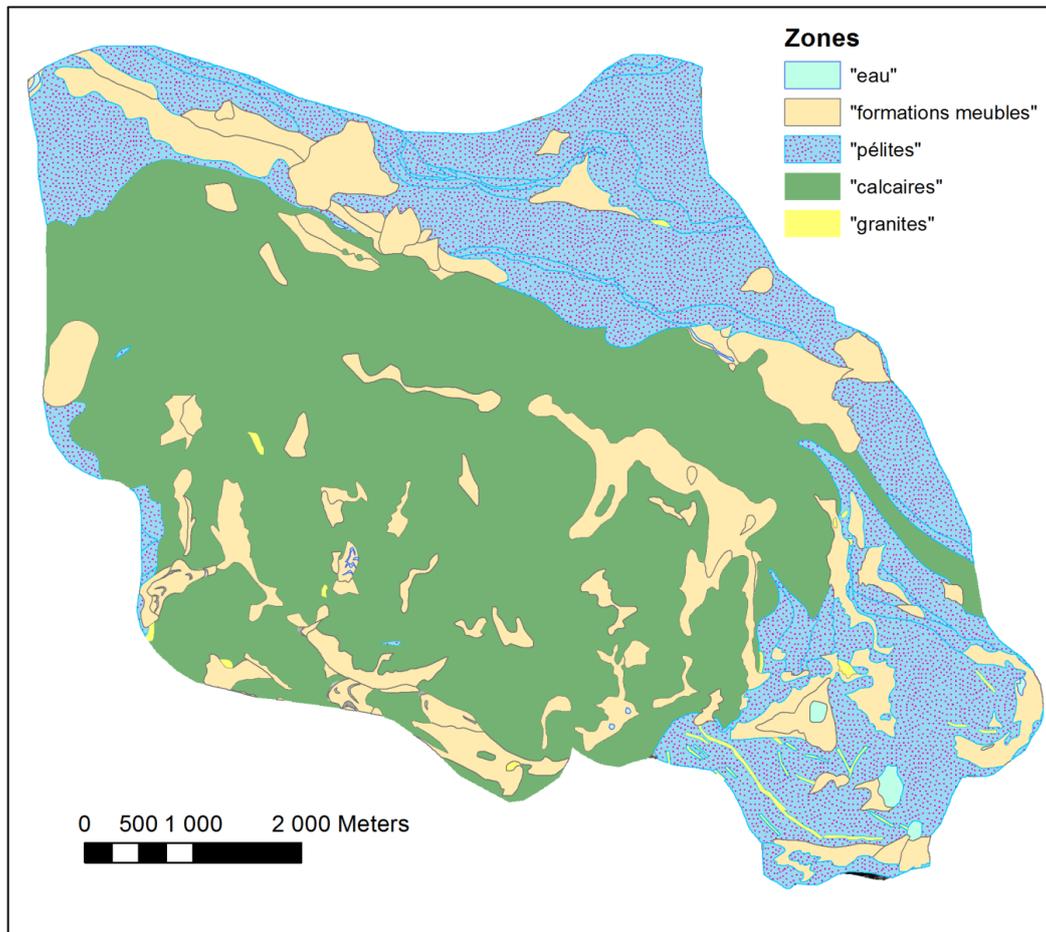


Figure 5 : délimitation des zones

Ce premier modèle par zone, très simplifié, permet de tester la cohérence des propriétés géotechniques des matériaux attribuées par jugement d'expert de manière qualitative. Quelques valeurs de paramètres géotechniques sont disponibles au niveau de la station de Gourette ainsi que sur le glissement de Pleysses Eaux-Bonnes (tableau figure 46). Les valeurs obtenues vers Gourette semblent cohérentes avec la lithologie, ce sont des éboulis pouvant être meubles et des calcaires un peu plus « résistants ».

En revanche, les valeurs élevées de cohésion et d'angle de frottement du glissement de Pleysses ne semblent pas être représentatives de toute la zone que nous avons appelée « pélites » (zone 3). Ces valeurs élevées ont dû être mesurées dans une partie plus indurée et non altérée du glissement.

Ces paramètres ont permis d'en déduire des ordres de grandeur qui ont ensuite été calibrés (à dire d'expert) en comparant les zones les unes par rapport aux autres (tableau 1 – Figure 57).

Lieu	cohesion (c) kPa	angle de frottement (phy) °	poids propre (y) kN.m ⁻³	formation geol
glissement Pleyssse Eaux-Bonnes	220	52		schiste devonien
Gourette	4	30	20	éboulis
Gourette	15	35	21	calcaire devonien
Gourette	0	22	20	éboulis

Figure 6 : données ponctuelles de terrain

Plusieurs cartes ont été déduites du Modèle Numérique de Terrain (MNT) à la résolution de 5 m : les pentes, les directions d'écoulement et les zones d'accumulation. Ces rasters permettent de déterminer l'ensemble de profils de plus grande pente sur toute la zone. Les analyses de stabilité sont réalisées sur tous ces profils grâce à la méthode de Morgenstern et Price (Morgenstern and Price, 1965, 1967) implémentée dans le logiciel ALICE.

Les calculs de stabilité ont été réalisés en prenant plusieurs hypothèses relatives au contexte hydrogéologique, à la géométrie prévisible du glissement, et à la distribution des paramètres géotechniques considérés

1/ Test sur l'influence de la profondeur de la nappe :

Une première série de simulations a été réalisée en adoptant plusieurs hypothèses simplificatrices :

- Propriétés des matériaux constantes par zone ;
- Glissements circulaires ;
- Longueur des glissements = 80 m ;
- Profondeur mini d'un glissement = 1 m ;
- Profondeur maxi d'un glissement = 5 m ;
- Profondeur de la nappe constante sur toute la zone à partir du MNT (profondeur comprise entre 0 et 5 m).

Une première simulation a été réalisée avec un niveau de nappe à 0 m par rapport au MNT et une deuxième simulation avec un niveau de nappe à -5 m (figure 25 et 26 ci-dessous). Il s'agit de niveaux théoriques dans la mesure où à ce stade nous ne disposons pas d'information sur les niveaux d'eau dans les sols à l'échelle de la zone d'étude. Les propriétés de matériaux étant constantes, le résultat obtenu est un facteur de stabilité². Plus ce facteur est élevé, moins le pixel concerné est susceptible de glisser. Un facteur de stabilité inférieur à 1 signifie que la zone est instable (sous toutes les hypothèses posées précédemment).

² Rapport entre les forces résistantes et les forces motrices

Toutes hypothèses étant égales par ailleurs, les différences de facteur de stabilité mises en évidence entre les deux cartes mettent en lumière le rôle du niveau de la nappe dans la probabilité de rupture.

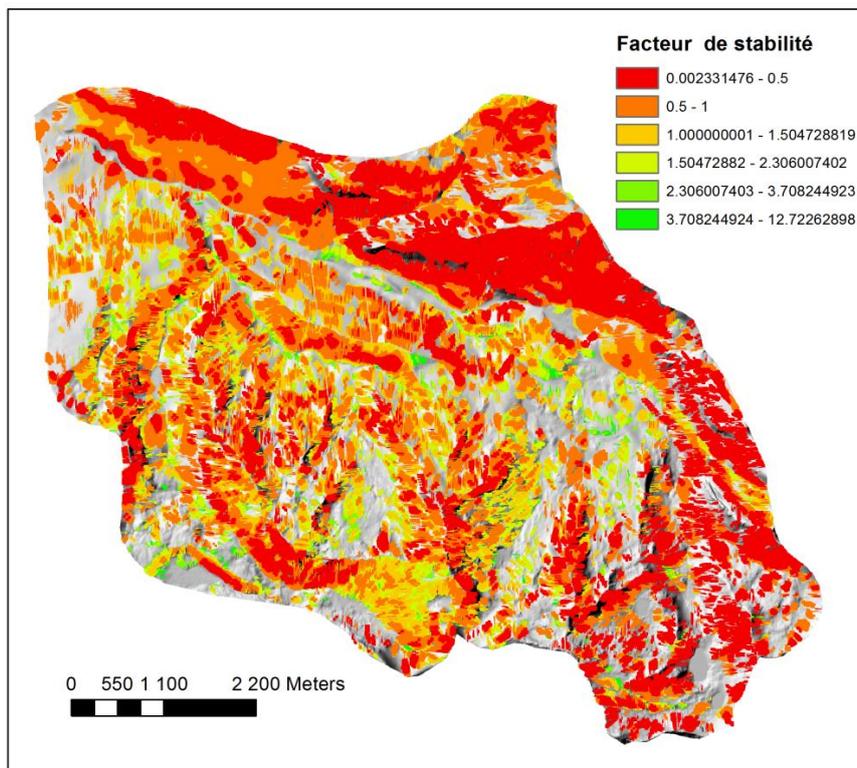


Figure 7 : longueur de glissement 80 m, prof mini 1m, prof max 5m, glissements circulaires, piezo = topo

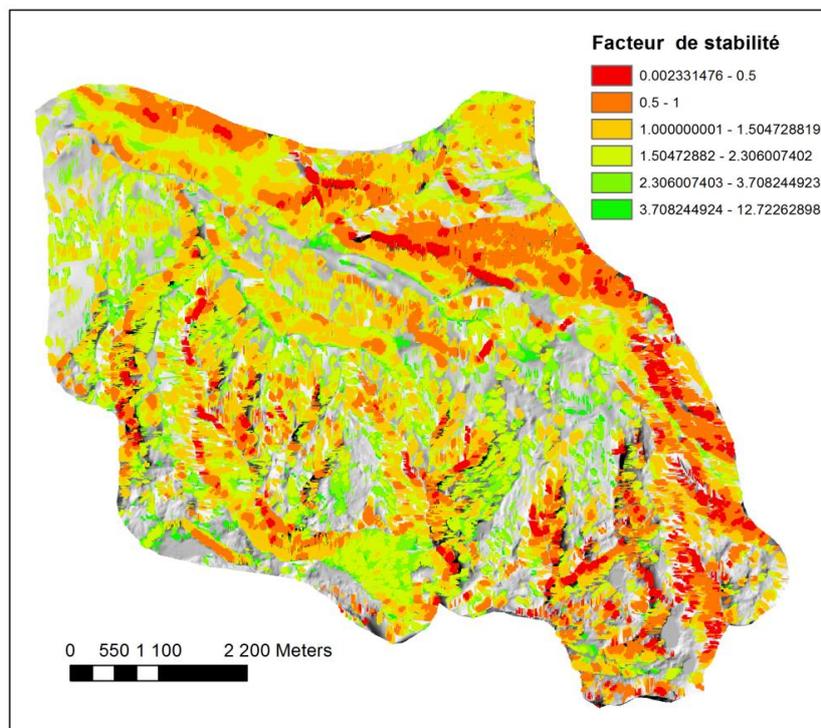


Figure 8 : longueur glissement 80m, prof mini 1m, prof max 5m, glissements circulaires, piezo = topo - 5m

2/ Test sur l'influence de taille imposée des glissements :

Le logiciel permet de simuler plusieurs scénarii concernant la géométrie du glissement, à la fois du point de vue de la superficie mobilisée que du point de vue de la profondeur de la zone en mouvement. Cette possibilité permet de mettre en évidence la sensibilité en tous points de la zone d'étude considérée vis-à-vis d'une activité glissement plutôt « superficielle » ou plutôt « profonde ».

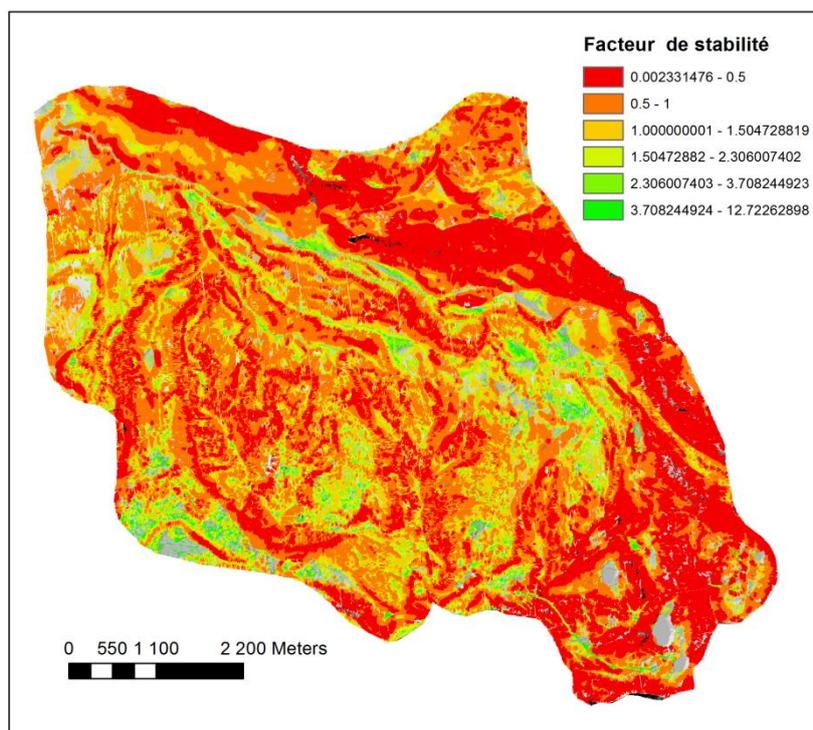


Figure 9 : longueur de glissement 30 m, prof mini 1 m, prof max 5m, glissements circulaires, piezo = topo

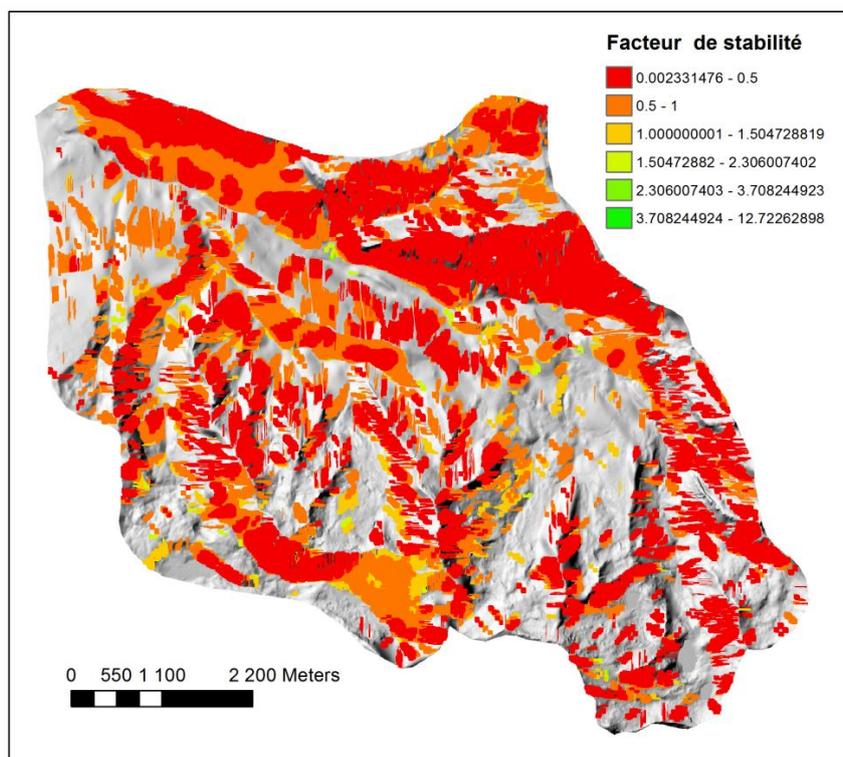


Figure 10 : longueur de glissement 150 m, prof mini 1m, prof max 20m, glissements circulaires,

piezo = topo

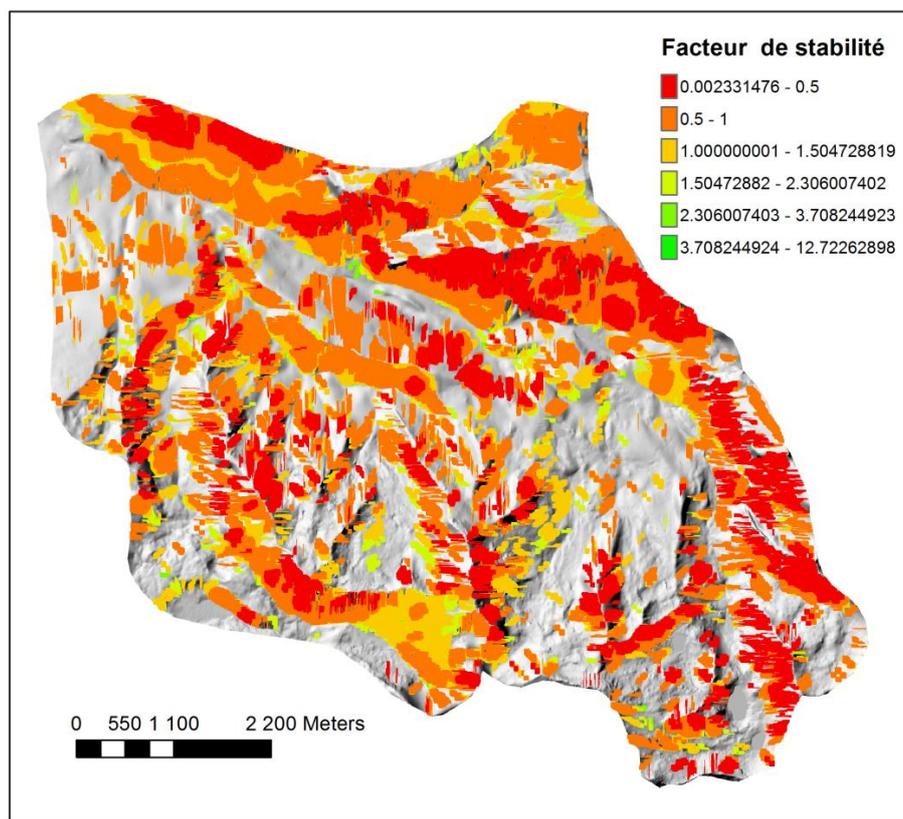


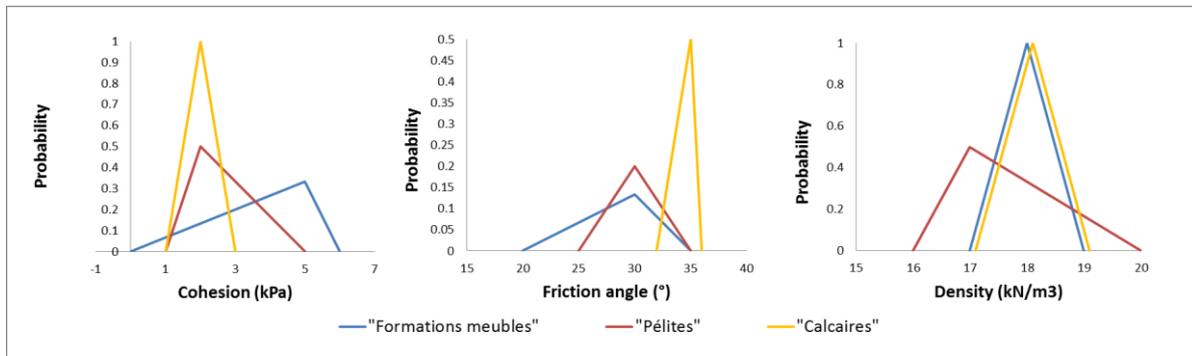
Figure 11 : longueur glissement 150m, prof mini 1m, prof max 20m, glissements circulaires, piezo = topo- 5m

3/ Introduction de lois de distribution pour les paramètres géotechniques :

Alice présente l'intérêt de pouvoir intégrer la variabilité des données géotechniques disponibles sur la zone considérée en intégrant dans les calculs, pour chaque paramètre pris en compte (poids volumique, cohésion et angle de frottement), des lois de distributivité.

Cohésion, angle de frottement interne et poids volumique peuvent ainsi être « entrés » dans Alice sous forme de distributions probabilistes. Les types de distribution suivants sont disponibles :

- Constante : la valeur est une constante ;
- Uniforme : la valeur est équiprobable entre 2 bornes (mini et maxi) ;
- Normale : la valeur est distribuée suivant une loi normale, caractérisée par une valeur médiane et un écart-type ;
- Triangulaire : la distribution est de forme triangulaire. L'utilisateur considère qu'il n'est pas possible que la valeur soit inférieure à un minimum, et supérieure à un maximum, et que la valeur correspondant au sommet du triangle est la plus probable. Ce type de raisonnement rappelle par certains aspects une approche probabiliste ;
- Trapèze : la distribution est de forme trapézoïdale. Proche de la précédente, l'utilisateur considère toutefois que les valeurs au niveau du plateau sont équiprobables.



Exemples de distributions testées, de type triangulaire, pour la variation des caractéristiques géotechniques

*** Approche mise en œuvre sur le secteur de Gourette**

L'objectif de cette partie est de prendre en compte l'effet stabilisateur ou non de la végétation en estimant la profondeur des racines et la cohésion additionnelle qu'elle apporte au sol sur cette profondeur. Ce travail est réalisé sur une petite zone au niveau de la station de Gourette (environ 900 m x 800 m), secteur connu pour une activité glissement avérée et faisant l'objet d'une proposition de protocole de suivi dans le cadre du projet OPCC. Dans cette optique, le logiciel a bénéficié d'un module en cours de développement par le BRGM.

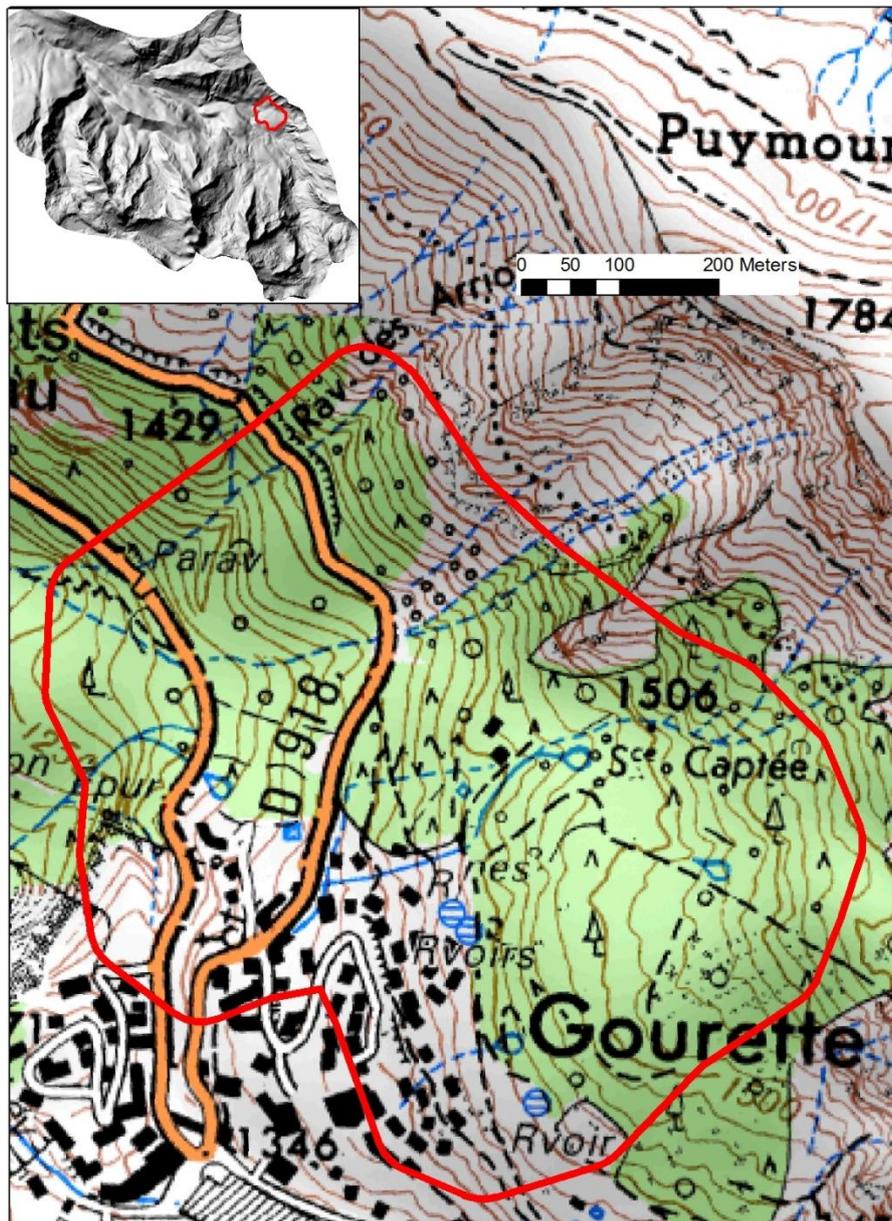


Figure 12 : Localisation de la zone d'étude de Gourette

Une carte des types de boisements rencontrés sur le secteur nous a été fournie par le CRPF Midi-Pyrénées. Trois types principaux de végétation sont différenciés sur la zone modélisée: « *futaie de sapin* », « *autre futaie de hêtre* », et « *boisement lâche* ».

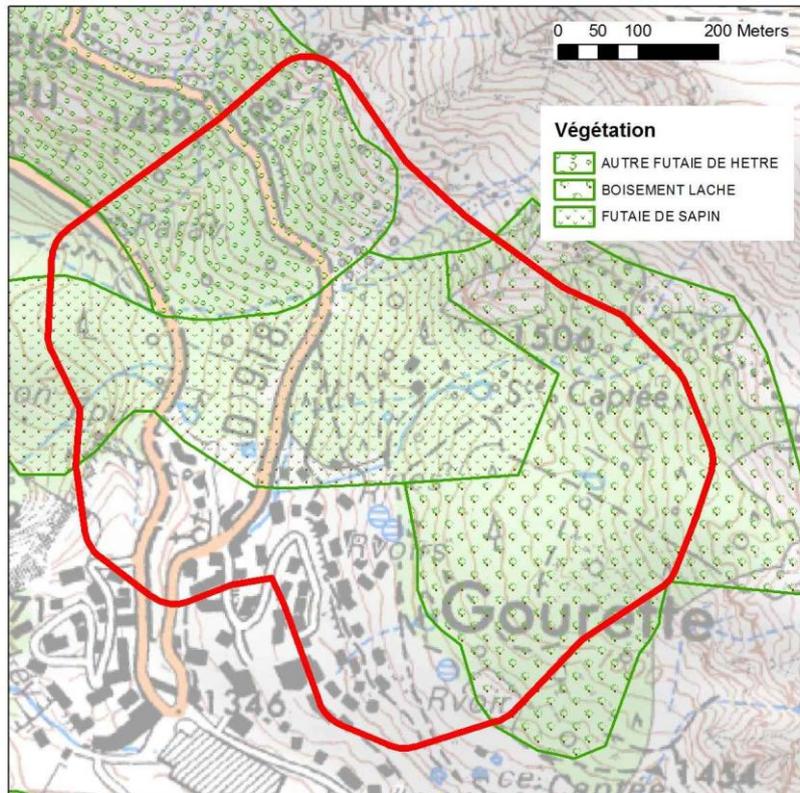


Figure 13 : Cartographie des principaux types de végétation (source CRPF)

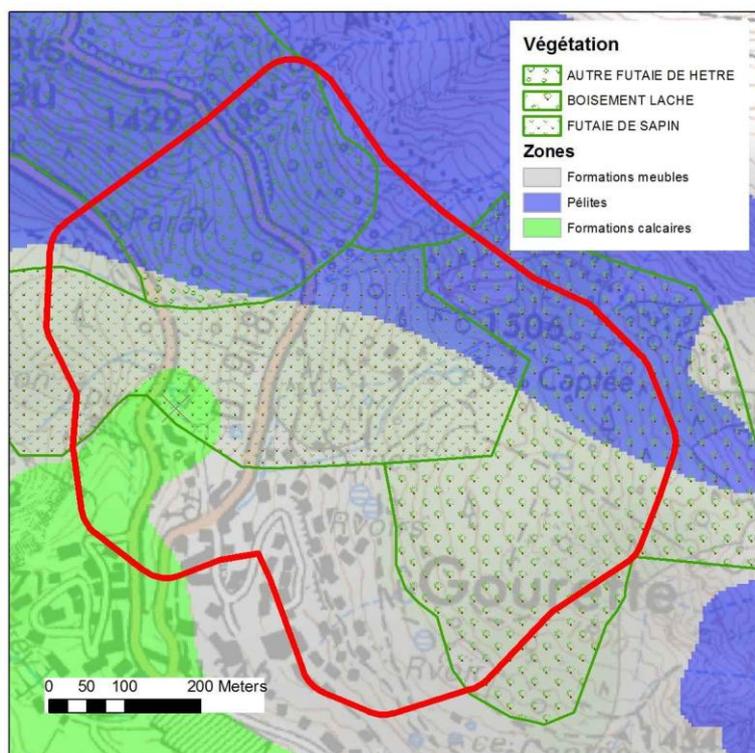


Figure 14 : Cartographie des principaux types de végétation sur les « zones lithologiques »

La prise en compte de l'influence de la « couche » végétation a été rajoutée dans le modèle en ajoutant une cohésion additionnelle sur une épaisseur correspondant à la profondeur présumée des racines (cf. ci-dessous).

	futaie de sapin	futaie de hêtre	boisement lâche
Cohésion additionnelle	5 kPa	3 kPa	2 kPa
Profondeur des racines (en m)	1,5 m	0,5 m	0,5 m

Les calculs de stabilité sont ensuite réalisés en fonction des profondeurs de glissement minimales et maximales imposées. Si la surface de glissement se situe dans les racines, la cohésion utilisée sera celle du sol augmentée de la cohésion additionnelle de l'espèce végétale présente. Si le glissement est plus profond que les racines, la cohésion utilisée sera celle du sol (cf. ci-dessous).

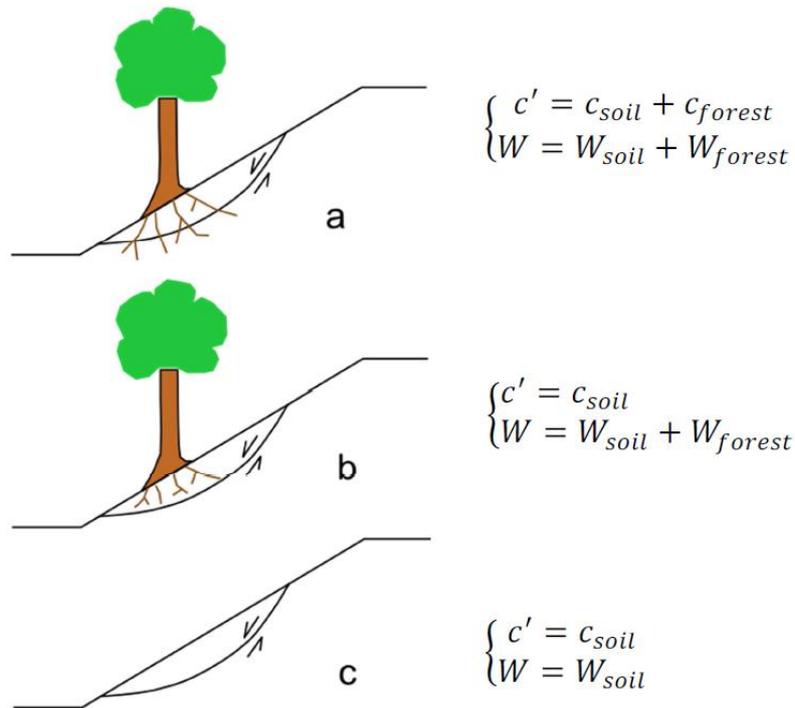


Figure 15 : Principe de prise en compte de l'effet stabilisateur de la végétation

Dans un premier temps, nous avons réalisé un premier test en reprenant les propriétés du modèle réalisé sur l'ensemble de la zone de Laruns, c'est-à-dire les propriétés figurant dans le tableau 1 (figure 57). Les résultats montrent bien une augmentation du facteur de stabilité dans les zones recouvertes de végétation, cette augmentation étant plus ou moins importante selon les cohésions additionnelles et les profondeurs d'enracinement de chaque type de végétation (cf. figure ci-dessous).

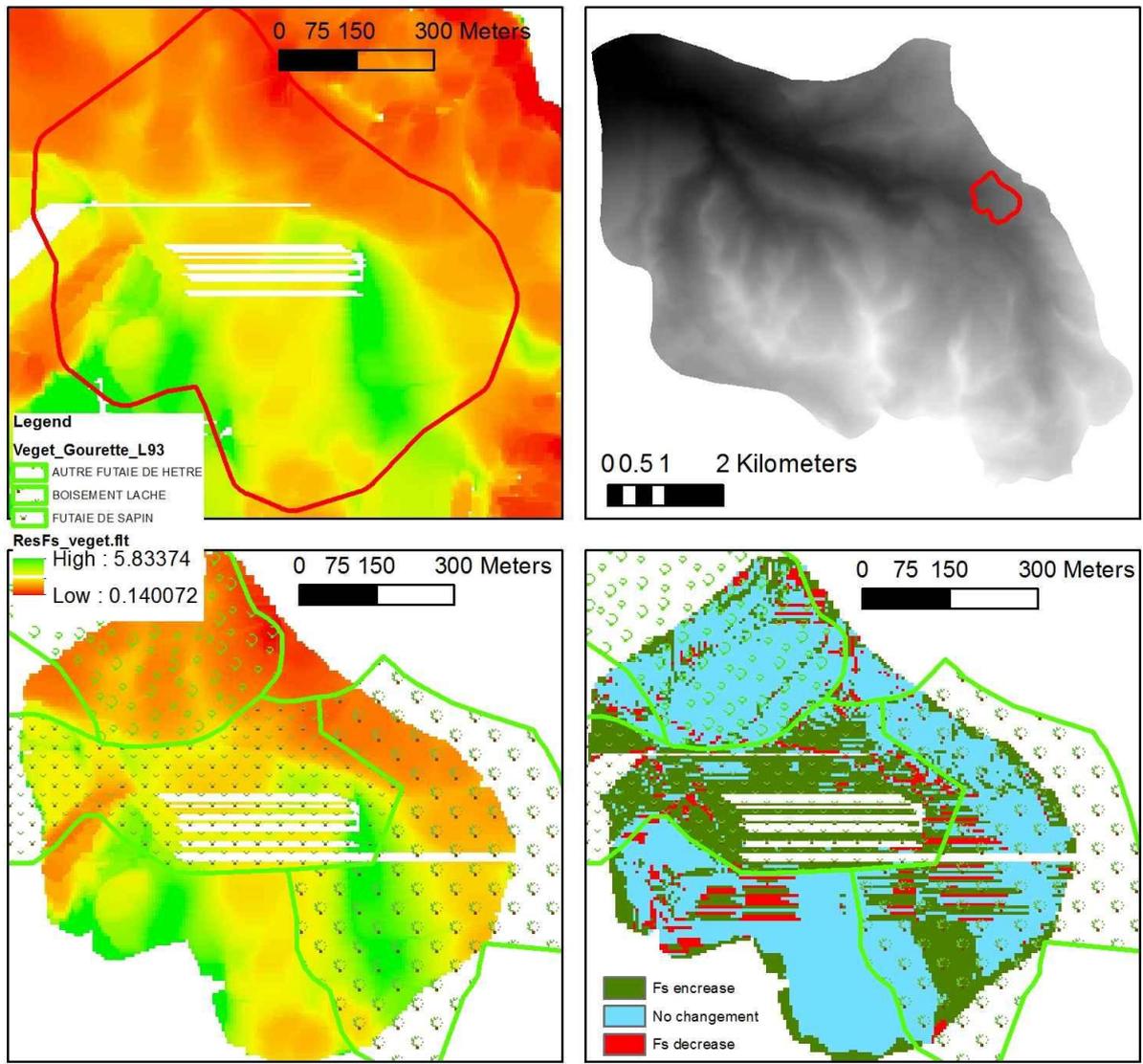


Figure 16 : Résultats pour des longueurs de glissement de 30 m, prof mini 1 m, prof max 5 m, glissements circulaires, piezo = topo- 2m - Représentation du facteur de stabilité sans végétation (en haut à gauche) et avec végétation (en bas à gauche). La différence des deux cartes de facteurs de sécurité (en bas à droite) montre que le facteur de stabilité augmente dans les zones couvertes de végétation.

Adaptation du modèle à la zone de Gourette

Le secteur de Gourette a fait l'objet de reconnaissances de terrain (visuelles), contrairement au reste de la zone de Laruns. Les informations collectées pointent le fait que dans cette zone de Gourette, les formations les plus susceptibles de glisser sont les formations meubles de surface et non les pélites. Or la carte obtenue indique des facteurs de stabilité plus élevés pour les formations meubles que pour les pélites. Une des interprétations est que localement, la zone dénommée « pelites » est plutôt le siège de chutes de bloc favorisées par des discontinuités structurales plutôt que de glissements. Nous supposons donc ici que l'épaisseur de pélites altérées (susceptible de glisser) est donc moins importante que l'hypothèse considérée pour la modélisation réalisée pour l'ensemble de la zone du Laruns (où les plus gros glissements, notamment le glissement de versant de Pleyse, sont situés dans les pélites).

Cette information locale nous conduit à réaliser quelques changements dans le modèle lithologique afin d'être plus réaliste sur le contexte de la zone de Gourette : nous choisissons de considérer la zone des pélites comme une zone relativement stable, recouverte par 2 m d'altération (contre 30 m dans le modèle précédent).

Zone	Cohésion (kPa)	Angle de frottement (°)	Gamma (kN.m ⁻³)	Epaisseur (m)
1 – Formations meubles	5	30	18	25
2 – Pélites	2	30	17	30 2
3 – Calcaires	2	35	18	2
4 – Granites	80	40	19	100
Substratum	40	35	19	100

Tableau 1 – Figure 17: propriétés attribuées à chaque couche supérieure de chaque zone ainsi qu'au substratum commun

Les données piézométriques dont nous disposons actuellement ne sont pas également réparties sur la zone et ne permettent pas de réaliser une extrapolation du niveau piézométrique. Les niveaux relevés au niveau de la station (partie centrale la zone) indiquent un niveau maximum à 2 m de profondeur et un niveau minimum à 16 m de profondeur. Nous utiliserons donc ces 2 niveaux comme référence sur toute la zone.

Les résultats de la modélisation sont représentés sur les figures ci-dessous :

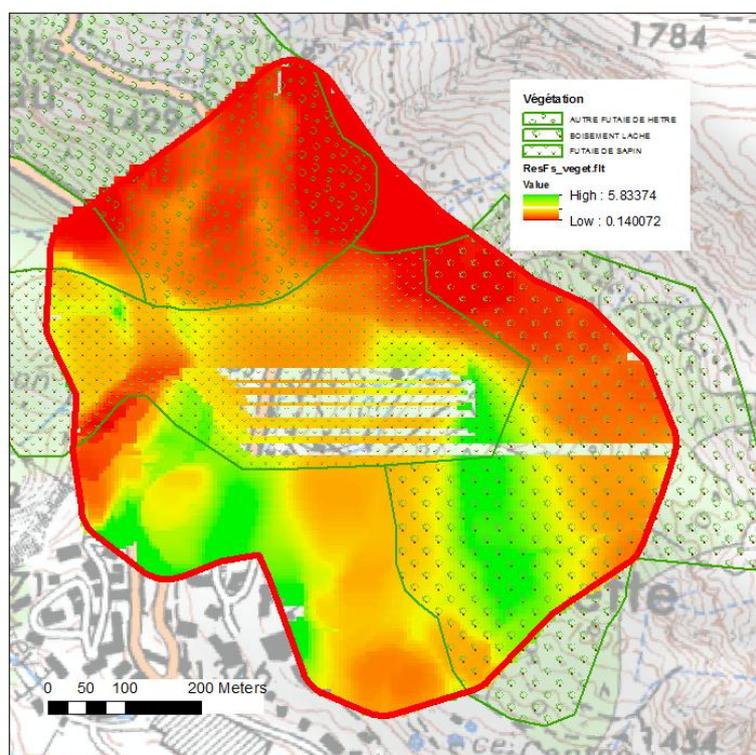


Figure 18 : Facteur de sécurité avec prise en compte de la végétation avec l'ancien modèle - longueurs de glissement de 30 m, prof mini 1 m, prof max 5 m, glissements circulaires, piezo = topo - 2m

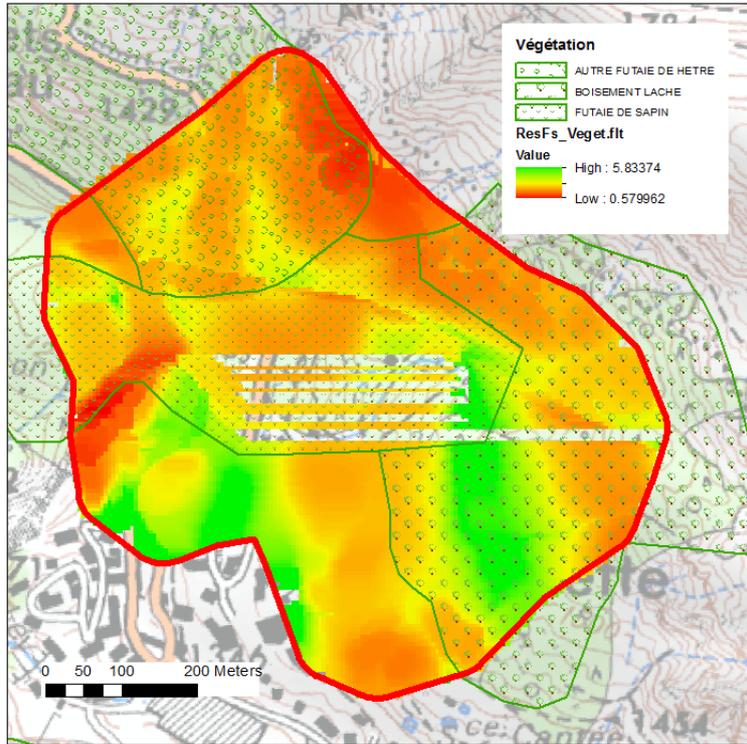


Figure 19 : Facteur de sécurité avec prise en compte de la végétation avec le nouveau modèle - longueurs de glissement de 30 m, prof mini 1 m, prof max 5 m, glissements circulaires, piezo = topo - 2m

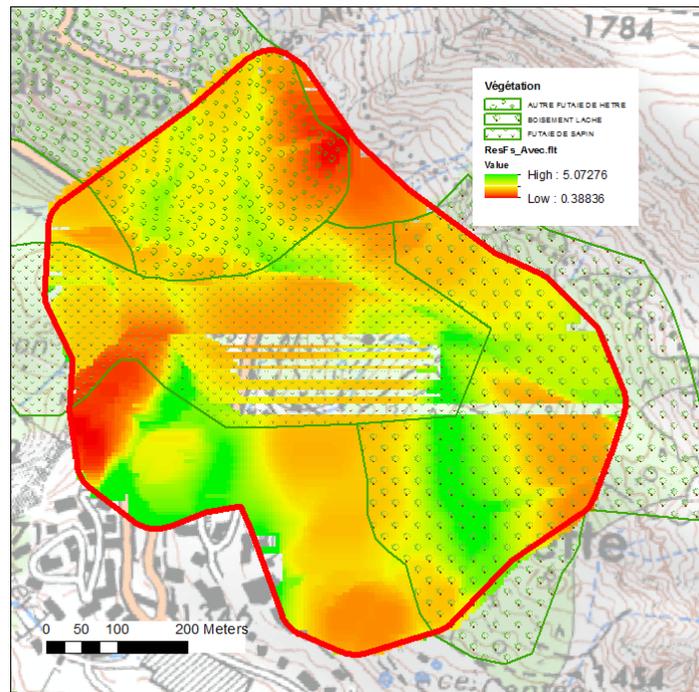


Figure 20 : Facteur de sécurité avec prise en compte de la végétation avec le nouveau modèle pour des grands glissements - longueurs de glissement de 50 m, prof mini 1 m, prof max 20 m, glissements circulaires, piezo = topo - 2m

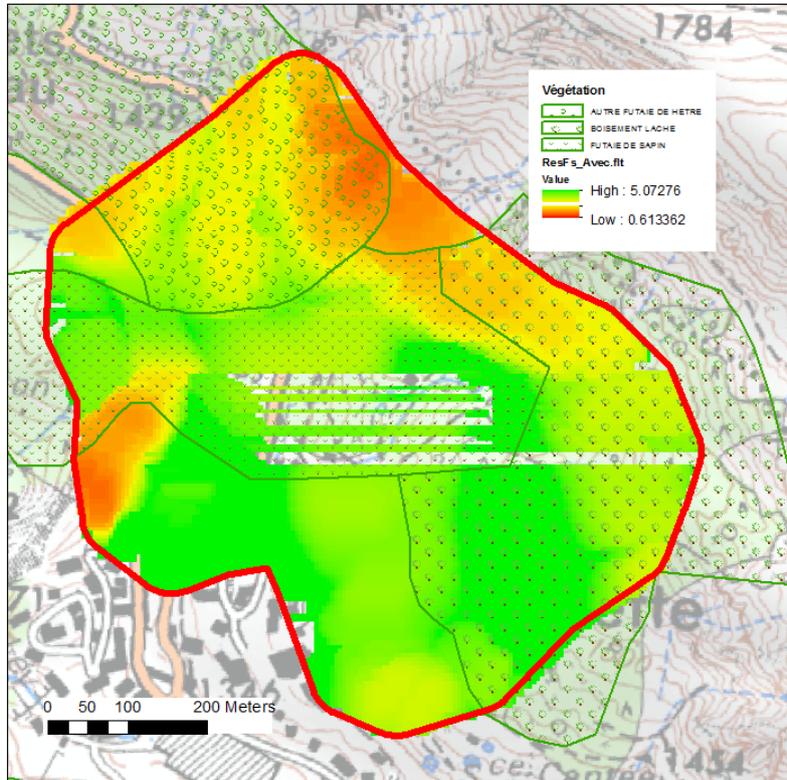


Figure 21 : Facteur de sécurité avec prise en compte de la végétation avec le nouveau modèle pour des grands glissements - longueurs de glissement de 50 m, prof mini 1 m, prof max 20 m, glissements circulaires, piezo = topo - 7 m

□ Éléments de conclusion et perspectives

Points forts :

- Possibilité de mise en œuvre depuis une échelle supra-communale à locale;
- Quantification de la stabilité des terrains par l'évaluation d'une probabilité d'occurrence des glissements, permettant de hiérarchiser les terrains selon leur susceptibilité et d'identifier rapidement les secteurs de la zone d'étude les plus propices au phénomène ;
- Possibilité d'établir différents scénarii selon le niveau de connaissance sur les caractéristiques (géologiques, hydrogéologiques, caractéristiques géotechniques) de la zone d'étude ;

Points sensibles :

- Résultats d'autant plus fiables que la connaissance est forte en matière de caractéristiques géomécaniques des formations en présence (modèle géologique/géotechnique adapté) et hydrogéologiques. Idéalement, il est souhaitable de disposer de données de terrain concernant les niveaux d'eau et de résultats d'essais de laboratoire permettant de caractériser les formations susceptibles de glisser ;
- comme pour toute modélisation, il est important d'avoir du recul sur les résultats obtenus et de toujours les contrôler par des visites de terrain. Sur des zones

d'application restreintes, l'utilisation du logiciel n'a pas pour objectif de remplacer l'approche « experte » sur le terrain, mais permet d'aider l'expert lors de son étude.

Afin d'améliorer le travail accompli à ce stade du projet, plusieurs propositions peuvent être faites :

- Réalisation d'une modélisation par isophyses (épaisseur des couches variables), y compris pour la nappe. Un modèle par isohypses (i.e. carte des altitudes des interfaces des couches) est utilisé lorsque l'on dispose d'un modèle géotechnique 2,5D ou 3D, c'est-à-dire que l'on peut décrire les terrains de l'ensemble de la zone d'étude par un empilage de couches dont on connaît les caractéristiques géotechniques et géométriques. La géométrie peut être très fine, les altitudes des couches (isohypses) étant représentées sous forme raster. Un modèle par isohypses simple n'est composé que d'une seule zone, et d'autant de couches présentes dans la zone d'étude, même si localement une couche peut être manquante (à cet endroit l'isohypse de son toit sera identique à celle de son mur □ épaisseur nulle).
- Mieux connaître, sur le secteur de Gourette et plus largement sur l'ensemble de la zone de référence, l'hydrogéologie et notamment les variations de profondeur de la nappe. Des suivis piézométriques réguliers et pluviométriques combinés permettraient 1/ d'améliorer la fiabilité des cartes de probabilité d'occurrence produites, 2/ d'apprécier en reproduisant à intervalles réguliers les travaux de modélisation l'évolution des probabilités d'occurrence en fonction des impacts du changement impact et 3/ de définir à terme des seuils critiques au-delà desquels des glissements de terrain auraient de fortes probabilités de se déclencher ;
- Affiner le modèle géologique/géotechnique, notamment par la réalisation d'essais géotechniques qui pourraient permettre de réduire l'incertitude sur les distributions des caractéristiques des matériaux et ainsi améliorer la modélisation du comportement du sol ;
- Générer une carte des incertitudes sur les résultats des calculs de probabilité d'occurrence. Ceux-ci devraient notamment se baser sur l'exploitation de l'étalement des distributions des facteurs de sécurité calculés par ALICE® (écart-type par exemple) ;
- Améliorer le module « prise en compte de l'influence de la végétation » du logiciel encore aujourd'hui au stade expérimental. Notamment, un axe de développement concerne l'amélioration de la connaissance relative à la cohésion « fictive » apportée par le couvert végétal, en fonction entre autres de la nature du peuplement et de ses principales caractéristiques (âge, densité, état sanitaire, etc.).

L'appréciation de la vulnérabilité au changement climatique des principales essences forestières jouant un rôle de protection contre les risques naturels

On sort ici du cadre de l'action cartographique à proprement parlé et entrons dans celui du "Guide de Gestion des Forêts Pyrénéennes à enjeu de protection".

Pour rappel, le principe général de la démarche globale est le suivant :

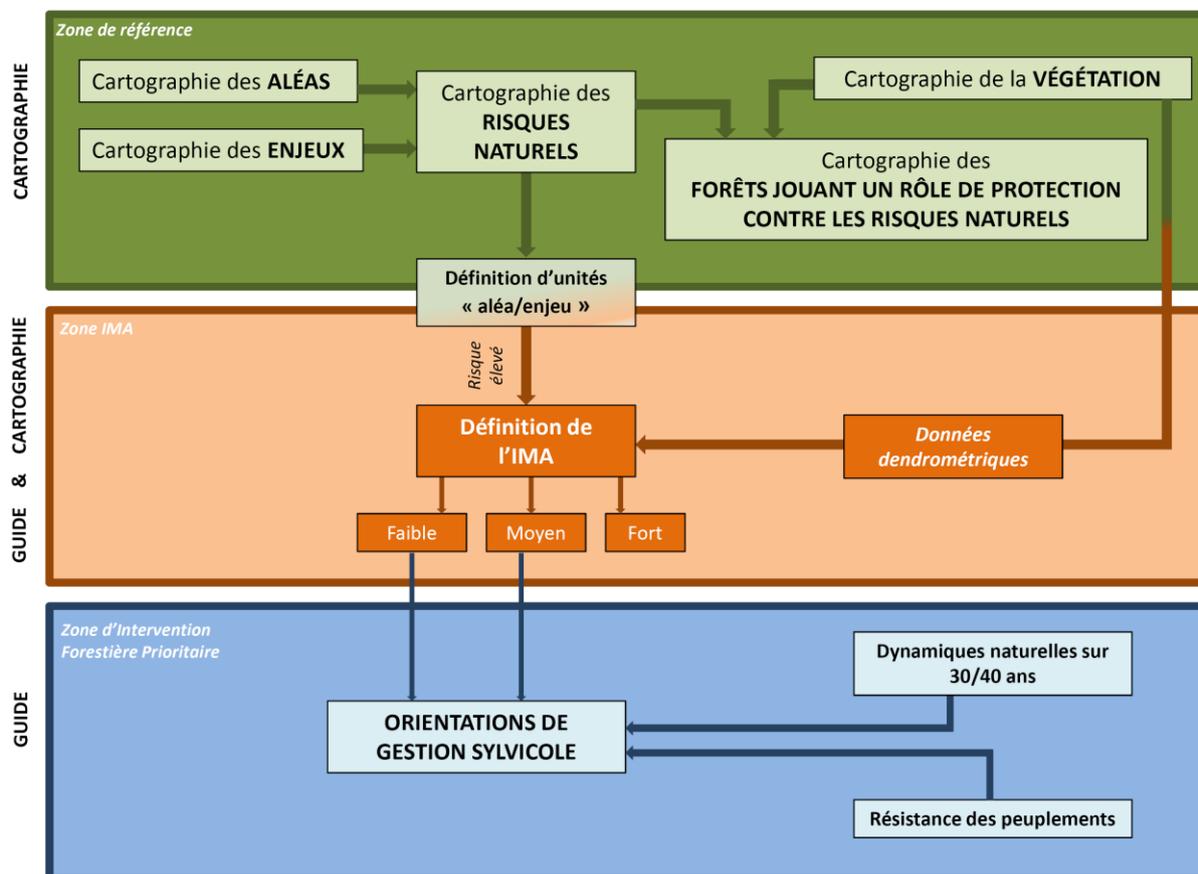


Figure 22 : Logigramme démarche globale Diagnostic / IMA / Guide

La phase finale du diagnostic des peuplements (cadres vert et orange) consiste à définir un indice de maîtrise des aléas **actuel** par les peuplements forestiers. Le rôle actuel de la végétation est évalué par l'Indice de Maîtrise des Aléas (IMA). 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). Le mode d'évaluation de l'IMA varie selon le type d'aléa.

Or l'IMA seul n'est pas suffisant pour évaluer le rôle de la végétation. En effet, il doit être mis en parallèle avec la dynamique naturelle (positive ou régressive) de la végétation à moyen terme (30-40 ans) ainsi qu'avec son niveau de résistance.

L'évolution présumée de chaque unité élémentaire de peuplement permet de constituer une « image » de ce que pourrait être la future couverture végétale de l'unité d'aléa-enjeu, à une échelle de temps de deux aménagements, soit 40 ans.

L'indice futur de maîtrise de l'aléa doit bien intégrer les effets possibles des changements climatiques sur le peuplement forestier ou la végétation.

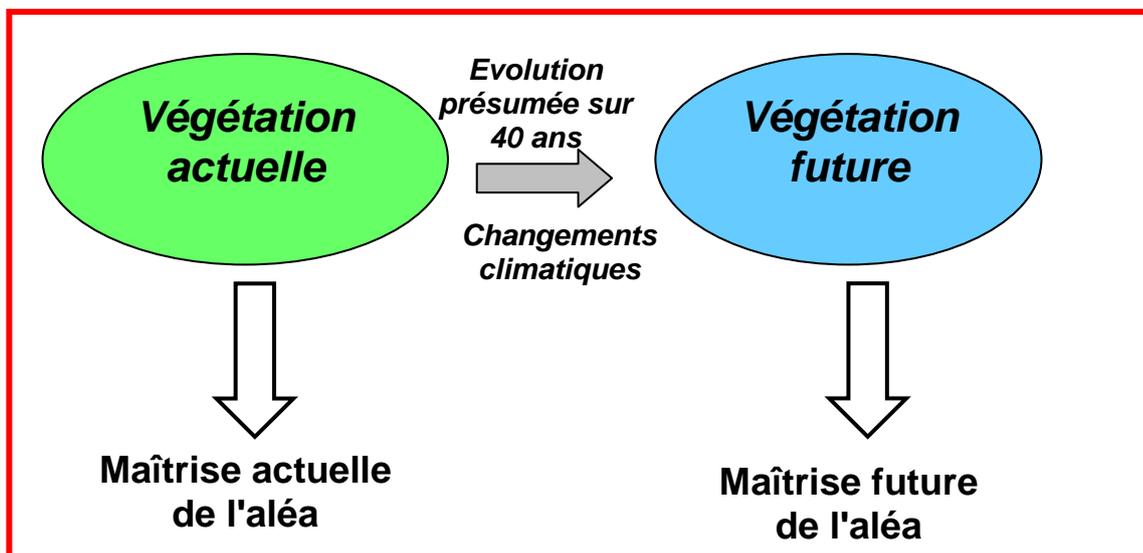
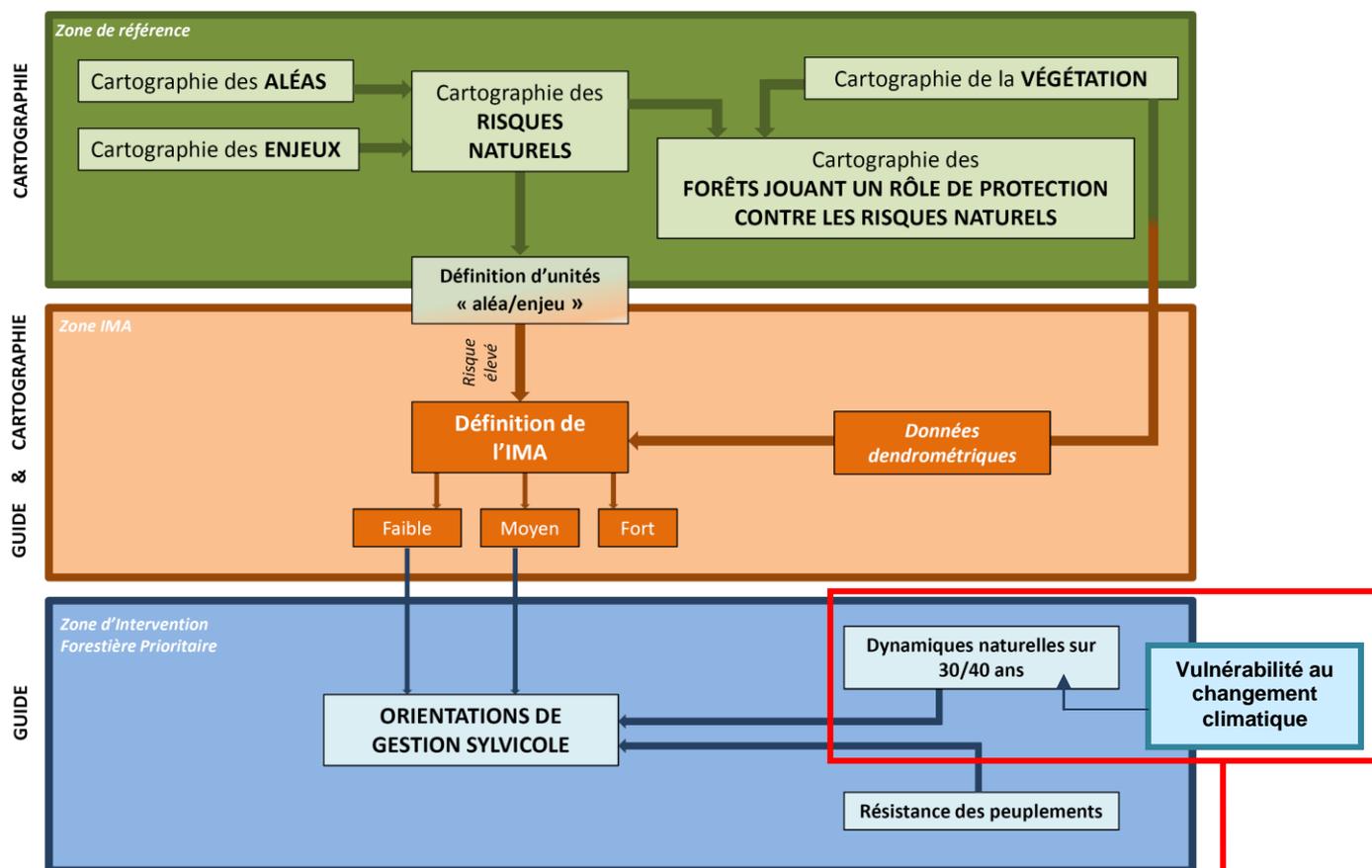


Figure 23 : Schéma prise en compte de la maîtrise future de l'aléa par les peuplements forestiers et la végétation

Pour ce faire, le descripteur s'appuiera sur :

□ des données préalables concernant le comportement possibles des essences face au changement climatique :

Selon la bibliographie, la sensibilité décroissante des essences vis-à-vis de la sécheresse et des changements climatiques serait la suivante :

Sapin pectiné > Hêtre > Pin à crochets (?) > Pin sylvestre > Pin noir > Chêne sessile > Chêne pubescent > Chêne vert

En général, les pins sont assez résistants au stress hydrique. Cependant, s'ils sont affectés, leur dépérissement est souvent irréversible. A l'inverse, les chênes sessile et vert ont généralement une plus grande résilience pour réagir à la sécheresse en développement des formes de résistance.



Le sapin pectiné exige une humidité atmosphérique élevée et constante toute au long de l'année. Les précipitations doivent être d'au moins 1000 mm/an dont 600mm au minimum durant la saison de végétation. Son aire bioclimatique optimale se situe entre 1200m et 1600m d'altitude dans les Pyrénées, préférentiellement en versant nord. Le sapin pectiné est sensible aux sécheresses estivales. Il a une bonne résistance au froid mais avec une certaine sensibilité des bourgeons aux gelées tardives.

Suite aux sécheresses et canicules de 2003, des premiers signes de pertes de vitalités voire des dépérissements sont observés, notamment dans le Pays de Sault à basse altitude (< 1000m) et/ou en exposition chaude.

Le sapin pectiné est pour le moment bien à sa place en versant nord au-delà de 1200 m d'altitude.



Le hêtre est très sensible à l'eau disponible dans le sol en saison de végétation (printemps et été). Ainsi, la répartition du hêtre est bien corrélée au déficit hydrique climatique (Précipitations - Evapotranspiration) en saison de végétation. On considère que ce déficit doit être compris entre 0 et -85mm sur les mois de juin - juillet - août pour que les conditions soient optimales. Le hêtre se plaît sur une gamme de sols très étendue.

C'est une essence qui a des mécanismes de régulations physiologiques efficaces permettant supporter des sécheresses ponctuelles. En revanche, si les sécheresses se prolongent durant la saison de végétation, des dépérissements apparaissent, comme c'est le cas actuellement dans les zones les plus sèches des Pyrénées orientales, en France.

Globalement, on observe toutefois peu de dépérissements à l'échelle des Pyrénées. Avec les changements climatiques, le hêtre devrait être amené à remonter en altitude, surtout dans les zones les plus sèches et/ou avec exposition chaude.



Le pin à crochets est une essence plastique et frugale, particulièrement résistante au froid, aux gelées tardives et au vent. Il peut supporter des sécheresses importantes y compris en période estivale. Il a un fort pouvoir colonisateur des milieux ouverts, mais il a une faible capacité à supporter la concurrence des autres essences forestières. C'est pour cette raison qu'il est dominant là où ses concurrents sont confrontés aux contraintes climatiques fortes entre 1600m et 2300m. A ces altitudes, peu de signes de dépérissements sont constatés pour le moment.

De par leur distribution dans l'étage subalpin, les forêts de pins à crochets sont particulièrement sensibles aux différentes composantes du changement climatique. Avec l'augmentation prévue des températures et l'abandon du pastoralisme, il est probable que le pin à crochets :

- disparaisse progressivement dans ses limites basses de répartition, en entrant en concurrence avec une progression du le pin sylvestre, du sapin pectiné et du hêtre,
- colonise les milieux ouverts supraforestiers non pâturés.

Dans un premier temps, la progression du pin à crochets dans la limite haute de répartition devrait toutefois être plus rapide que la régression dans la limite basse.



Le pin sylvestre est une essence postpionnière nomade, de pleine lumière. C'est une essence frugale et plastique, tolérant les sols pauvres mais chlorosant souvent sur calcaire. Il résiste en général bien à la sécheresse estivale, sauf si celle-ci se répète sur plusieurs années. Le pin sylvestre est sensible au vent mais il ne craint ni le froid, ni les gelées de printemps. Il tolère les sols hydromorphes ou compacts. Il se répartit de 500 à 2000m d'altitude, et au-delà de 1500m, on le retrouve souvent en mélange avec le pin à crochet au contact avec les milieux ouverts. Les précipitations doivent être supérieures à 600 mm/an, avec au moins 100mm durant l'été. La température moyenne annuelle optimale pour cette espèce est comprise entre 7,5 et 10 ° C.

Peu de signes de dépérissements sont observés côté français actuellement. En revanche, côté espagnol, de nombreux dépérissements ont été observés, surtout dans les zones sèches, à sol superficiel et où la concurrence est importante. En effet, de par sa plasticité, le pin sylvestre a colonisé de nombreuses zones délaissées par l'agriculture. Mais maintenant, il commence à dépérir dans les zones aux conditions pédo-climatiques les plus difficiles. Dans sa limite basse de répartition, le pin sylvestre est concurrencé par le chêne pubescent et surtout le chêne vert.



Le pin noir est ici représenté par deux sous-espèces : d'un côté le pin de Salzmann (75%), présent naturellement et majoritairement dans les Pyrénées espagnoles et, de façon relictuelle, en France, et d'un autre côté le pin noir d'Autriche (25%), introduit majoritairement au début du XXème siècle, et surtout en Espagne. Le pin noir est une essence postpionnière nomade, qui se répartit principalement entre 500 et 1200m. C'est également une essence plastique qui supporte tout type de sol, notamment les sols calcaires contrairement au pin sylvestre. Le pin noir résiste en général bien à la sécheresse estivale, sauf si celle-ci se répète sur plusieurs années.



Le chêne sessile est une essence présente dans le piémont pyrénéen, principalement en milieu collinéen. Il semble plutôt bien résister à la sécheresse estivale, sauf si celle-ci se répète sur plusieurs années. Contrairement au chêne pubescent qui peut pousser sur des sols superficiels, souvent calcaires et à faible réserve en eau, le chêne sessile a quand même besoin d'une certaine profondeur de sol pour se développer convenablement et préfère les sols à tendance acide. Avec les changements climatiques, le chêne sessile pourrait être amené à coloniser les pineraies et les hêtraies.

Le chêne pubescent résiste bien aux conditions chaudes et sèches y compris aux sécheresses estivales. Il semble également assez bien supporter le froid. Le chêne pubescent se cantonne pour le moment sur des stations sèches de l'étage méso méditerranéen, souvent en versant sud et/ou dans des conditions de sécheresse marquée, poussant là où d'autres essences ne peuvent pas s'implanter.

Dans les milieux sous influence méditerranéenne marquée, il peut être concurrencé par l'expansion des garrigues à chêne vert ou pins méditerranéens. Avec les changements climatiques, le chêne pubescent pourrait être amené à coloniser les pineraies et les hêtraies dans les zones les plus sèches.

Le chêne vert est présent dans les étages méso et supraméditerranéen jusqu'à 600 mètres. Il se développe généralement dans les milieux à faible réserve hydrique, sur sols superficiels, notamment les sols calcaires. Avec les changements climatiques, il pourrait être amené à coloniser les chênaies pubescentes et les peuplements de pin noir.

□ Changements climatiques, dynamique forestière et changement d'essences :

Deux paramètres sont importants à évaluer concernant l'impact des changements climatiques sur la maîtrise des aléas : la dynamique forestière et le changement d'essence. Dans les paragraphes suivants sont rassemblés les cas de figure existants, et valable pour tous les aléas.

- Il existe 7 grands types de DYNAMIQUE possible :

➤ **dynamique forestière stable : forêt > forêt, avec la même essence**

Le peuplement forestier arrive à s'adapter, notamment grâce à la diversité génotypique et la sélection naturelle, tout en conservant les mêmes essences.

➤ **dynamique forestière neutre : forêt > forêt, avec changement d'essence**

Le peuplement forestier arrive à maintenir un stade boisé continu, par substitution d'essence. Ce cas est possible pour les peuplements naturellement mélangés à l'origine et dont la proportion des essences change au cours du temps. C'est le cas par exemple d'une sapinière - hêtraie qui devient une hêtraie.

➤ **dynamique forestière neutre avec stade arbustif intermédiaire : forêt > arbustes > forêt**

Le peuplement forestier dépérit rapidement pour aboutir à un stade arbustif mais, grâce à la dynamique des peuplements à proximité, le milieu boisé se reforme progressivement. C'est le cas par exemple d'une sapinière peu mélangée et dépérissante qui se reconstitue en hêtre. Ce type de dynamique devrait avoir un impact négatif temporaire sur la maîtrise des aléas avalanches et chutes de blocs.

➤ **dynamique forestière régressive : forêt > lande-pelouse**

Il s'agit d'un dépérissement d'une essence, non remplacée par une autre essence, qui disparaît progressivement pour laisser place à un stade lande-pelouse. Ce risque vis-à-vis des changements climatiques existe surtout dans le cas de zones sèches (faibles précipitations) et/ou avec sol superficiel/faible réserve utile. La disparition rapide du couvert forestier n'est alors pas suivie d'une reconquête par la forêt. C'est le cas par exemple d'une pineraie sylvestre homogène et dense, située en zone sèche sur sol superficiel qui dépérit rapidement après un épisode de plusieurs étés secs. La dynamique forêt > lande-pelouse devrait avoir un impact négatif durable sur la maîtrise des aléas avalanches et chutes de blocs.

➤ **dynamique herbacée régressive : lande-pelouse > terrain peu végétalisé**

Comme ci-dessus, il s'agit surtout d'un contexte de zone sèche (faibles précipitations) et/ou avec sol superficiel/faible réserve utile. Elle concernerait en priorité les milieux herbacés méditerranéens exposés au sud. La dynamique lande-pelouse > terrain peu végétalisé devrait avoir un impact négatif sur la maîtrise des aléas érosion superficielle, crues torrentielles et glissement de terrain.

➤ **dynamique forestière positive : lande-pelouse > forêt**

Avec l'augmentation des températures, la colonisation par la forêt des franges supraforestières d'altitude non pâturées est attendue, ces zones d'altitude étant de plus en plus arrosées en précipitations. Cette colonisation devrait a priori se faire principalement à partir de pins, et dans une moindre mesure à partir de sapin pectiné ou de hêtre. Les pins sont de bons colonisateurs de milieux ouverts. La dynamique lande-pelouse > forêt devrait avoir un impact positif sur la maîtrise des aléas avalanches et chutes de blocs.

➤ **dynamique herbacée positive : terrain peu végétalisé > lande-pelouse**

Comme ci-dessus, cela concerne surtout les zones de haute altitude non végétalisées dont l'augmentation des températures permettrait la colonisation par les herbacées. La dynamique terrain peu végétalisé > lande-pelouse devrait avoir un impact positif sur la maîtrise des aléas érosion superficielle, crue torrentielle et glissement de terrain.

○ Changements possibles d'essences :

Globalement, pour la colonisation, la succession d'essences devrait être du type :

- Dans les zones les plus humides :

Pin à crochets > Sapin pectiné > Hêtre > Chênes,

- Dans les zones les plus sèches :

Pin à crochets > Pins (sylvestre et noir) > (Hêtre) > Chênes.

Compte-tenu des essences concernées et du contexte climatique, les dynamiques de groupes d'essences possibles semblent être de type :

résineux > résineux, résineux > feuillus ou feuillus > feuillus.

Sur les Pyrénées, il semble peu probable d'assister des dynamiques naturelles de type feuillus > résineux liées aux changements climatiques, sauf évènement extérieur tel un incendie.

□ le calcul de l'Indice de maîtrise de l'aléa, avec analyse de l'impact possible des changements climatiques et autres menaces sur le milieu naturel

Une fois ces éléments généraux déterminés il est possible de détailler les conséquences des changements climatiques en fonction des différents aléas et de l'incidence de celui-ci sur la maîtrise des aléas par les peuplements forestiers.

Exemple : **AVALANCHES**

Exemple tiré du « Guide de gestion des forêts pyrénéennes à rôle de protection contre les aléas naturels - Andorre / Espagne / France

Pour cet aléa, l'IMA est déterminé à l'échelle du peuplement élémentaire.

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 : CAS DES RESINEUX (SAUF MELEZE*)	Aléa déclaré en forêt	0	1	2	3
	Aléa potentiel en forêt	0	2	5	6

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 : CAS DES FEUILLUS + MELEZE*	Aléa déclaré en forêt	0	1	2	3
	Aléa potentiel en forêt	0	2	3	5

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

* : Le mélèze est associé aux feuillus car son feuillage n'est pas persistant, à l'inverse des autres résineux, ce qui limite l'interception de la neige pas le couvert forestier.

Impacts possibles des changements climatiques et autres menaces sur la maîtrise future de l'aléa "avalanche" par les peuplements forestiers :

Les dynamiques de végétation pouvant être liées aux changements climatiques et impactant la maîtrise de l'aléa sont de type :

➤ **dynamique forestière neutre :**

forêt > forêt (avec peuplement souvent mélangé au départ).

Impact sur la maîtrise de l'aléa : neutre (à négatif), avec phase transitoire plus sensible. Le peuplement mélangé d'origine passe par une phase moins efficace lorsqu'une partie des tiges dépérit au profit d'autres car le couvert forestier, même s'il reste, est alors moins dense pour bien retenir la neige. La transition devrait être plutôt rapide, les tiges qui composeront le peuplement futur étant déjà présentes dans le peuplement d'origine.

Dans le cas d'un changement résineux > feuillus, ce qui devrait être le cas le plus fréquent, le rôle de maintien du manteau neigeux étant moins bon pour les feuillus, on peut supposer que le peuplement futur sera probablement moins efficace.

Milieux les plus exposés / vigilance particulière : ce cas peut potentiellement concerner beaucoup de milieux et de situations. Cela concerne surtout les essences (en mélange) en limite de répartition, ou dans les zones sèches (faibles précipitations) et/ou avec sol superficiel/faible réserve utile.

➤ **dynamique forestière neutre avec stade arbustif intermédiaire :**

forêt > arbustes > forêt (avec peuplement souvent peu mélangé au départ, et dépérissement rapide).

Impact sur la maîtrise de l'aléa : neutre avec phase transitoire négative. Le dépérissement rapide du peuplement amène à une phase arbustive transitoire qui ne présente plus d'efficacité pour la maîtrise de l'aléa, le couvert arboré ayant disparu. La recolonisation, bien que lente, se fera alors à partir des peuplements adjacents, probablement à partir d'autres essences. Cependant, cette phase de recolonisation risque d'être ralentie en cas de reprise de l'aléa dans les zones de départ d'avalanches. Les arbres morts restant sur pieds ou au sol conserveront néanmoins un rôle transitoire de maintien du manteau neigeux et protégeront la régénération à venir.

Milieux les plus exposés / vigilance particulière : Les sapinières et pineraies à rôle de protection contre les avalanches sont potentiellement concernées si elles sont en limite de répartition, et plus particulièrement dans les zones sèches (faibles précipitations) et/ou avec sol superficiel/faible réserve utile.

➤ **dynamique forestière régressive :**

forêt > lande-pelouse

Impact sur la maîtrise de l'aléa : négatif. Ce type de dynamique correspond à un dépérissement irréversible du peuplement forestier vers un stade de lande - pelouse, en passant par un stade arbustif. La forêt ne joue alors plus son rôle de protection contre les avalanches.

Milieux les plus exposés / vigilance particulière : Les sapinières et pineraies à rôle de protection contre les avalanches sont potentiellement les plus concernées si elles sont en limite de répartition, et plus particulièrement dans les zones sèches (faibles précipitations) et/ou avec sol superficiel/faible réserve utile.

➤ **dynamique forestière positive :**

lande-pelouse > forêt

Impact sur la maîtrise de l'aléa : positif. Ce type de dynamique permet d'améliorer nettement le rôle de protection, surtout lorsque cette recolonisation se fait en remontant le long de la pente vers la zone de départ des avalanches, ce qui permettra de maintenir le manteau neigeux.

Milieus concernés : zones de haute altitude non boisée dont l'augmentation des températures permettrait la colonisation par les arbustes puis les arbres.

Les autres types de dynamique décrits au § « Changements climatiques, dynamique forestière et changement d'essences » ont un impact neutre sur la maîtrise de l'aléa.

➤ **Menace supplémentaire induite par le risque incendie :**

Un incendie du couvert forestier aurait pour conséquence la disparition partielle voire totale du couvert arboré, et donc une très forte baisse de la maîtrise de l'aléa par la végétation. Les tiges calcinées auraient encore pour une courte durée une fonction de maintien du manteau neigeux et protégeront ensuite la régénération à venir, jusqu'à l'effondrement complet du peuplement. En cas de feu courant au sol, la maîtrise de l'aléa ne serait pas modifier sauf si les blessures au pied des arbres entraînent le dépérissement puis la mort d'une partie du peuplement.

➤ **Menace supplémentaire induite par un déséquilibre faune - flore :**

Un déséquilibre faune - flore ne représente pas un danger à court terme pour la protection contre les avalanches. En revanche, il posera un problème au moment du renouvellement du peuplement, du fait de l'abrutissement des semis.

Dans la définition des priorités d'intervention par le gestionnaire forestier, l'évaluation de la maîtrise future des aléas est très importante : l'évolution de l'IMA dans le temps permet de déterminer un niveau de priorité. En fonction du risque naturel et de la priorité d'intervention la décision est prise ou non d'intervenir. Il est en effet inutile d'intervenir lorsque l'évolution spontanée de la végétation garantit le maintien ou l'amélioration de la maîtrise de l'aléa. A l'inverse, une intervention est d'autant plus prioritaire et rapide si la maîtrise future de l'aléa diminue en efficacité car il y a alors un risque de reprise de l'aléa, et des coûts d'interventions plus importants.

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" où sont déclinées les interventions préconisées en fonction du couplage des trois données « IMA », « détermination de la résistance des peuplements » et « évolution présumée des milieux forestiers à moyen terme ».

Le descripteur sera alors en mesure d'intégrer les éléments relatifs à la vulnérabilité des essences forestières dans l'utilisation des clés de détermination de l'évolution présumée des milieux.