ANALYSE COÛT-BÉNÉFICE APPLIQUÉE AUX RISQUES NATURELS DE MONTAGNE :

Intégration des fonctions de la forêt dans l'évaluation économique des stratégies de protection contre les chutes de blocs

Dominante d'approfondissement
Gestion forestière

Vincent GOUIN

Année 2012/2013

Illustration page de couverture :
Falaise du Mont Saint-Eynard surplombant la commune de Meylan (38).
Source : Communauté d'agglomération Grenoble-Alpes Métropole

AGROPARISTECH

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
Service RTM de l'Isère

ANALYSE COÛT-BÉNÉFICE APPLIQUÉE AUX RISQUES NATURELS DE MONTAGNE :

Intégration des fonctions de la forêt dans l'évaluation économique des stratégies de protection contre les chutes de blocs

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Dominante d'approfondissement : Gestion forestière

Vincent Gouin

Année 2012/2013

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE D'AGROPARISTECH – Centre de Nancy

Formation d'ingénieur AgroParisTech- Dominante d'approfondissement Gestion forestière	**TRAVAUX D'ÉLÈVES**
TITRE : Analyse coût-bénéfice appliquée aux risques naturels de montagne *Intégration des fonctions de la forêt dans l'évaluation économique des stratégies de protection contre les chutes de blocs*	**Mots clés :** forêt de protection ; chute de blocs ; analyse coût-bénéfice ; risques naturels ; montagne.
AUTEUR(S) : Vincent GOUIN	**Promotion :** 1ère
Caractéristiques : 1 volume ; 78 pages ; 18 tableaux ; 14 figures ; 5 annexes ; bibliographie.	

CADRE DU TRAVAIL

ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : Office National des Forêts – Service Restauration des Terrains en Montagne de l'Isère

Nom du responsable : Yannick Robert

Fonction : Ingénieur géomorphologue

Tronc commun	☐	**Stage en entreprise**	☐	**Autre**	☐
Option	☐	**Stage à l'étranger**	☐		
D. d'approfondissement	☒	**Stage fin d'études**	☒		
		Date de remise : 15 / 09 / 2013			

SUITE À DONNER (réservé au service des études)

☒ **Consultable et diffusable**

☐ **Confidentiel de façon permanente**

☐ **Confidentiel jusqu'au / / , puis diffusable**

RÉSUMÉ

Ce mémoire traite de l'application de l'analyse coût-bénéfice dans le cadre de l'évaluation des stratégies de protection contre les risques naturels de montagne. Cet outil d'analyse économique permet de comparer différents projets d'investissement selon leur valeur actualisée nette, variable synthétique qui regroupe à la fois les coûts et les bénéfices attendus du projet.
Se plaçant dans le contexte réglementaire défini par le Plan de Prévention des Risques Naturels, l'étude vise à intégrer les rôles de la forêt et de sa gestion dans une stratégie plus globale de protection.
À partir de l'aléa « chute de blocs rocheux », une méthodologie d'analyse coût-bénéfice permettant d'intégrer la forêt en tant que projet d'intervention à part entière a été élaborée. Elle s'inspire des résultats de l'étude économique réalisée dans le cadre du programme de coopération transfrontalière INTERREG « Forêt de protection », et se base sur un cas concret situé sur la commune de Fontaine (38).
Les résultats montrent une grande sensibilité du modèle économique par rapports aux nombreux paramètres auxquels il fait appel. Ils fournissent également des pistes de réflexion pour l'application de l'analyse coût-bénéfice au niveau d'un bassin de risque, échelle couramment retenue dans l'organisation de la lutte contres les risques naturels.

ABSTRACT

This report deals with the application of a cost-benefit analysis adapted to the assessment of mountainous natural hazards and their protection strategies. This economic tool is based on the comparison between different investment projects according to their net present value, which takes into account both costs and potential benefits of the project.
This study aims at integrating the functions of forest lands into a global protection strategy, defined by the French scheme of natural hazard assessment (Plan de Prévention des Risques Naturels).
Thank to the example of the rock fall hazard, a cost-benefit methodology has been settled, considering forest management as a concrete protection project. This method is based on a case study and uses results of a previous study, which is part of the research program called INTERREG "Protection Forests".
Results show a high sensibility of the economic model depending on multiple parameters. They also provide some ideas aiming at adapting the cost-benefit analysis to the risk basin scale, which is commonly used in the organization of natural hazard protection.

Sommaire

REMERCIEMENTS **1**

INTRODUCTION **2**

PARTIE 1 : ÉTAT DES LIEUX : LA CONNAISSANCE ET LA GESTION DES RISQUES NATURELS, LES RÔLES DE LA FORÊT. **3**

1 LA MONTAGNE : UN TERRITOIRE FORTEMENT CONCERNÉ PAR LES RISQUES NATURELS **3**

1.1 ALÉA, ENJEU, RISQUE 3
1.2 DES ALEAS NATURELS VARIES ET COMPLEXES 4
1.2.1 Eboulement, chutes de blocs et de pierres *4*
1.2.2 Avalanche *5*
1.2.3 Glissement de terrain *6*
1.2.4 Crues torrentielles *6*
1.2.5 Erosion *6*

2 LA GESTION DES RISQUES NATURELS EN FRANCE : UNE PRISE EN COMPTE PERFECTIBLE DES EFFETS DE LA FORET **7**

2.1 LES ROLES ET LA GESTION DES FORETS DE PROTECTION 7
2.1.1 Les rôles des forêts de protection *7*
2.1.2 La gestion des forêts de protection *9*
2.1.3 Des progrès possibles *10*
2.2 LE PLAN DE PREVENTION DES RISQUES NATURELS PREVISIBLES : L'OUTIL REGLEMENTAIRE D'AFFICHAGE DES RISQUES 11
2.2.1 Présentation *11*
2.2.2 Elaboration de la carte d'aléa et du zonage réglementaire *12*
2.2.3 Une prise en compte aléatoire de la forêt *13*
2.2.4 Conclusion *13*
2.3 LA PROTECTION CONTRE LES RISQUES NATURELS : UNE ACTIVITE COUTEUSE, DANS UN CONTEXTE ECONOMIQUE DIFFICILE 13
2.4 NECESSITE D'INTEGRER DAVANTAGE LA FORET DANS LA STRATEGIE GLOBALE DE GESTION DES RISQUES 14
2.5 L'ÉVALUATION ECONOMIQUE : UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION UTILE POUR LES DECIDEURS 14

PARTIE 2 : L'ANALYSE COUT-BÉNÉFICE APPLIQUÉE AUX FORETS DE PROTECTION : ÉTAT DES LIEUX DES CONNAISSANCES, SAVOIR-FAIRE ET EXPÉRIENCES. **15**

1 DES OUTILS D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE VARIÉS POUR DES OBJECTIFS DIFFERENTS **15**

1.1 METHODES BASEES SUR DES ENQUETES AUPRES DE LA POPULATION 15
1.2 METHODES BASEES SUR UN CALCUL ECONOMETRIQUE 16

2 PRINCIPES GÉNÉRAUX DE L'ANALYSE COUT-BÉNÉFICES **16**

2.1 FORMULE GÉNÉRALE 16
2.2 UNE DEFINITION DES COUTS ET DES BENEFICES PARFOIS DIFFICILE 17

3 SYNTHÈSE DES PRINCIPALES EXPÉRIENCES PASSÉES **18**

3.1 ANALYSE COUT-BENEFICE DANS LE CONTEXTE DES INONDATIONS DE PLAINES : QUELS ENSEIGNEMENTS POUR L'APPLICATION AUX ALEAS DE MONTAGNE ? 18
3.2 TRAVAUX SUISSES : RISKPLAN ET ECONOME, UNE APPROCHE PRAGMATIQUE 19
3.3 ACTION 2.4.1 DU PROGRAMME INTERREG « FORETS DE PROTECTION » : ALEA CHUTE DE BLOC ET PRISE EN COMPTE DE LA FORET 19
3.3.1 Quelle échelle ? *20*
3.3.2 Quelle méthodologie ? *20*
3.3.3 Quels résultats ? *21*

3.4 SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES 22

PARTIE 3 : ANALYSE COUT-BÉNÉFICE APPLIQUÉE À L'ALÉA "CHUTE DE BLOCS" 23

1 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE 23

1.1 OBJECTIFS 23
1.2 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE 23
1.2.1 Définition de scénarios 24
1.2.2 Présentation du calcul économique 24

2 MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE COUT-BÉNÉFICE À L'ÉCHELLE LOCALE 26

2.1 CHOIX DU SITE D'ETUDE ET DE LA DUREE DE CALCUL 28
2.2 CHOIX DE L'ALEA DE REFERENCE 30
2.3 DETERMINATION DE LA FREQUENCE DE DEPART DES BLOCS 31
2.4 MODELISATIONS ROCKYFOR3D 32
2.4.1 Présentation du logiciel 32
2.4.2 Récoltes des données nécessaires à la modélisation 33
2.4.3 Prise en compte de l'évolution des peuplements forestiers 36
2.4.4 Nombre de modélisations 38
2.5 DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES DE GENIE CIVIL 39
2.6 INVENTAIRE ET ANALYSE DES ENJEUX 39
2.7 CALCUL ECONOMIQUE 40

3 RÉSULTATS DE L'ANALYSE COUT-BÉNÉFICE APPLIQUÉE À L'ÉCHELLE LOCALE 40

3.1 NOTIONS D'EFFICACITÉ 40
3.2 RÉSULTATS BRUTS 41
3.3 COMPARAISON AVEC LES RESULTATS DU PROGRAMME INTERREG 42
3.4 SENSIBILITÉ DU MODÈLE ÉCONOMIQUE 44
3.4.1 Valeur de la vie humaine 44
3.4.2 Taux d'actualisation 45
3.4.3 Vulnérabilité du bâtiment 45
3.4.4 Fréquence de départ 47
3.5 RESULTATS EN FONCTION DES VOLUMES DE DEPART ET DE LA VALEUR DE L'ENJEU 48
3.5.1 Efficacité nette de la forêt en fonction du volume maximal de départ 48
3.5.2 Influence de la valeur de l'enjeu 49
3.5.3 Analyse paramétrique 50
3.5.4 Influence de l'efficacité brute de la forêt 51
3.5.5 Influence de la fréquence de départ 52
3.5.6 Extrapolation à un enjeu de type linéaire 53
3.6 CONCLUSIONS POUR LE SITE DE FONTAINE 55

4 CONSÉQUENCES POUR UNE APPLICATION À L'ÉCHELLE TERRITORIALE 56

4.1 AMELIORATION DU TEMPS D'ETUDE POUR CHAQUE UNITE ALEA - ENJEU 56
4.1.1 Diminution de la phase de relevés de terrain 56
4.1.2 Diminution du nombre de simulations Rockyfor3D 57
4.1.3 Optimisation des tâches informatiques 57
4.1.4 Les limites 57
4.2 HIERARCHISATION DES UNITES ALEA – ENJEU 58
4.2.1 Critères de sélection 58
4.2.2 Exemples de situations favorables à l'analyse coût-bénéfice intégrant la forêt 59
4.3 AUTRES SITES D'ETUDE ENVISAGES 59

CONCLUSION 60

Tables des annexes

Annexe 1 : Principaux ouvrages de protection de génie civil utilisés dans la protection contre les risques naturels 63

Annexe 2 : Détail des calculs du modèle économique 66

Annexe 3a : Script R pour la modélisation du « fichier arbre » initial 68

Annexe 3b : Script R pour l'évolution des peuplements et l'établissement des « fichiers arbre » intermédiaires 71

Annexe 4 : Protocole de relevé des données de terrain 73

Annexe 5 : Données de l'IFN utilisées dans l'étude 76

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement Yannick Robert pour m'avoir pris en stage au service RTM de l'Isère. Toujours disponible pour répondre à mes nombreuses interrogations malgré un emploi du temps chargé, il a su m'éclairer et m'accompagner dans la compréhension de ce domaine complexe qu'est la gestion contre les risques naturels.

Je remercie particulièrement Sylvain Dupire, pour ses explications et ses avis précieux concernant ses travaux dans le cadre du programme INTERREG IFP.

Merci également à Henri Moulin, Claire Dubois, Ingrid Boncompain, François-Xavier Nicot, Frédéric Berger et Simon Carladous pour les renseignements importants qu'ils m'ont communiqués et pour le temps qu'ils ont pu me consacrer.

Merci à Max Bruciamacchie pour son aide et pour m'avoir transmis le goût de l'analyse économique, condition indispensable à la réalisation de ce stage.

Je tiens par ailleurs à rendre hommage à toute l'équipe du service RTM 38, pour sa gentillesse et pour leur accueil. Un merci particulier à Vivian pour son appui en SIG, et à Aurore pour sa patience sans faille face à mes nombreuses questions de stagiaire. Merci également à Stéphane, pour m'avoir accepté (et supporté !) dans son bureau durant ces six mois.

Merci aussi à Hugo, Tom, Manon, Carole, Coralie et Pauline, qui ont su combler agréablement les weekends et les moments de détente par leur présence et leur disponibilité.

Merci enfin à tous ceux qui auront participé à mon stage et que j'aurais oublié dans ces remerciements.

INTRODUCTION

La protection des sociétés humaines contre les risques naturels en montagne est au cœur d'enjeux économiques, humains et sociétaux. Le récent développement du tourisme et des activités de loisir de pleine nature, ainsi que le développement de l'urbanisation renforcent encore les risques menaçant la population et constitue une préoccupation constante pour ses élus. Ainsi, les collectivités et l'Etat consacrent des moyens conséquents pour se prémunir face à ces risques et garantir la sécurité des biens et des personnes.
Dans cette politique de protection, les espaces forestiers tiennent un rôle reconnu d'atténuation des phénomènes générateurs de risques (chute de blocs rocheux, départ d'avalanches, érosion…). Les gestionnaires d'espaces naturels ont su très tôt valoriser cette fonction de protection des forêts, avec les premiers programmes de reboisements du service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) qui ont débuté dans la seconde moitié du XIX^{e} siècle. Ces reboisements étaient destinés à lutter contre les crues dévastatrices du sud de la France attribuées à la déforestation et au surpâturage. En complément d'ouvrages de génie civil, les peuplements forestiers de protection ont montré et montrent encore aujourd'hui une efficacité considérable face aux crues et aux érosions, en termes techniques comme en termes économiques. Les coûts de gestion forestière sont en effet bien inférieurs aux coûts d'installation et d'entretien des ouvrages.

De nos jours, les contraintes économiques sont de plus en plus intenses et forcent les décideurs à faire des choix stratégiques pour utiliser leur budget le plus efficacement possible. Ce constat reste vrai même dans le domaine de la protection des biens et des personnes. Il y a donc un besoin croissant d'évaluer la valeur d'un projet de protection sous sa dimension économique.
L'analyse coût-bénéfice constitue l'un de ces outils d'évaluation économique qui fait l'objet d'un intérêt grandissant de la part des décideurs. Elle vise à exprimer chaque bénéfice et chaque coût d'un projet en valeur monétaire et à aboutir à une valeur synthétique : la valeur actualisée nette. Elle permet ainsi la comparaison directe entre plusieurs projets en termes économiques. Cependant, devant la difficulté de caractériser d'un point de vue monétaire les nombreuses composantes de phénomènes naturels complexes, de multiples questions se posent quant à la faisabilité d'une telle analyse dans le cadre de la protection contre les risques naturels.

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéresserons donc aux opportunités d'application de l'analyse coût-bénéfice dans le cadre d'une gestion opérationnelle des risques naturels et aux méthodes permettant d'y inclure le rôle des forêts de protection.
Quelle méthodologie employer pour effectuer une analyse coût-bénéfice efficace et opérationnelle ? Comment évaluer les effets de la forêt sur la réduction des risques ? Comment traduire ces effets en termes économiques ? Quelles sont les gestions forestières adaptées pour optimiser les fonctions de protections d'une forêt ? Voici les principales questions abordées au cours de ce rapport.

Pour répondre aux impératifs techniques et financiers des décideurs et des maîtres d'ouvrage concernés par l'analyse coût-bénéfice, il conviendra d'abord de présenter une analyse précise du contexte social, économique et juridique dans lequel se place la lutte contre les risques naturels.
Nous aborderons ensuite les principes de l'analyse coût-bénéfice dans ce contexte, et dresserons l'état des lieux des travaux déjà réalisés sur ce sujet.
Pour rendre l'exercice plus concret, ce rapport se basera enfin sur une étude de cas, réalisée à partir d'un site pilote, qui servira de base à l'élaboration d'une méthodologie. Nous nous intéresserons exclusivement aux chutes de blocs rocheux, phénomène le plus étudié et sur lequel nous avons le plus de connaissances. Les résultats de cette étude nous permettront d'appréhender la sensibilité de la méthode de l'analyse coût-bénéfice face aux nombreux paramètres qu'elle fait intervenir. Nous verrons ainsi quels facteurs sont les plus déterminants, et pourrons tirer des conclusions quant à la faisabilité de l'analyse coût-bénéfice dans un tel contexte, et quant au rôle économique des forêts de protection étudiées.

PARTIE 1 : Etat des lieux : La connaissance et la gestion des risques naturels, les rôles de la forêt.

1 La montagne : un territoire fortement concerné par les risques naturels

Les risques naturels sont de natures très diverses et concernent une forte proportion du territoire. Ainsi, pratiquement toutes les communes françaises sont exposées à des phénomènes naturels potentiellement dangereux : crues, inondations, mouvements de terrains, tempêtes, séismes...
Les régions montagneuses, par leurs caractéristiques topographiques et climatiques, sont particulièrement touchées par ces risques. À titre d'exemple, sur les 533 communes que compte le département de l'Isère, 530 sont exposées à au moins un risque majeur.
La gestion des risques naturels apparaît donc comme un enjeu crucial pour les communautés montagnardes qui y sont constamment confrontées.
Après avoir explicité quelques notions essentielles à la compréhension de ce rapport, nous présenterons la diversité et la complexité des phénomènes naturels générateurs de risque. Nous verrons que la forêt joue des rôles différents selon le phénomène considéré, et qu'il est parfois difficile d'établir son efficacité réelle.
Enfin, nous étudierons l'organisation actuelle de la gestion des risques, à travers les stratégies de protection et les stratégies d'aménagement du territoire développées en France.

1.1 Aléa, enjeu, risque

En France, on définit couramment un risque naturel par le croisement entre les notions d'aléa et d'enjeu selon la formule :

Risque = Aléas x Enjeux

Aléa : Il correspond à l'évaluation de la probabilité d'occurrence ET l'intensité d'un phénomène naturel potentiellement dangereux. L'occurrence est la fréquence d'apparition du phénomène.

Enjeu : C'est la nature et l'importance des personnes, biens et activités susceptibles d'être exposés à un aléa ou affecté par un aléa.

Risque : Confrontation entre des aléas et des enjeux, évaluation du niveau de pertes probables consécutives à la survenance des aléas pour les enjeux identifiés. Le risque est considéré comme majeur lorsque sa gravité est très élevée.

Dommages : Conséquences d'un phénomène naturel sur les enjeux. Ces dommages sont ordinairement traduits sous forme monétaire.

Protection : Ensemble des méthodes, dispositifs et aménagements qui permettent de réduire l'exposition d'enjeux aux aléas ou de limiter l'occurrence d'aléas préoccupants. On distingue couramment la protection active, qui consiste à empêcher le phénomène de se produire ou à limiter le déclenchement et l'ampleur du phénomène (contrôle du phénomène) et la protection passive, où l'on vise d'abord à limiter et contrôler les conséquences du phénomène sur les enjeux.

Forêt de protection : D'après l'article L411-1 du code forestier, « Peuvent être classés comme forêts de protection, pour cause d'utilité publique après enquête publique (…) :

- Les forêts dont la conservation est reconnue nécessaire au maintien des terres sur les montagnes et sur les pentes, à la défense contre les avalanches, les érosions et les envahissements des eaux et des sables.

- Les bois et forêts, quelques soient leurs propriétaires, situés à la périphérie des grandes agglomérations, ainsi que dans les zones où leur maintien s'impose, soit pour des raisons écologiques, soit pour le bien-être de la population. »

Une forêt de protection peut alors être classée comme telle par un décret pris en Conseil d'État. Sa conservation est alors reconnue nécessaire pour des raisons physiques, écologiques ou sociales.
On remarque que le classement en forêt de protection n'est pas explicitement lié à la notion d'enjeu.
Dans les faits cependant, on peut remarquer que seule une faible proportion des forêts ayant un rôle de protection bénéficie de ce statut juridique. C'est pourquoi dans la suite de ce rapport nous nous intéresserons à toute forêt ou peuplement dont la fonction de protection est reconnue, sans tenir compte de cet aspect juridique.
D'après l'ouvrage « Vocabulaire forestier – Ecologie, gestion et conservation des espaces boisés », la fonction de protection est attribuée à une forêt ou un peuplement forestier lorsque celle-ci ou celui-ci limite les dégâts susceptibles d'être causés vis-à-vis d'enjeux socio-économiques par certains aléas.

La gestion des risques naturels revient donc à analyser la localisation et l'importance des risques, en étudiant les interactions entre les aléas et les enjeux présents sur le territoire. Cette analyse sert de base à l'élaboration d'une stratégie d'intervention, constituée à la fois par des mesures de protection des enjeux identifiés et par un aménagement du territoire visant à limiter l'exposition des enjeux aux aléas.

1.2 Des aléas naturels variés et complexes

Dans cette partie, les principaux aléas naturels présents en montagne seront décrits selon leurs causes et les facteurs favorisant leur déclenchement. L'accent sera mis sur les limites actuelles de nos connaissances, mais aussi sur nos perspectives d'amélioration. Cette description s'inspire notamment des guides méthodologiques d'élaboration du plan de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN).

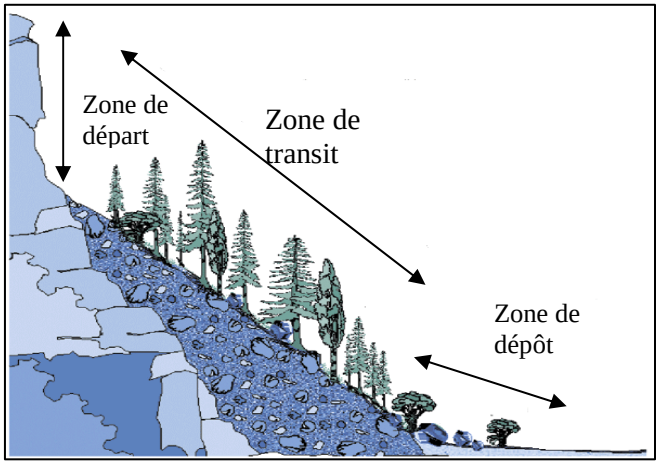
1.2.1 Éboulement, chutes de blocs et de pierres

- **Définition**

Les chutes de masses rocheuses sont des mouvements rapides, discontinus et brutaux résultant de l'action de la pesanteur et affectant les matériaux rigides et fracturés tels que calcaires, grès, roches cristallines, etc. Ces chutes se produisent à partir de falaises, escarpements rocheux, formations meubles à blocs (moraines), blocs provisoirement arrêtés sur une pente. Lors d'une chute de blocs, on distingue :

- la zone de départ, le plus souvent constituée par une falaise surplombant un versant.
- la zone de transit, dans laquelle les blocs se déplacent.
- la zone de dépôt, lorsque la pente devient faible.

Figure 1. – Les trois zones de l'aléa « chute de blocs ». Adaptation document Cemagref



En ce qui concerne les éléments éboulés, on distingue :

- les pierres, d'un volume inférieur à 1 dm^3.
- les blocs, d'un volume supérieur à 1 dm^3.

Suivant le volume total éboulé on distingue :

- les chutes de pierres ou de blocs, d'un volume total inférieur à 100 m^3.
- les éboulements en masse, d'un volume allant de quelques centaines de m^3 à quelques centaines de milliers de m^3.
- les éboulements en grande masse, d'un volume supérieur au million de m^3.

- **Facteurs de déclenchement**

Les principaux facteurs naturels déclenchants sont les pressions hydrostatiques dues à la pluviométrie et à la fonte des neiges, l'alternance gel/dégel, la croissance de la végétation dans la zone de départ, les secousses sismiques, l'affouillement ou le sapement de la falaise.
Etant donné la rapidité, la soudaineté et le caractère souvent imprévisible de ces phénomènes, les instabilités rocheuses constituent des dangers pour les vies humaines, même pour de faibles volumes (pierres).

1.2.2 Avalanche

- **Définition**

L'avalanche correspond à un écoulement gravitaire rapide du manteau neigeux. Cet écoulement est conditionné par des facteurs endogènes (type de neige, quantité) et exogènes (température, vent, végétation…).
Comme pour les chutes de blocs, un couloir d'avalanche se décompose en trois zones aux fonctions distinctes :

- La zone de rupture est le point de départ de l'avalanche. Les avalanches se déclenchent sur des pentes d'une déclivité allant de 30° à 55°. Si la rupture est ponctuelle, on parle d'avalanche de neige meuble, si elle est linéaire et à arrêtes vives, on parle d'un glissement de plaque de neige.
- La zone de transit peut être d'une grande étendue ou au contraire concentrée en couloir. Le couloir d'avalanche ne suit pas forcément la ligne de plus grande pente.
- La zone de dépôt est la zone où la neige s'immobilise. Cela se produit sur des terrains d'une inclinaison de 10° à 20° ou lorsque l'avalanche heurte le versant opposé. La longueur du parcours dépend de la constitution de la neige et de la vitesse de l'avalanche au début de sa trajectoire. La neige ainsi accumulée se traduit par l'expression « cône de déjection ».

- **Types d'avalanche**

Les caractéristiques des avalanches sont très diverses, mais on peut distinguer deux grands types d'avalanches bien distincts :

- L'avalanche coulante : Constituée de neige humide, ce type d'avalanche est très courant en France, notamment au printemps, lorsque les couloirs se purgent par suite de la fonte des neiges. Les avalanches coulantes ont une vitesse modérée (rarement supérieure à 30m/s), possède une forte densité, et leur tracé est très dépendant de la topographie.

- L'avalanche en aérosol : Il s'agit d'un mélange très turbulent d'air et de neige sèche qui peut atteindre des vitesses très importantes, dépassant parfois 360 km/h. La puissance de l'aérosol dépend principalement de la possibilité de reprise (incorporation de neige le long de son trajet). Sa hauteur peut dépasser la centaine de mètres, et sa trajectoire est peu influencée par la topographie. L'effet destructeur des aérosols est surtout lié aux fortes pressions qui s'y forment, malgré une densité très faible (20 kg/m^3).

1.2.3 Glissement de terrain

Le glissement est un déplacement généralement lent (quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) sur une pente, le long d'une surface de rupture identifiable, d'une masse de terrain cohérente.
Les profondeurs des surfaces de glissement sont très variables : de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres voire la centaine de mètre.
Du fait des fissures, des déformations et des déplacements de masses, les glissements peuvent entraîner des dégâts très importants aux constructions. En revanche, l'expérience montre que les accidents de personnes sont peu fréquents, mais possibles (glissements rapides ou survenant la nuit).

1.2.4 Crues torrentielles

Les crues torrentielles regroupent différents évènements d'inondations « rapides », et sont particulièrement présentes en montagne.
On peut distinguer plusieurs catégories principales :

- Les laves torrentielles, écoulements mêlant intimement l'eau et les matériaux de toutes tailles et atteignant des densités très importantes, se distinguant des mouvements de terrain (coulées boueuses) par leur vitesse de déplacement.
- Les écoulements hyper-concentrés, dont l'hydraulique est particulière.
- Les écoulements chargés.
- Les eaux claires.

1.2.5 Érosion

L'érosion aréolaire est la conséquence de l'entraînement de particules de matériaux sur les versants ou dans les thalwegs par l'action de l'eau. Le terme de ravinement évoque un creusement de la surface topographique de terrains meubles ou peu indurés par des petits thalwegs. Ces thalwegs ou ravines ne sont pas le siège d'écoulements permanents.
Ce phénomène peut avoir des conséquences indirectes importantes pour les enjeux humains. En effet, les matériaux déplacés peuvent être mobilisés par les torrents et occuper le fond des cours d'eau. Ceci contribue fortement à augmenter le risque d'inondations, parfois à des centaines de kilomètres du siège de l'aléa.
La stratégie de reboisement menée par le RTM à ses débuts visait à utiliser la forêt comme outil de contrôle de l'érosion.

2 La gestion des risques naturels en France : une prise en compte perfectible des effets de la forêt

Si un certain nombre de rôles bénéfiques sont attribués à la forêt vis-à-vis de la protection contre les risques naturels, nous verrons que son intégration dans une stratégie globale de lutte contre les risques reste limitée et devrait être améliorée.

2.1 Les rôles et la gestion des forêts de protection

2.1.1 Les rôles des forêts de protection

Les forêts peuvent avoir des rôles très différents selon l'aléa naturel considéré. La connaissance des aléas a significativement évolué au cours des dernières années, mais beaucoup d'éléments nécessitent encore un effort de recherche conséquent. Aussi, les experts possèdent des niveaux de connaissance très hétérogènes selon le type d'aléa. Dans ce contexte de connaissance imparfaite, mais devant une nécessité éminente de prendre des décisions en termes de gestion des risques, il est possible de déterminer des compromis entre les différents professionnels de la gestion des risques. Les tableaux 1 et 2 proposent une synthèse de nos connaissances sur les interactions entre forêt et phénomènes naturels. Ils sont directement issus du rapport d'Antoine Durand, effectué en 2012 :

Tableau 1 : Interaction entre forêt et phénomènes naturels – Zones de transit et de dépôt

Phénomène naturel	**Interactions forêt - phénomène** *Zones de transit et dépôt*	**Effets résultants** *sur l'évolution du phénomène* *(positif, neutre ou négligeable, négatif)*
Érosion	*Stabilisation mécanique des sols*	Concentration du ruissellement évité
		Piégeage des sédiments emportés par ravinement
		Possibilité de creusement induit du lit des cours d'eau
Crue torrentielle	*Régulation du régime des eaux*	Pointes de crues atténuées et étalées dans le temps
		Formation de laves limitée
	Obstacle à l'écoulement	Arbres instables emportés
		Alimentation de l'écoulement en débris
		Formation d'embâcles et risque de rupture brutale
		Frein et retenue des écoulements raisonnables
Chute de bloc	*Obstacle à la propagation*	Dissipation d'énergie et arrêt des blocs
		Hauteur de passage des blocs fortement diminuée
		Canalisation des trajectoires si couloir naturel
		Rebonds limités
		Accumulation de blocs derrière un arbre mort
		Effet tremplin des souches
Avalanche	*Obstacle à la propagation*	Effet belier des troncs emportés
		Arrêt favorisé sur pente <10° si coulée dense sans débri
		Canalisation potentielle de l'écoulement
		Dissipation potentielle d'énergie et atterrissements moindres
		Peuplement perméable traversé par les aérosols
	Surfaces de dépôt modifiée	Litière feuillue et propention au glissement
		Couches fragiles liées à la végétation arbustive

Tableau 2 : Interaction entre forêt et phénomènes naturels – Zone de départ

Phénomène naturel	Interactions forêt - phénomène *Zone de départ*	Effets résultants *sur le déclanchement du phénomène* *(positif, neutre ou négligeable, négatif)*
Erosion	*Interception de la pluie par les houppiers*	Energie cinétique des gouttes d'eau diminuée (effet *splash*)
		Quantité d'eau apportée au sol diminuée
	Qualités intrinsèques propres aux sols forestiers	Infiltration de l'eau favorisée
		Horizons humifères peu sensibles à l'érosion
		Activité biologiques entrainant une bonne structuration
		Ruissellement fortement réduit
	Stabilisation mécanique des sols	Ruissellement favorisé au profit du ravinement
	Perturbation de l'écoulement du vent	Force érosive du vent inhibée
	Régulation thermique	Altérations liées au gel-dégel limitées
Crue torrentielle	*Régulation du régime des eaux*	Quantité d'eau apportée au sol diminuée
		Évapotranspiration importante des formations forestières
		Dimution du ruissellement au profit de l'infiltration
		Restitution des eaux retardée et étallée dans le temps
	Phénomène seuil	Plus d'effet du boisement au delà d'un certain volume d'eau
Glissement	*Ancrage du sol par les systèmes racinaires*	Bonne résistance aux forces de cisaillement
		Effet de levier (mouvement des arbres avec le vent)
		Effet négligeable pour de fortes déclivités du sol (>40°)
	Evapotranspiration importante des formations	Quantité d'eau apportée au sol diminuée
	Qualités intrinsèques propres aux sols forestiers	Infiltration de l'eau favorisée
	Surcharge représentée par le peuplement forestier	Possible déclenchement de glissements superficiels
		Effet négligeable pour des glissements plus importants
Chute de bloc	*Ancrage par le système racinaire*	Stabilisation d'éboulis
		Ancrages de blocs
		Effet de levier et mise en mouvement de blocs
		Roche altérée par le développement du système racinaire
	Qualités intrinsèques propres aux sols forestiers	Infiltration de l'eau favorisant la désagrégation des roches
		Forte rugosité des sols forestiers et dissipation de l'énergie
	Chocs des blocs contre le peuplement	Arrêt des blocs avant qu'ils n'acquierrent beaucoup d'énergie
		Hauteur de rebond fortement diminuée
Avalanche	*Perturbation de l'écoulement du vent*	Diminution de la quantité de neige transportée par le vent
		Limitation de la formation de congères
		Accumulation de neige au vent ou sous le vent
		Accumulation de neige dans les trouées
	Interception des précipitations neigeuses par les houppiers	Hauteur du couvert de neige sous forêt diminuée
		Neige restituée au sol avec un décalage temporel
		Modification de l'état de la neige sur les houppiers
		Poinçonnement du manteau neigeux lors de la restitution
		Statigraphie du manteau neigeux perturbée ou supprimée
		Discontinuités crées dans le manteau (aulne vert, sorbiers)
		Restitution par paquets de neige et déclenchement
	Diminution des écarts de température	Métamorphose de la neige diminuée
	Effet d'ancrage lié aux troncs	Rugositée augmentée et reptation limitée

2.1.2 La gestion des forêts de protection

- **La lutte contre l'érosion : une première expérience de la gestion des forêts de protection**

Les forêts de protection peuvent être classées en deux grandes catégories. On peut en effet distinguer les forêts présentes « naturellement » qui ont une fonction de protection clairement identifiée, et les boisements qui ont été entrepris dans le but d'assurer une protection sur des enjeux socio-économiques.
Cette deuxième catégorie prend naissance à partir des premiers programmes de reboisement et d'acquisition foncière qui ont débuté dans la seconde moitié du XIXe siècle, suite à une série de lois sur la restauration des terrains en montagne. Ces reboisements étaient destinés à lutter contre les crues dévastatrices du sud de la France attribuées à la déforestation et au surpâturage. En complément d'ouvrages de génie civil, les peuplements forestiers de protection ont montré et montrent encore aujourd'hui une efficacité considérable, en termes techniques comme en termes économiques.

- **Organisation actuelle de la gestion des forêts de protection**

Actuellement, la gestion des forêts de protection peut être décomposée selon le type de propriété :

- les forêts domaniales « RTM ». Il s'agit d'un statut juridique particulier par lequel l'État engage sa responsabilité pour assurer la maîtrise des phénomènes naturels générateurs de risques constatés sur ces terrains. La gestion de ces espaces est déléguée aux services RTM de l'ONF à travers ses missions d'intérêt général. Les forêts domaniales « RTM » bénéficient donc de financements particuliers pour assurer leur gestion.
- les forêts communales « RTM ». Ce statut est délivré suite à une déclaration d'utilité publique en conseil d'Etat, en cas de risque naturel important nécessitant un suivi régulier. En Isère, Saint-Martin-le-Vinoux est la seule commune comportant ce type de forêt.
- les forêts relevant du régime forestier et possédant une fonction de protection reconnue. La gestion de ces forêts est confiée à l'ONF, qui doit élaborer à travers les aménagements forestiers des programmes d'action prenant en compte la fonction de protection. Ces programmes d'action doivent être en accords avec les préconisations du guide de sylviculture de montagne.
- les forêts privées. Dans ces forêts, il est souvent difficile de mettre en place une gestion forestière dite « de protection ». Les impératifs financiers, le fort morcellement qui rend difficile une approche globale du risque et le faible intérêt d'une partie des propriétaires pour la lutte contre les risques naturels en sont les raisons principales.

- **Une nécessité de renouvellement des peuplements**

Dans les zones montagneuses, l'abandon progressif de l'exploitation forestière depuis les années 50 a été favorisé par un changement profond des modes de vie ruraux et par une augmentation des coûts d'exploitation qui ne rentabilise plus l'intervention en montagne. Ces peuplements autrefois régulièrement exploités ont donc évolué naturellement et sont arrivés aujourd'hui à un stade de vieillissement.
De même, les campagnes de reboisement RTM, ayant été mises en place dans un laps de temps relativement restreint, aboutissent aujourd'hui à des surfaces très importantes de peuplements vieillissants.
On retrouve donc aujourd'hui en montagne des peuplements souvent instables, qui pourraient perdre peu à peu leur efficacité de protection contre les risques naturels.

Devant ce constat, les forestiers s'investissent depuis une dizaine d'années dans les problématiques de renouvellement et de gestion des peuplements de protection.
Cette politique a notamment donné naissance au programme de renouvellement des peuplements de protection (RPP) sous une initiative du ministère chargé des forêts de 2006. Ce programme consiste en

la réalisation d'une étude portant sur l'ensemble des terrains domaniaux RTM en France et ayant pour but la connaissance à la fois des phénomènes naturels et des enjeux présents sur ces terrains et sur les capacité de maîtrise que l'on peut attendre des peuplements en place. Il a pour but final de chiffrer économiquement les besoins de renouvellement de ces peuplements.

- **Améliorer nos connaissances du fonctionnement des forêts de protection : Le programme INTERREG « Forêts de protection »**

L'investissement accru des forestiers dans la gestion des forêts de protection requiert un approfondissement des connaissances parfois très limitées sur les rôles et le fonctionnement de ces espaces.
Dans les Alpes, un programme de recherche a vu le jour dans le cadre d'une coopération transfrontalière (Suisse, France et Italie) à travers le projet « INTERREG Forêts de protection » pour la période 2009-2012. Il avait pour objectifs :

- d'améliorer les zonages de la fonction de protection, avec des priorités d'intervention, selon des types d'enjeux diversifiés
- d'élaborer des référentiels techniques et budgétaires pour dimensionner les chantiers de gestion forestière à finalité de protection et mieux asseoir les politiques publiques sur ce sujet
- de réfléchir sur les responsabilités respectives des acteurs locaux, les moyens juridiques disponibles et adaptés au contexte
- d'intégrer par une approche économétrique, l'intérêt d'une gestion forestière avec un objectif de protection au regard des autres types d'interventions de réduction de l'aléa (génie civil).

Les résultats devaient permettre :

- d'identifier le rôle de protection des forêts et leur capacité à atténuer les risques
- de planifier les interventions sur leur territoire, en fonction de leurs enjeux prioritaires
- de mobiliser les dispositifs d'aides aux collectivités pour leurs programmes d'action dans le domaine de la prévention des risques.

Ce programme a notamment abouti à la rédaction de la partie « Protection » du guide des sylvicultures de montagne (GSM). Des principes de gestions sont ainsi détaillés par type d'aléa, et sont le fruit de discussion entre divers acteurs de la forêt, qu'ils soient publics ou privés (Irstea, ONF, CRPF…).
Un réseau de chantiers pilotes a parallèlement été mis en place pour tester les modalités prévues par le guide de sylviculture. Ces chantiers ont été réalisés courant 2010, et les résultats seront étudiés dans les prochaines années.
Enfin, une étude a été réalisée en 2010 par Sylvain Dupire auprès du laboratoire d'économie forestière d'AgroParisTech. L'auteur y développe une méthodologie d'analyse coût-bénéfice, basée sur plusieurs sites d'étude de taille restreinte, et montrant l'intérêt d'investir dans la gestion des forêts de protection en complément du génie civil.

La diversité et la complémentarité des outils développés grâce au programme INTERREG dans les dimensions techniques, juridiques et économiques de la gestion forestière forment une base de connaissances et de savoir-faire solides mise à disposition des gestionnaires.
L'étude présentée ici repose en grande partie sur les travaux développés dans le cadre de ce programme.

2.1.3 Des progrès possibles

Bien que des progrès considérables aient été réalisés ces dernières années, certains points faibles méritent d'être abordés :

- **Un guide de sylviculture incomplet.**

A titre d'exemple, le guide des sylvicultures de montagne « Alpes du Nord françaises » se limite :
- aux formations subalpines et montagnardes. L'étage collinéen n'est pas traité.

- aux peuplements constitués principalement de Sapin, d'Epicéa ou de Hêtre, mélangés ou purs.
Ainsi, les forêts basses, souvent constituées de feuillus divers tels que le Chêne pubescent, le Frêne et les Érables ne sont pas représentées. Pourtant, ces forêts, du fait de leur basse altitude, se trouvent souvent à l'interface entre un aléa et des enjeux humains très importants. La gestion de ces espaces peut poser des problématiques de protection très particulières pour lesquelles le gestionnaire ne dispose pas de préconisations (dynamique naturelle, concurrence avec l'enjeu accueil du public, paysage, problème d'accès au massif…).
Il faut cependant noter que ces forêts basses sont souvent privées. Comme nous l'avons vu, la mobilisation de propriétaires privés autour de la fonction de protection des forêts demeure très délicate. Il n'en reste pas moins que ce guide de sylviculture a été élaboré en collaboration avec les acteurs de la forêt privée et a pour ambition de pouvoir s'appliquer à tout type de propriété.

- **Un faible recul sur l'efficacité des référentiels techniques.**

Les préconisations de gestion sont issues d'une collaboration particulièrement récente. La mise en œuvre d'un suivi minutieux des chantiers réalisés est essentielle pour analyser demain l'efficacité des mesures prises aujourd'hui.

- **Une déconnexion des forêts du reste de la stratégie de protection contre les risques naturels**

Historiquement, le service RTM assurait une bonne complémentarité entre génie civil et gestion forestière. Rappelons que les premiers travaux de RTM étaient basés sur des plantations. Cependant, la situation a progressivement évolué, et nous constatons aujourd'hui que l'organisation de la gestion des forêts de protection est confiée, dans la plupart des cas, aux seuls forestiers.
Or, la gestion des risques naturels est une problématique plus globale, qu'il convient de raisonner à l'échelle d'un bassin de risque.
Comme nous allons le voir prochainement, l'intégration de la gestion forestière dans une stratégie globale de protection est donc un aspect primordial de la lutte contre les risques naturels.

2.2 Le Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisibles : l'outil réglementaire d'affichage des risques

La première étape de la gestion des risques naturels en montagne est l'affichage du risque. L'objectif est d'évaluer la fréquence, l'intensité et la dangerosité des aléas présents afin d'instaurer des mesures de protection et d'aménagement adaptées. Le Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisibles (PPRN) est l'instrument réglementaire de l'affichage du risque en France.
Dans cette partie seront présentés les concepts liés au plan de prévention des risques, ainsi que sa stratégie de mise en œuvre. Notons que cette stratégie est encadrée par un certain nombre de guides méthodologiques spécifiquement établis.

2.2.1 Présentation

Le PPRN est prescrit par un arrêté préfectoral qui fixe :
- le périmètre d'étude
- la nature des risques à prendre en compte
- le service de l'État chargé de l'instruction (DDT)
- les modalités de concertation

Il est notifié au maire, aux présidents des collectivités territoriales et aux établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) compétents pour l'élaboration des documents d'urbanisme dont le territoire est couvert par le PPRN.
Le PPRN contient une note de présentation, un ou plusieurs plans du zonage réglementaire et un règlement.

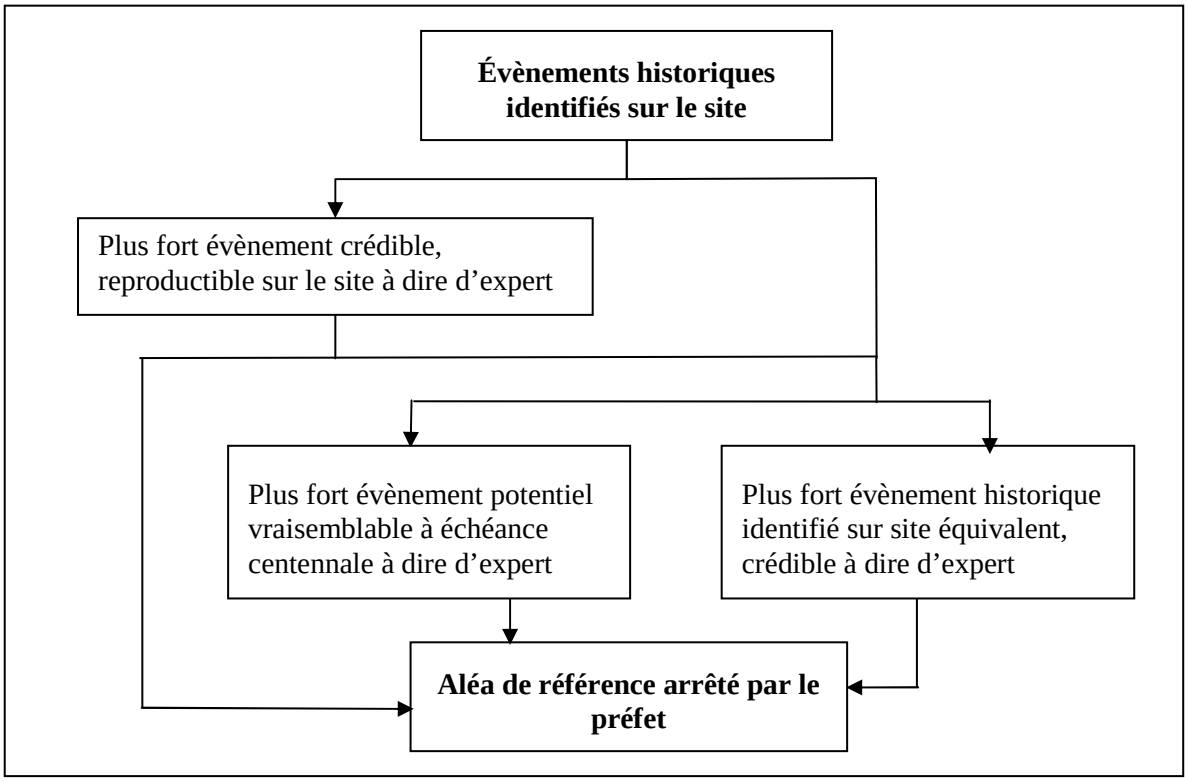
2.2.2 Élaboration de la carte d'aléa et du zonage réglementaire

Pour établir le zonage réglementaire, l'organisme en charge de sa réalisation se base à la fois sur une évaluation des aléas naturels présents et sur l'évaluation des enjeux qui y sont exposés.

- **Aléa de référence et carte des aléas naturels**

Grâce à des études, des archives, des enquêtes auprès de la population et des visites de terrain, une **carte des aléas naturels** présents dans le périmètre d'étude est d'abord établie. Chaque aléa possède un code couleur décliné selon son intensité.
En pratique, l'élaboration de la carte d'aléa suppose la définition d'un **aléa de référence**.
Afin d'atteindre les objectifs visés par le PPR, l'aléa de référence fixe les seuils à prendre en compte pour réaliser un aménagement durable et préserver la sécurité des personnes et des biens en dehors de phénomènes majeurs à exclure.
L'aléa de référence à prendre en compte pour définir le zonage est conventionnellement le plus fort évènement historique connu sur le site, sauf si une analyse spécifique conduit à considérer vraisemblable à échéance centennale, ou plus en cas de danger humain, un évènement de plus grande ampleur.
La méthodologie PPR favorise donc une approche par l'aléa : on se fixe un niveau d'aléa que l'on souhaite maîtriser. C'est le choix retenu en France. Une autre stratégie consisterait par exemple à se fixer un niveau de dégât admissible. Il s'agirait d'une approche par l'enjeu, notamment appliquée en Suisse. La première stratégie est une approche technique du risque, tandis que la seconde est davantage politique.
L'organigramme suivant explique le procédé de détermination de l'aléa de référence :

Figure 2 : Détermination de l'aléa de référence – Extrait du guide méthodologique général PPR



Nous pouvons donc constater que l'aléa de référence est une notion complexe. Sa détermination requiert un niveau d'expertise conséquent dans le fonctionnement du phénomène étudié.

Les complexités de sa définition peuvent parfois engager un débat parmi les experts. Il peut être difficile de percevoir correctement cette notion, et il existe une tendance de simplification, qui consiste à ne considérer que l'historique du site. Une partie importante de l'expertise est alors oubliée.

- **Zonage réglementaire**

Une fois réalisée, la carte des aléas naturels est ensuite confrontée à une carte des enjeux socio-économiques et humains pour déduire un zonage règlementaire des risques cohérent.
Un règlement est alors associé à ce zonage réglementaire. Le PPR peut ainsi définir des règles visant à assurer l'évacuation ou l'intervention des secours dans les meilleurs conditions, prescrire des travaux de protection aux particuliers ou aux collectivités, fixer des conditions ou des règles de gestion de l'espace ou des aménagements.
Après enquête publique et consultation de différents organismes publics impliqués dans la gestion du territoire, le PPR est approuvé par arrêté préfectoral et vaut alors servitude d'utilité publique et est annexé au Plan Local d'Urbanisme (PLU) par arrêté municipal (ou annexé d'office par arrêté préfectoral). Le PLU est alors mis en conformité avec le PPR.

2.2.3 Une prise en compte aléatoire de la forêt

L'évaluation des aléas, réalisée à travers la carte des aléas naturels, doit s'établir en faisant abstraction de la végétation constatée sur le site. Ainsi, les effets de la forêt ne sont normalement pas pris en compte dans l'établissement des cartes d'aléas.
En revanche, le zonage réglementaire, qui dépend en partie de la carte des aléas, pourra éventuellement intégrer dans sa version définitive une prise en compte de la végétation. Le plus souvent, il s'agit d'une prise en compte qualitative et arbitraire, basée sur le dire d'expert.

2.2.4 Conclusion

Le PPR est donc l'outil juridique qui permet de prendre en compte les risques naturels dans l'aménagement du territoire. Conçu pour s'appuyer davantage sur une démarche qualitative et d'expertise que sur une démarche précise et chiffrée, le PPR ne rend pas efficacement compte des rôles de la forêt, et incite ainsi les décideurs publics à établir des mesures de protection dimensionnées pour maîtriser un aléa évalué sans forêt.

2.3 La protection contre les risques naturels : une activité coûteuse, dans un contexte économique difficile

Une fois que les risques ont été clairement identifiés grâce à l'élaboration du PPRN, les collectivités en charge de la gestion des risques, notamment les communes, pourront engager les moyens nécessaires à la protection des enjeux menacés.
Ces mesures de protection sont de natures diverses et dépendent de l'aléa à maîtriser. L'annexe 1 propose une présentation rapide des principaux ouvrages de génie civil utilisés.
La mise en œuvre de ces ouvrages représente un coût important pour la société, tant pour leur installation que pour leur entretien. À titre d'exemple, un filet pare-blocs a un coût moyen de plus de 1000 € par mètre. Sa fréquence de remplacement est de l'ordre de 30 ans, et les frais d'entretien de l'installation pourraient correspondre à environs 35 % des frais totaux sur une période de 100 ans. Les merlons sont quant à eux moins coûteux, notamment parce qu'il s'agit d'ouvrages qui ne nécessitent pas de remplacements périodiques.
Les décideurs ne disposent que d'un budget limité et sont contraints de faire des choix, en établissant des priorités entre les différents enjeux à protéger.
La gestion forestière pourrait offrir une alternative intéressante aux ouvrages de génie civil du fait de ses coûts relativement faibles. Mais pour s'assurer de l'utilité de cette gestion de protection, il convient de mettre ces faibles coûts en rapport avec son efficacité dans la maîtrise de l'aléa.

2.4 Nécessité d'intégrer davantage la forêt dans la stratégie globale de gestion des risques

Nous avons vu que la prise en compte de la forêt dans la gestion contre les risques naturels souffrent de bon nombre d'ambiguïtés, tant dans le domaine purement forestier, où il est parfois difficile de définir ses rôles avec précision, que dans le domaine plus général de l'aménagement du territoire, où celle-ci est souvent sous-estimé et mal évaluée.
Ce constat amène plusieurs conclusions :

- La possibilité d'intégrer la gestion des forêts de protection à une stratégie plus globale de protection contre les risques naturels doit être évaluée.
- Il serait intéressant de déterminer s'il existe un décalage entre l'importance réelle des rôles de la forêt et sa prise en compte effective dans la gestion des risques.
- Si ces rôles sont prouvés, la gestion des forêts de protection peut constituer un atout économique, car elle engage des frais moins importants que ceux entraînés par le génie civil.

Il ya donc nécessité d'étudier la complémentarité de la forêt avec les ouvrages de génie civil dans la maîtrise des aléas, dans une démarche globale. L'objectif étant d'intégrer ses effets dans les choix de gestion.

2.5 L'évaluation économique : un outil d'aide à la décision utile pour les décideurs

La forêt possède ainsi des effets variés et la plupart du temps positifs sur la protection contre les risques naturels. De plus, la gestion forestière est a priori beaucoup moins coûteuse que l'installation et l'entretien d'ouvrages de génie civil. Il semble tout à fait opportun de l'intégrer pleinement dans la stratégie générale de lutte contre les risques, et d'évaluer pour cela avec précision ses rôles et ses limites. Ceci est d'autant plus pertinent que la protection contre les risques naturels coûte cher, et les collectivités en charge de cette mission ne disposent que d'un budget limité.

Si l'analyse technique et experte des rôles de la forêt semble incontournable, elle souffre néanmoins d'un certain nombre de faiblesses. En effet, comment définir des priorités entre les enjeux à protéger ? Comment optimiser les dépenses de manière à ce que le décideur utilise son budget de manière la plus efficace possible, en protégeant réellement le maximum de biens et de personnes ?
On conclut facilement qu'une telle analyse nécessite des approches complémentaires. Il s'agit d'approches, sociales, politiques et économiques.

L'analyse économique au sens large représente une de ces approches complémentaires. Elle fait l'objet d'une attention toujours plus grande de la part des décideurs, qui souhaitent de plus en plus pouvoir se baser sur des indicateurs économiques fiables pour prendre des décisions. Des travaux récents appliqués à la forêt et aux risques naturels dégagent un champ d'investigation large et complexe.
La prochaine partie s'attache à décrire ces différents concepts d'analyse économique, et à faire le point sur les travaux déjà réalisés dans ce domaine.

PARTIE 2 : L'analyse coût-bénéfice appliquée aux forêts de protection : état des lieux des connaissances, savoir-faire et expériences.

1 Des outils d'évaluation économique variés pour des objectifs différents

Comment évaluer les fonctions d'une forêt de protection d'un point de vue économique ? Pour répondre à cette question, diverses méthodes ont été utilisées dans des études antérieures. Ces méthodes diffèrent fortement les unes des autres par leurs objectifs, leurs hypothèses et leurs domaines de validité. Concernant les risques naturels, l'intérêt porté sur l'évaluation économique est relativement récent, et de nombreux champs d'investigation sont encore à l'étude.
L'analyse coût-bénéfice (ACB), qui sera étudiée et utilisée dans ce rapport, constitue un de ces outils d'évaluation économique. Mieux connue dans les pays anglo-saxons, la méthode reste peu développée en France. Pour comprendre ses spécificités, et les choix qui m'ont porté à retenir l'ACB comme outil d'évaluation, il convient de présenter rapidement les différentes méthodes existantes.
Cette synthèse se base sur le travail d'un groupe d'étudiants de la Formation des Ingénieurs Forestiers réalisée lors d'un projet en 2009.

1.1 Méthodes basées sur des enquêtes auprès de la population

Une première approche pour évaluer le rôle de protection d'une forêt est basée sur la valeur attribuée à cette forêt par la population concernée. La valeur qui en résulte peut donc être qualifiée de « valeur socioculturelle ». On distingue plusieurs outils dans cette catégorie.

- **L'évaluation contingente** consiste en une enquête d'opinion dans laquelle on interroge des personnes pour évaluer leur disponibilité à payer pour bénéficier d'un bien ou d'un service. Les montants exprimés par les personnes rencontrées sont ensuite extrapolés au niveau de la totalité de la population à laquelle on s'intéresse pour calculer la valeur attribuée par le public à ce service. Pour évaluer la valeur de protection attribuée par une population à une forêt, on présente d'abord précisément le risque auquel cette population est sujette, ainsi que l'action précise de la forêt sur le contrôle de ce risque. On demande alors à chaque personne la valeur monétaire qu'elle est prête à consacrer à la gestion de cette forêt dans le but de maintenir ou d'améliorer son rôle de protection contre le ou les risques identifiés. La valeur de protection obtenue sera donc la somme des valeurs données par chaque personne de la population. Le résultat d'une telle enquête est donc fonction du nombre de personnes concernées par le risque, mais aussi de l'aversion au risque de chaque personne interrogée.
- **L'analyse conjointe** consiste également en une enquête d'opinion. Cette méthode permet de demander à une population de hiérarchiser plusieurs scénarii de protection. Chaque scénario proposé par l'enquêteur possède un coût déterminé, et un effet de protection connu. Par contre, la population interrogée n'estime pas directement la valeur de protection d'une forêt, mais le scénario qui lui semble le plus adapté. La valeur de protection qui sera retenu correspondra donc au scénario retenu par la population.

Le point fort de ces méthodes repose dans la possibilité d'évaluer une valeur de protection qui tient compte de l'aversion au risque de la population concernée. Certains économistes estiment que ces méthodes constituent la meilleure solution puisque la valeur est estimée par les propres bénéficiaires du service. Cependant, ce type d'évaluation est sujet à de nombreux biais. Il s'agit en effet de méthodes subjectives, pouvant aboutir à des choix de gestion irrationnels. Le risque est donc d'attribuer trop d'importance à des zones où les enjeux ne sont pourtant pas conséquents. A l'inverse, certaines zones peuvent se retrouver à faire l'objet d'une attention sous estimée.

1.2 Méthodes basées sur un calcul économétrique

Dans le cadre de ces méthodes, la valeur de protection d'une forêt est obtenue par un calcul économique direct. Cependant, plusieurs moyens existent pour calculer cette valeur. Les approches utilisées pour chaque méthode sont très différentes, les valeurs de protection ainsi obtenue sont donc particulièrement divergentes.

- **La méthode du coût d'opportunité** permet d'évaluer la valeur de protection d'une forêt selon le coût d'une gestion forestière spécifique, destinée à optimiser ce rôle de protection. La valeur de protection calculée ici correspond donc à la différence de coûts entre une gestion classique et une gestion de protection. Ici, on se place donc du point de vue du propriétaire forestier, celui qui assume les coûts de gestion. La valeur de protection est donc incomplète, et conduit à une réelle sous estimation du rôle de protection.

- **L'analyse coût-bénéfice** consiste à évaluer l'ensemble des coûts et des bénéfices liés à un projet, y compris les coûts et bénéfices indirects, et non marchands. La méthode aboutit au calcul de la valeur actualisée nette du projet, qui correspond à la différence entre la somme des coûts et la somme des bénéfices actualisés. En théorie, l'analyse coût-bénéfice possède l'avantage d'être objective et transparente. Nous verrons cependant que dans le cas d'une forêt de protection, le grand nombre d'hypothèses et de choix nécessaires au calcul rendent l'exercice délicat, et nécessite de prendre un recul important vis-à-vis des résultats. En revanche, elle permet de comparer efficacement différents projets, puisque la méthode utilisée ainsi que toutes les hypothèses qu'elle sous-entend sont identiques.

Si les méthodes de l'analyse conjointe et de l'analyse contingente permettent d'aboutir à un résultat intéressant et légitime du point de vue de la société exposée au risque, on constate que ces méthodes rendent difficile la comparaison entre différents projets notamment en raison de leur subjectivité. De plus, ces enquêtes sont très coûteuses, donc peu envisageable dans un contexte opérationnel.
La méthode des coûts d'opportunité est intéressante lorsqu'on se place du point de vue du propriétaire forestier, mais elle est particulièrement incomplète si l'on se place du côté du gestionnaire des risques naturels.

L'analyse coût-bénéfice, en facilitant la comparaison de projet grâce à une valeur synthétique et une démarche transparente permet de plus d'intégrer l'ensemble des coûts et bénéfices. Elle pourrait donc fournir au décideur une valeur de comparaison cohérente, et constituerait ainsi un outil d'aide à la décision efficace. Il apparaît donc clairement que cet outil d'évaluation économique semble le plus adapté au contexte de la lutte contre les risques naturels.

2 Principes généraux de l'analyse coût-bénéfices

2.1 Formule générale

Comme nous l'avons vu, le principe général de l'ACB consiste à exprimer l'ensemble des coûts et des bénéfices liés à un projet pour une période d'étude définie. En opérant la différence entre ces coûts et ces bénéfices attendus, on obtient donc une valeur nette associée à ce projet. Puisque ce dernier peut faire appel à des coûts et des bénéfices étalés sur plusieurs années, il faut intégrer au calcul le principe d'actualisation. L'indicateur obtenu correspond à la valeur actualisée nette :

$$VAN_{projet} = \sum_0^n \left(B_i \times \frac{1}{(1+r)^i} \right) - \sum_0^n \left(C_i \times \frac{1}{(1+r)^i} \right)$$

VAN_{projet} : Valeur actualisée nette du projet
B_i : Ensemble des bénéfices réalisés l'année i
C_i : Ensemble des coûts engendrés l'année i
r : taux d'actualisation
n : nombre d'années total du projet

Nous constatons donc que la valeur actualisée nette facilite la comparaison entre plusieurs projets : le meilleur scénario est celui pour lequel la VAN est maximale.

2.2 Une définition des coûts et des bénéfices parfois difficile

Dans certains domaines d'application, pour lesquelles l'ensemble des variables sont bien connues et faciles à traduire en termes monétaires, le calcul des coûts et des bénéfices est relativement simple. Cependant, pour d'autres applications, l'opération peut s'avérer très délicate. C'est particulièrement le cas lorsque le calcul fait intervenir des valeurs indirectes et non marchandes, comme la vie humaine. La gestion des risques naturels fait donc partie de cette catégorie de projet, pour laquelle on retrouve un ensemble de valeurs parfois très difficiles à déterminer.
Quels sont les coûts et bénéfices liés à une stratégie de défense contre les risques naturels ? Comment fournir une bonne estimation de ces différentes grandeurs ?
L'application de l'ACB à la gestion des risques naturels consiste à trouver une réponse à ces deux questions fondamentales. Cela revient par exemple à attribuer une valeur à la vie humaine, ou à définir un niveau de vulnérabilité économique des enjeux face à un aléa identifié au préalable. On comprend toute la complexité que suppose la définition de telles grandeurs.

D'une manière générale, on peut différencier deux grandes approches :

- L'approche « aléa » : elle repose sur le choix d'un niveau d'aléa contre lequel on veut se protéger et en fonction duquel on compare des scénarios (génie civil contre génie biologique par exemple). La méthode économique adaptée à ce type de calcul est celle des **coûts de substitution**. Dans le cas de la forêt, on cherchera à déterminer l'ouvrage de génie civil qui aura une efficacité égale à celle de la forêt. Par calcul du coût d'un tel ouvrage, on peut déterminer une valeur de protection de la forêt.

- L'approche « enjeu » : elle repose sur le calcul de la réduction des dommages sur les enjeux (vie humaine, habitations, voies de circulations, etc.) suite aux mesures de protection. La méthode économique adaptée à ce type de calcul est celle des **coûts évités**. Cette méthode suppose la quantification précise des dommages en termes économiques : vulnérabilité des enjeux selon le type d'aléa et son intensité, valeur des enjeux... Dans le cas d'une forêt de protection, la valeur des dommages évités grâce à la présence et/ou la gestion de cette forêt représente sa valeur de protection.

En pratique, ces deux approches sont souvent complémentaires, car l'aléa est intimement lié à l'enjeu. Par exemple, si on fait varier l'aléa pris en compte dans l'expertise, ce choix aura des effets directs sur l'évaluation des dommages causés aux enjeux (augmentation ou diminution de la vulnérabilité).

Plusieurs études ont été menées dans le but d'étudier les possibilités de réalisation d'ACB dans le contexte des risques naturels. Certaines permettent de prendre en compte la forêt. Elles sont de natures très diverses, et interviennent à différentes échelles de travail. Comprendre les objectifs et les apports de ces études est essentiel à la mise en place d'une méthodologie d'ACB efficace et opérationnelle.
La partie suivante propose une synthèse non exhaustive de ces travaux. C'est sur cette base que repose l'intégralité du travail méthodologique effectué dans le cadre de cette étude.

3 Synthèse des principales expériences passées

3.1 Analyse coût-bénéfice dans le contexte des inondations de plaines : quels enseignements pour l'application aux aléas de montagne ?

Au niveau national, une méthodologie officielle d'analyse coût-bénéfice a été mise en pace depuis quelques années. Cette analyse doit être réalisée lors de l'élaboration des programmes d'actions et de prévention contre les inondations (PAPI). Elle vise notamment à évaluer l'efficacité économique des mesures de protection envisagées dans le cadre de ce plan d'action.
Cette méthodologie officielle repose sur la méthode des coûts évités et se décompose selon les étapes suivantes :

- Définition du périmètre d'étude dans le temps et dans l'espace.
- Description de l'aléa. Il s'agit de déterminer combien de phénomènes peuvent se réaliser, avec quelle intensité, et cela sur un horizon temporel défini.
- Recensement des enjeux potentiellement impactés par l'aléa.
- Évaluation des dommages évités moyens annuels (DEMA). Il s'agit de la différence entre les dommages causés dans le cas du scénario aménagé et ceux causés dans le cas du scénario témoin. La démarche consiste à exposer les enjeux aux aléas, grâce notamment à des outils de modélisation. La valeur des dommages constatés pour chacun de ces aléas sera pondérée par la probabilité d'occurrence du phénomène. Ceci revient à déterminer les dommages probablement causés par les aléas définis par leur période de retour année par année. La somme de ces valeurs annuelles constitue les dommages moyens annuels (DMA).
- Évaluation des coûts. Ils correspondent aux réparations des dommages causés aux enjeux ainsi qu'aux coûts d'installation et d'entretien des ouvrages de protection.
- Calcul de la valeur actualisée nette.
- Analyse de sensibilité. Cette analyse permet de faire varier les paramètres intervenant dans le calcul au sein de leur plage d'incertitude. L'influence sur les résultats permet de tirer des conclusions quant à leur robustesse et quant aux plages de valeurs possibles.

Renaud Sibille a effectué en 2012 une évaluation de cette méthodologie et de son applicabilité aux aléas spécifiques de montagne pour le compte de la direction technique nationale RTM. Il en ressort des conclusions particulièrement riches d'enseignement. L'auteur montre notamment un retard important de la France dans le domaine de l'évaluation économique des risques. Bien que cette méthodologie soit opérationnelle dans le cadre précis des inondations de plaine, elle ne peut pas être facilement et directement transposée dans le cas des aléas de montagnes. Plusieurs éléments viennent appuyer ce constat :

- une grande méconnaissance de la vulnérabilité des enjeux face aux aléas de montagne.
- une relative méconnaissance du coût des ouvrages de protection et surtout de leur entretien.
- une difficulté d'évaluation des temps de retour pour certains aléas.
- une nécessité de statuer sur certaines valeurs intangibles (valeur de la vie humaine) qui ne sont pas prises en compte dans le cas de l'ACB PAPI.

Le rapport montre également que les décideurs expriment un besoin croissant de rationalisation économique de leurs choix de gestion. Cela s'explique principalement par un contexte économique de plus en plus contraignant. Parce que l'ACB représente un regard objectif sur les projets de protection, elle serait un outil permettant de répondre à ce besoin. Les gestionnaires des risques naturels gagneraient donc à se doter d'un outil d'ACB efficace.
Il en résulte donc que l'adaptation d'une méthodologie d'ACB aux risques naturels de montagne doit nécessairement passer par un approfondissement de nos connaissances en termes de vulnérabilité et de coûts. Il s'agit d'un long travail de récolte et d'analyse de données.

3.2 Travaux suisses : RiskPlan et economE, une approche pragmatique

Les gestionnaires suisses ont beaucoup travaillé sur le développement de méthodologies d'analyses coût-bénéfice appliquées aux risques naturels de montagne. Partant eux aussi du constat que beaucoup de paramètres sont difficiles à estimer, ils ont adopté une démarche pragmatique. Ainsi, l'évaluation de l'aléa et de la vulnérabilité des dommages repose en partie sur les connaissances factuelles acquises, mais aussi sur le dire d'expert. Cette démarche prend tout son sens dans la comparaison et la hiérarchisation de différents projets d'aménagements. Un tel cadre de comparaison rend en effet possible l'établissement de conventions pour certaines valeurs difficiles à définir.
Les gestionnaires suisses s'appuient sur deux logiciels principaux :

- **Le logiciel RiskPlan** est utilisé dans une démarche globale de gestion des risques. Il permet de prendre en compte tout type de risque. Ce logiciel est conçu pour être utilisé à l'échelle stratégique, que l'on doit différencier de l'échelle opérationnelle de la gestion des risques. Les hypothèses sur lesquelles reposent les calculs effectués sont donc assez larges. L'objectif est de fournir des indicateurs d'aide à la décision pour la mise en œuvre d'une stratégie cohérente de protection à l'échelle territoriale.
- **Le logiciel economE** est utilisé pour évaluer l'efficacité d'une stratégie de protection envisagée sur un site d'étude bien défini. Il prend en compte trois aléas particulièrement présents en montagne : avalanches, chutes de blocs, laves torrentiels. Chaque aléa est caractérisé selon sa probabilité d'occurrence spatiale au niveau des enjeux. Le logiciel prévoit 3 types d'enjeux : les bâtiments, les voies ferrées et les routes. Chaque enjeu se voit associé un certains nombre de paramètres permettant de caractériser sa vulnérabilité et sa probabilité d'atteinte par un aléa. Il s'agit donc d'un logiciel conçu pour être employé à l'échelle opérationnelle, permettant le dimensionnement des ouvrages et un calcul relativement précis de la valeur actualisée nette du projet.

Le pôle alpin d'études et de recherches pour la prévention des risques naturels (PARN), présente dans son rapport d'activité de l'année 2011 une évaluation de l'outil RiskPlan. Cette évaluation a été réalisée à partir d'une application sur un cas concret.
Ici aussi, il ressort de cette analyse que la grande difficulté de la démarche ACB dans le cadre des risques naturels réside dans la détermination fiable des nombreux paramètres qui lui sont associés. Le PARN met en avant un manque de recul et un manque de connaissances vis-à-vis de ces données.
Il indique aussi que l'un des grands enjeux du développement de méthodologies d'ACB opérationnelles est la définition d'une échelle de travail cohérente. En d'autres termes, il s'agit de définir l'objectif précis de la démarche : s'agit-il de définir une stratégie globale de gestion des risques, ou d'une simple routine de calcul destinée à vérifier l'efficacité d'un aménagement ?

Quoiqu'il en soit, la démarche suisse apporte un certain formalisme au calcul d'ACB. Ce formalisme a l'avantage de faciliter la comparaison de projets différents, puisque les méthodes de calcul appliquées dans la caractérisation des enjeux et des aléas sont identiques. Elle différentie enfin deux échelles d'analyses : l'échelle stratégique et l'échelle opérationnelle.

3.3 Action 2.4.1 du programme INTERREG « Forêts de protection » : Aléa chute de bloc et prise en compte de la forêt

L'action 2.4.1 du programme INTERREG « Forêts de protection » prévoyait la réalisation d'une étude économétrique visant à évaluer l'intérêt d'une gestion forestière avec un objectif de protection au regard des autres types d'interventions de réduction de l'aléa (génie civil).
L'étude qui découle de cet objectif a été réalisée en 2010 par Sylvain Dupire auprès du laboratoire d'économie forestière d'AgroParisTech. L'auteur s'est intéressé exclusivement à l'aléa « chute de

blocs », en raison d'une plus grande abondance de données récentes pour cet aléa par rapport aux principaux autres aléas présents en montagne.

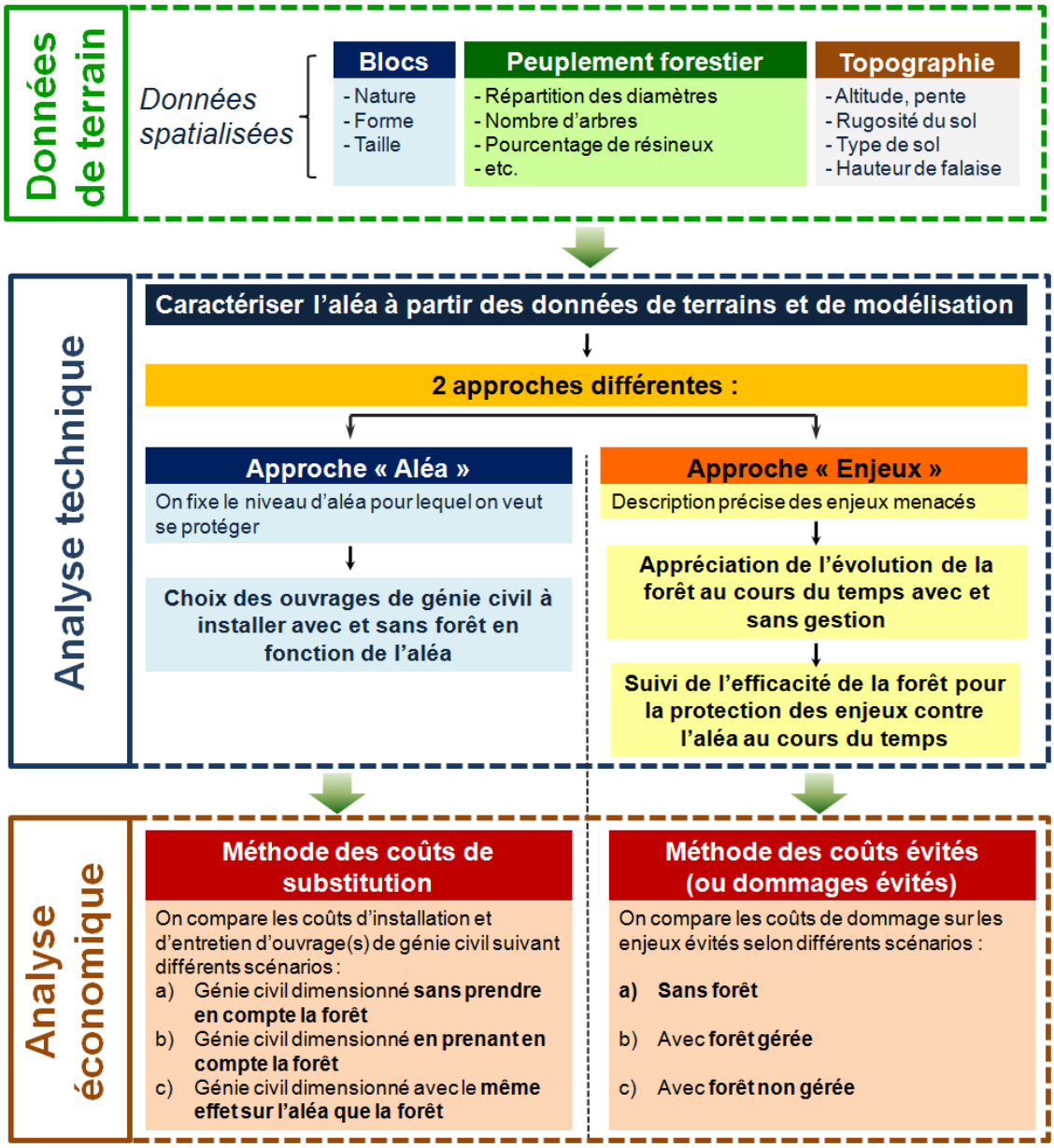
3.3.1 Quelle échelle ?

L'étude a été réalisée à partir de cas concrets sur une échelle spatiale restreinte (environs 10 ha). Le calcul s'est effectué sur une période de 100 ans, compte tenu de l'évolution lente des peuplements de montagne. Il s'agit donc d'une échelle opérationnelle permettant la mise en œuvre effective d'ouvrages de protection pour un site précis. Cependant, les volumes pris en compte sont relativement faibles, et correspondent uniquement aux volumes pour lesquels la forêt a une efficacité importante.

3.3.2 Quelle méthodologie ?

La méthodologie employée est résumée dans la figure 3, extraite du rapport de Sylvain Dupire :

Figure 3 : Méthodologie d'analyse coût-bénéfice – Programme INTERREG Forêts de protection, Volet économique



Cette étude fait donc figure de référence parce qu'elle permet de prendre explicitement en compte les effets de la forêt. Chaque étape de cette méthodologie globale repose sur le développement d'outils spécifiques :

- La durée d'étude étant fixée à 100 ans, la méthodologie a nécessité la pris en compte de l'évolution de la forêt et des impacts de sa gestion, à travers l'élaboration d'un modèle d'évolution.
- L'analyse technique visant à caractériser précisément l'aléa et ses interactions avec les enjeux (probabilité de départ des blocs depuis la falaise, probabilité d'atteinte des enjeux en fonction des caractéristiques de la forêt, intensité de l'aléa…) a nécessité une approche par modélisation. Cette modélisation a été opérée grâce au logiciel RockyFor3D, réalisé par Luuk Dorren en collaboration avec Frédéric Berger de l'Irstea de Grenoble. Il s'agit d'un modèle de simulation en trois dimensions qui calcule les trajectoires individuelles des blocs lors de la chute. Ce modèle associe des algorithmes déterministes basés sur des données physiques avec des approches stochastiques, ce qui fait de Rockyfor3D un modèle probabiliste. (cf. « RockyFor3D à cœur ouvert », Luuk Dorren 2010).
- L'analyse économique repose en grande partie sur la méthodologie utilisée par le logiciel econom**E**.

3.3.3 Quels résultats ?

Avec la réalisation de cette étude, une étape importante à été franchie vers l'élaboration d'une méthodologie ACB pertinente. En effet, si les études précédentes permettait de formaliser le calcul économique, elles ne permettaient pas clairement d'identifier les interactions précises entre aléa et enjeux : l'évaluation des fréquences de départs et des probabilités de propagation restaient un problème récurrent pour le gestionnaire désireux de mettre en œuvre l'ACB.
De plus, cette étude prend en compte explicitement les rôles de la forêt, et permet de la comparer aux autres ouvrages de protection de type génie civil.

Par ailleurs, les résultats confirment l'utilité de la forêt et de la gestion à but de protection contre les chutes de blocs en montrant les bénéfices économiques qu'elle peut apporter. Les conclusions vont souvent dans le sens d'une complémentarité entre génie civil et forêt. Dans certains cas, l'étude montre également que la forêt peut suffire à contrôler l'aléa chute de bloc dans le cas d'enjeux de faible importance : le coût des ouvrages de génie civil n'est pas justifié par la valeur de l'enjeu considéré.

Ce travail apporte enfin de nombreuses données de référence à travers l'élaboration de bases de données de coûts concernant l'installation et l'entretien des ouvrages, mais aussi concernant la gestion forestière à but de protection. Or, on a vu précédemment que le manque de connaissances concernant ces données était un frein important à la réalisation d'ACB.

Cependant, la méthodologie développée s'applique à une échelle locale et seulement à l'aléa « chute de blocs ». Même si elle permet la comparaison de la forêt avec d'autres modes de protection, fournissant des indicateurs précieux pour le choix d'une stratégie effective à l'échelle d'un site, elle ne s'inscrit pas dans une stratégie plus globale de gestion du risque. Nous verrons que l'emploi de cette méthodologie à l'échelle stratégique suppose un certain nombre de modifications. Toutefois, certaines pistes d'adaptation à une échelle plus larges sont proposées. Il conviendra de les prendre en compte par la suite.

3.4 Synthèse et perspectives

L'analyse des expériences passées met en lumière les questions essentielles à se poser en amont de la réalisation d'une ACB : Quel aléa pendre en compte et comment le caractériser ? Dispose-t-on de données suffisantes pour aboutir à une évaluation correcte de cet aléa ? Doit-on favoriser une échelle d'étude stratégique ou au contraire une échelle locale opérationnelle ? Doit-on privilégier une approche de type « enjeu » ou une approche de type « aléa » ? Les réponses à ces questions dépendent des objectifs que l'on se fixe.

L'analyse du contexte et du fonctionnement actuel de la gestion des risques en France montre par ailleurs une prise en compte très peu approfondie de la forêt au niveau du PPR. Il y a donc clairement un besoin de caractérisation et d'intégration de ses rôles à cette échelle stratégique. Une analyse coût-bénéfice qui intégrerait pleinement et de manière rationnelle les effets de la forêt doit donc être opérée à cette même échelle.

La diversité et la complexité des aléas imposent de mener une réflexion différenciée pour chacun d'eux. C'est d'ailleurs la stratégie retenue par la méthodologie d'élaboration des PPR qui se décline en sous-méthodologies pour chaque catégorie d'aléa. En l'état actuel de nos connaissances et des travaux réalisés, l'aléa « chute de bloc » est celui pour lequel cette réflexion méthodologique est la plus accessible, bien que des arbitrages soient en cours sur les outils de caractérisation (actualisation des guides méthodologiques PPR).

Enfin, les lacunes auxquelles on doit faire face dans la caractérisation de certaines grandeurs, telles que la vulnérabilité des enjeux, imposent une approche pragmatique. Cette approche se base à la fois sur nos connaissances et sur le dire d'expert.

Tous ces éléments de contexte permettent de justifier la réalisation d'une étude évaluant les possibilités d'élaboration d'une méthodologie d'ACB applicable à l'échelle stratégique. Cette étude doit donc s'inscrire dans le cadre d'un PPR (volet « Enjeux/Vulnérabilité »), et permettre une intégration efficace de la composante forêt à une stratégie globale de protection contre les risques naturels. Pour des raisons pratiques et de temps, cette étude se concentrera uniquement sur l'aléa « chute de blocs » et s'appuiera sur l'ensemble des travaux déjà réalisés à ce sujet. C'est l'objectif de la troisième partie de ce rapport.

PARTIE 3 : Analyse coût-bénéfice appliquée à l'aléa "chute de blocs"

1 Objectifs et méthodologie générale

1.1 Objectifs

Comme nous l'avons vu précédemment, l'analyse du contexte nous a permis de définir les contraintes qui doivent s'appliquer à l'élaboration d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice adaptée aux risques naturels et intégrant la forêt.

Les objectifs de l'étude peuvent s'exprimer comme suivant :

- Développer une méthodologie d'analyse coût-bénéfice :
  - applicable à l'échelle stratégique. Cela suppose de travailler à l'échelle d'un bassin de risque et pour lequel il est possible de distinguer une entité décisionnelle précise. L'ACB étant un outil d'aide à la décision, il s'adresse donc directement à un maître d'ouvrage. Le plus souvent, il s'agit d'un territoire communal ou intercommunal.
  - permettant d'intégrer la forêt dans la stratégie globale de gestion des risques.
  - dédiée à l'aléa « chute de blocs ». On exclue ici les phénomènes de type éboulement rocheux.

- Tester la méthodologie sur un territoire d'essai, défini dans la région de Grenoble
- Évaluer l'efficacité et la fiabilité de la méthode, à travers une étude de sensibilité des principaux paramètres et leur influence sur les résultats.

1.2 Méthodologie générale

La méthodologie proposée ici s'appuie en majorité sur le travail de Sylvain Dupire développé dans le cadre du programme INTERREG. En effet, cette méthodologie apporte les bases les plus complètes concernant l'analyse coût-bénéfice pour l'aléa « chute de blocs » et prenant en compte la forêt. Elle a de plus l'avantage de s'appuyer sur les travaux suisses à travers l'adaptation du logiciel econom**E**.

Pour atteindre les objectifs fixés par la présente étude, il convient d'apporter trois grands types d'adaptation à cette méthode :

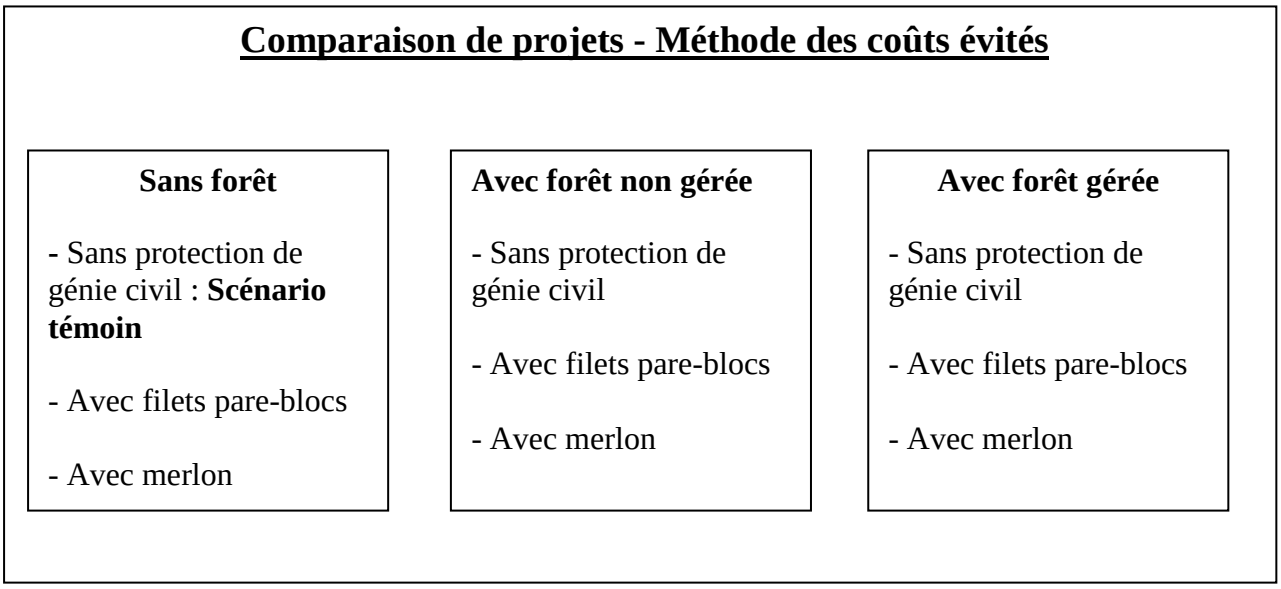
- **L'adaptation des scénarios à comparer.** L'analyse coût-bénéfice doit en effet répondre à la question suivante : quelle stratégie de protection est la plus adaptée en fonction du site étudié ? Ici, nous ne cherchons plus à comparer l'efficacité de la forêt par rapport aux ouvrages de génie civil, mais à comparer différents projets de protection, à l'intérieur desquels la forêt et sa gestion sont intégrées. Nous verrons que cette différence de point de vue aura des conséquences importantes sur le traitement des résultats.
- **L'adaptation des volumes pris en compte et la délimitation de la zone d'étude.** La cohérence avec les principes d'élaboration du PPR exige en effet la définition d'un aléa de référence et d'une unité aléa-enjeu. L'échelle d'étude utilisée dans le cadre du programme INTERREG étant différente, il existe donc des décalages méthodologiques auxquels il conviendra de remédier.
- **L'adaptation à une échelle stratégique**, d'ordre communal ou intercommunal. Le passage d'une application locale à une application plus large implique nécessairement un certain nombre d'adaptations portant notamment sur la précision des données de terrains ou sur la complexité et le nombre des simulations envisagées.

Pour étudier et déterminer précisément les adaptations nécessaires, l'analyse a été séparée en deux parties. Nous nous intéresserons d'abords à un cas d'étude précis, permettant d'établir une méthodologie « idéale » d'ACB. Tirant les conclusions nécessaires de cette première partie, nous étudierons ensuite les conséquences pour son application à une échelle pertinente (territoire communale ou intercommunal).

1.2.1 Définition de scénarios

L'analyse coût-bénéfice repose sur la comparaison des valeurs actualisées nettes entre plusieurs scénarios d'intervention. Cette comparaison sera effectuée selon la méthode des coûts évités.
La figure 4 synthétise l'ensemble des scénarios qui seront testés sur notre site d'étude.

Figure 4 : Définition des scénarios d'analyse coût-bénéfice



Au total, il y a donc 9 scénarios d'intervention possibles. La fonction de protection de la forêt est intégrée à une stratégie plus globale qui peut comprendre également des ouvrages de génie civil.
Le scénario « Sans forêt et sans ouvrages de génie civil » correspond au scénario témoin : il représente le maximum de dégâts possible sur les enjeux.
Le classement de chaque scénario selon leur valeur actualisée nette permettra de définir lequel est le plus rentable selon la situation. En fonction des caractéristiques du site étudié, ce classement pourra donc conclure quant à l'opportunité d'utiliser la forêt et la gestion forestière à des fins de protection. Si tel est le cas, il permettra de déterminer s'il est préférable d'utiliser la forêt soit en complément, soit en substitution des ouvrages de génie civil.

1.2.2 Présentation du calcul économique

Afin de récolter les données nécessaires à la réalisation de l'analyse coût-bénéfice, il convient tout d'abord de bien définir les variables intervenant dans le calcul économique. Cette partie propose une présentation générale des calculs utilisés, afin d'en comprendre les principes fondamentaux. Le détail des formules est présenté en annexe 2.
Il s'agit ici d'appliquer la méthode des coûts évités (MCE). On évalue ainsi la réduction des dommages potentiels sur les enjeux due à la réalisation du scénario étudié.

- **Calcul des coûts actualisés**

La première étape du calcul consiste à déterminer l'ensemble des coûts relatifs à chaque projet. Ces coûts regroupent à la fois les dommages sur les enjeux et les mesures de protection mises en place et peuvent être exprimés selon la formule suivante :

$$CA_{annuel} = -\frac{1}{(1+r)^t - 1} \times \sum_{i=0}^{t} (Cdégât_i + Couvrage_i + Cgestion_i) \times (1+r)^{t-1}$$

CA_{annuel} : [€/an] Coûts actualisés annuels.
r : [%] Taux d'actualisation
t : [ans] Période de calcul
$Cdégâts_i$: [€/an] Coûts des dégâts probables de l'année *i*
$Couvrage_i$: [€/an] Coûts d'implantation et d'entretien des mesures de protection génie civil de l'année *i*
$Cgestion_i$: Coûts de gestion forestière de l'année *i*.

Le coût des dégâts correspond aux dommages prévisibles compte tenu des stratégies de protections sur une période donnée. Les dommages évités sont des destructions matérielles, des pertes humaines, des perturbations de l'activité économique, ce sont des pertes plus ou moins directes.

Pour le calcul nous ne prendrons en compte que les coûts directs (dommages sur des objets physiques : habitations, routes…) et les coûts intangibles (biens immatériels qui ne peuvent être réparés ou récupérés : vies humaines). Les coûts indirects (pertes économiques indirectes liées à des baisses de productivité à la suite d'un phénomène naturel) ne seront pas systématiquement pris en compte du fait de la complexité de leur évaluation.

La valeur de la vie humaine est une notion qui fait souvent débat. S'il paraît impossible de définir une valeur réelle à ce coût intangible, les stratégies de protection nécessitent cependant de la prendre en compte sous forme monétaire. On parle de valeur statistique de la vie humaine (VST). Le mode de calcul de la VST a fait l'objet de nombreuses études qui aboutissent à des résultats parfois très différents. Pour réaliser une ACB prenant en compte le coût de la vie humaine, il est donc nécessaire de statuer. Ici, on retiendra la valeur de **1 000 000 €/personne,** issue du rapport Boiteux de 2001.

- **Coûts des dégâts sur les enjeux, de la gestion forestière et des ouvrages de génie civil**

- La formule générale de calcul des coûts des dégâts peut s'exprimer comme suivant :

$$C_{dégâts} = F_{départ} \times P_{atteinte} \times Valeur_{enjeu} \times Vulnérabilité_{enjeu}$$

$F_{départ}$ [nombre de blocs / an] : Fréquence de départ annuelle des blocs concernés par l'enjeu

$P_{atteinte}$ [%] : Probabilité qu'un bloc atteigne un enjeu, une fois décroché de la falaise.

$Valeur_{enjeu}$ [€] : Valeur monétaire de l'enjeu.

$Vulnérabilité_{enjeu}$ [%] : Coefficient correspondant la vulnérabilité de l'enjeu face à l'aléa.

- Les coûts relatifs à l'installation et à l'entretien des ouvrages de protection dépendent de leur dimensionnement. Celui-ci est fonction de l'énergie et de la hauteur de passage maximales des blocs à leur niveau.
- Les coûts de gestion forestière dépendent du scénario sylvicole retenu.

- **Calcul de la valeur actualisé nette**

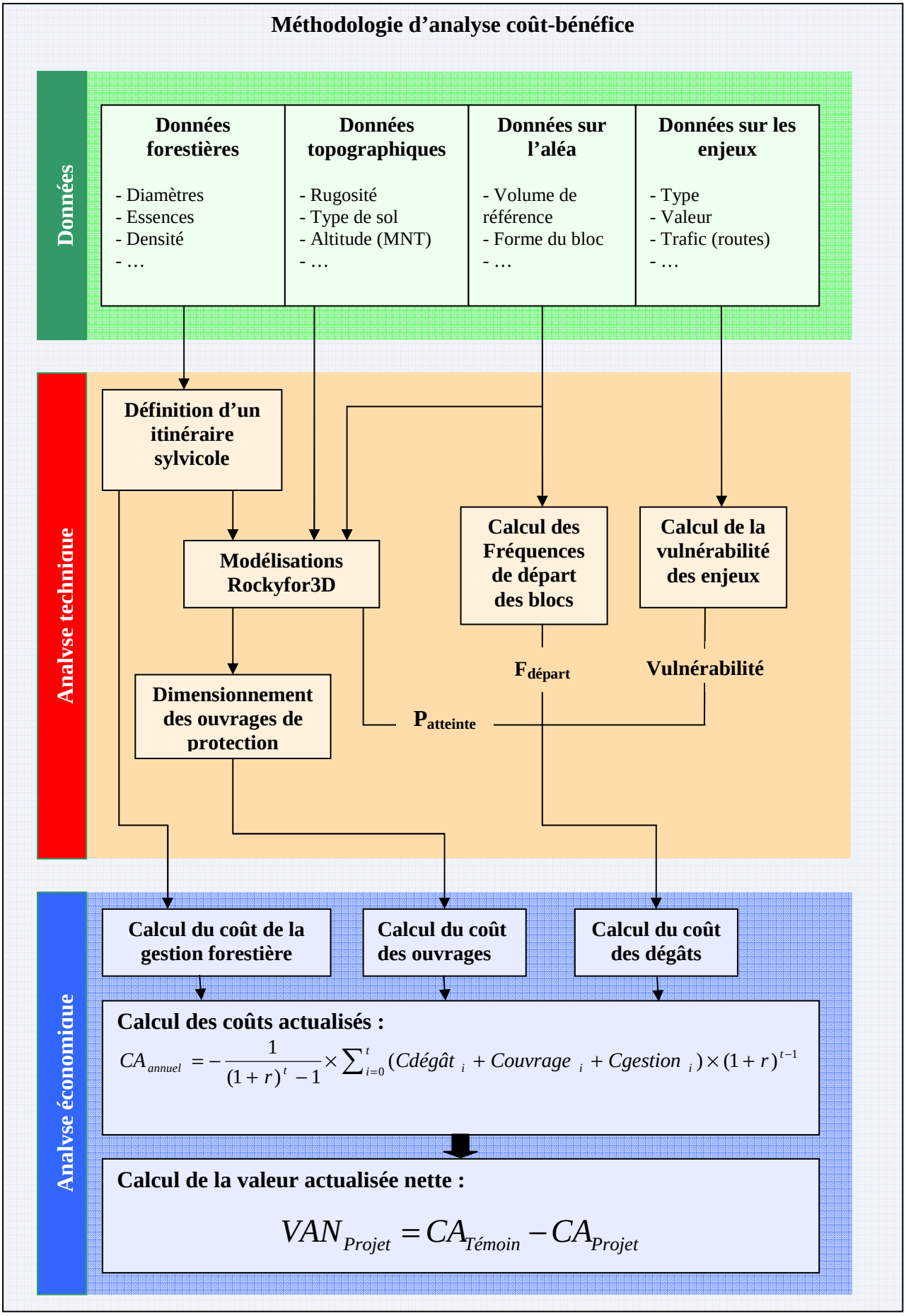
Une fois que l'ensemble des coûts relatifs à un projet ont été calculés, on peut obtenir sa valeur actualisée nette, en calculant la différence des coûts actualisés nets entre ce projet et le scénario témoin « sans forêt et sans ouvrages » :

$$VAN_{Projet} = CA_{Témoin} - CA_{Projet}$$

2 Méthodologie d'analyse coût-bénéfice à l'échelle locale

Toute la difficulté d'appliquer l'analyse coût-bénéfice dans le domaine des risques naturels réside dans la caractérisation des variables intervenant dans le calcul. Ces variables peuvent être déterminées avec un degré plus ou moins élevé de précision. Plus l'échelle d'étude est restreinte, plus il sera possible d'obtenir ces valeurs avec une précision importante.
La première partie du travail consiste donc à construire une méthodologie adapté à un cas précis, afin d'étudier la sensibilité de chaque paramètre du calcul. La figure 5, présentée en page suivante résume la structure de la méthode employée.

Figure 5 : Méthodologie générale d'analyse coût-bénéfice



La méthodologie retenue dans le cas de notre étude suit les mêmes principes généraux que la méthodologie appliquée dans le cadre du projet INTERREG. Il s'agit d'une méthodologie vaste et complexe.
Par soucis de clarté et de concision, seuls les principaux points seront exposés ici. L'accent sera porté sur les éléments nouveaux ou qui diffèrent de la méthodologie développée dans le cadre du programme INTERREG, et sur les éléments qui auront des conséquences importantes sur l'analyse des résultats.

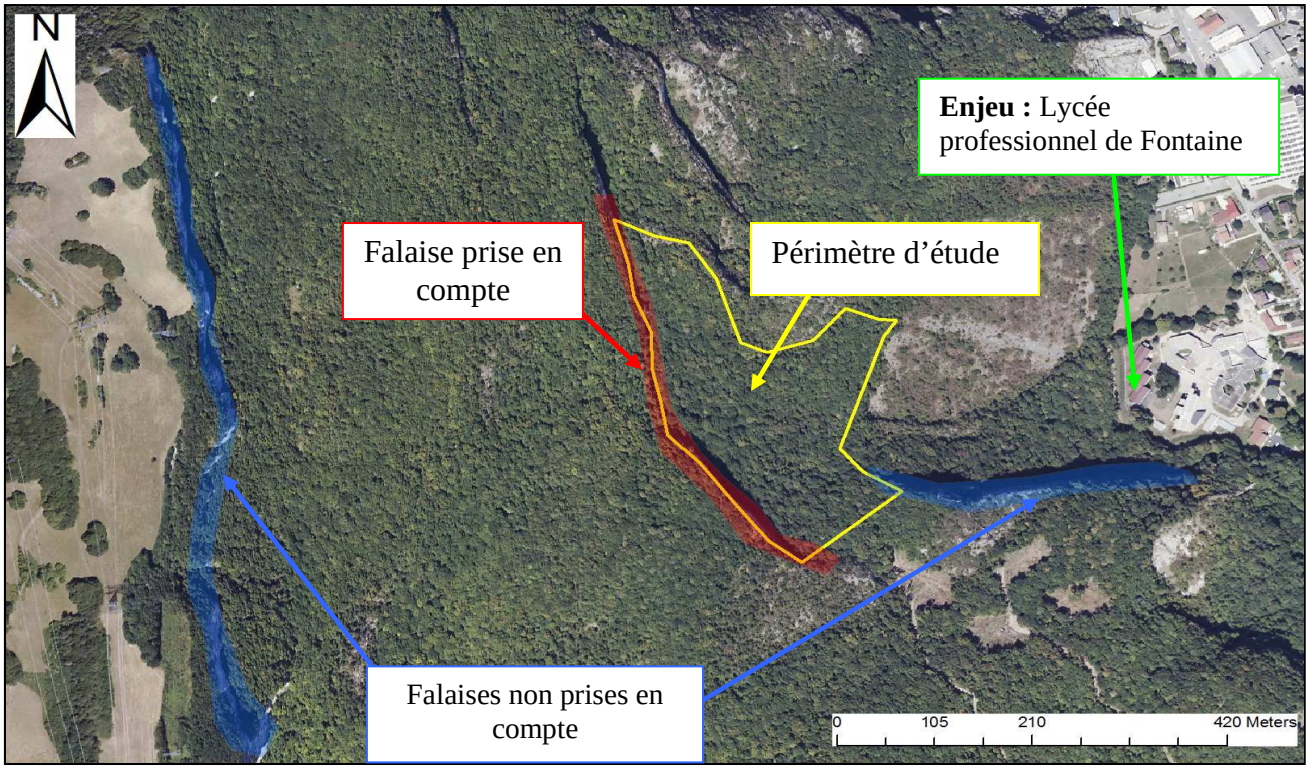
2.1 Choix du site d'étude et de la durée de calcul

Le site pilote étudié dans cette première approche est situé sur la commune de Fontaine et fait partie du territoire de la METRO, communauté d'agglomération de Grenoble. Il concerne une partie de la falaise des Vouillants surplombant la commune. Ce site a été retenu pour plusieurs raisons :

- Il fait partie du réseau de chantiers pilotes du programme INTERREG et a déjà fait l'objet d'une analyse coût-bénéfice dans le cadre de l'action 2.4.1 de ce programme. Le choix de ce site permettra donc de comparer directement les résultats obtenus et d'évaluer les différences entre les deux méthodologies. Ce choix confère de plus l'avantage de mobiliser les données issues du programme INTERREG à travers les données forestières disponibles ou encore le coût des travaux réalisés sur le chantier pilote.
- L'enjeu concerné par la zone est bien délimité : il s'agit du lycée professionnel de Fontaine. L'unicité de l'enjeu facilitera les manipulations de la méthodologie, en particulier lors de l'étude de sensibilité des paramètres de calcul.
- L'analyse de l'aléa pourra s'avérer relativement complexe, étant donné la présence de plusieurs zones de départ réparties sur plusieurs falaises. La méthodologie retenue devra s'adapter à cette réalité de terrain, et pourra donc par la même occasion s'adapter à des situations plus simples.

Voici le site d'étude tel que défini dans le cadre de l'action 2.4.1 du programme INTERREG :

Figure 6 : Délimitation du site d'étude Fontaine – Étude INTERREG



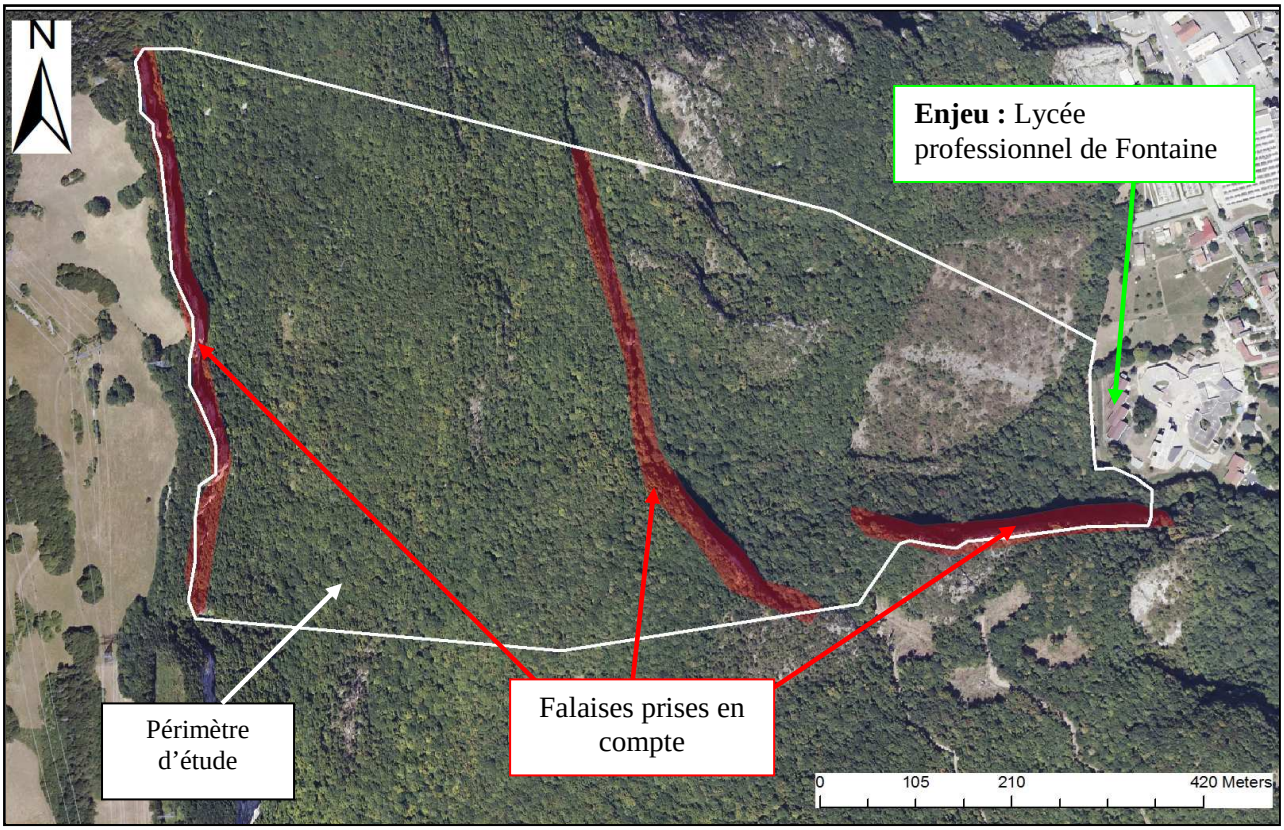
Le périmètre d'étude a notamment été déterminé par le type de propriété. Ici, le périmètre représente les limites de la forêt communale de Fontaine. Les chantiers pilotes installés sur le territoire de la METRO dans le cadre du programme INTERREG sont en effet situés dans différentes forêts communales. La falaise située en aval du périmètre d'étude n'a donc logiquement pas été retenue, puisque la gestion forestière ne peut pas avoir d'effet sur les chutes de blocs qui en sont issus. En revanche, l'étude a pris en compte la structure de la forêt située en aval et son évolution naturelle.

Ce constat pose le problème important du type de propriété et de ses conséquences sur la gestion des risques. En effet, la démarche PPR repose sur une cohérence entre aléa et enjeu grâce à la définition d'une unité aléa-enjeu. Pourtant, la gestion forestière est mise en place à l'échelle de la propriété. Ces décalages représentent un problème difficile à résoudre.
Dans l'idéal, la gestion forestière à but de protection devrait être raisonnée à l'échelle de l'unité aléa-enjeu. Ceci suppose donc la mobilisation de tous les types de propriétés concernés par la zone d'étude.

Dans notre cas, le choix a donc été fait de s'affranchir du type de propriété dans la définition du périmètre. Notons toutefois qu'à l'échelle locale, il est toujours possible de le prendre en compte en déterminant par exemple des hypothèses quant à la mobilisation des propriétaires dans la stratégie de protection. On peut ainsi déterminer différents scénarios de gestion forestière traduisant plusieurs niveaux de mobilisation.

Le périmètre retenu a donc été déterminé selon la logique de l'unité aléa-enjeu, en me basant sur l'expertise de mon maître de stage :

Figure 7 : Délimitation du site d'étude de Fontaine – Étude actuelle



La conséquence directe de ce choix est une augmentation de la surface de la zone à considérer.

Comme dans le cadre du programme INTERREG, l'ensemble du calcul économique est réalisé sur 3 périodes : 10 ans, 50 ans et 100 ans. Le choix d'une longue période d'étude a été fait afin de mieux correspondre à l'évolution lente des peuplements montagnards.

2.2 Choix de l'aléa de référence

- **Définition de l'aléa de référence selon l'approche PPR**

Comme nous l'avons vu, le choix d'un aléa de référence est un processus complexe, se basant avant tout sur une approche historique des évènements passés, mais aussi sur une expertise fine de l'aléa. Il est également influencé par la nature des enjeux exposés. Ainsi, dans certains cas, même si l'historique montre des volumes recensés relativement faibles, l'expert peut fixer un aléa de référence plus élevé lorsqu'il constate par exemple des failles et fissures dans la roche susceptibles de libérer des blocs de plus grandes dimensions, ou lorsque d'importants enjeux humains le justifient.

L'aléa de référence a donc été évalué en coopération avec mon maître de stage. Pour le site de Fontaine, il a été fixé à 10 m^3.

- **Quelles conséquences pour l'analyse coût-bénéfice ?**

Ce volume important implique de lourdes conséquences :

- Selon la logique PPR, on se fixe d'hors et déjà un aléa contre lequel on souhaite se protéger. Le résultat, même si il prend en considération la présence de vies humaines, ne sera que peu influencé par l'importance réelle des enjeux.
- La forêt possède une efficacité extrêmement faible pour ce type de volume. Comment l'intégrer à une stratégie de protection si le volume que l'on prend en compte ne permet pas de montrer son efficacité ?
- Même par la méthode des coûts de substitution, il risque d'être difficile de prouver un effet significatif de la forêt sur la réduction des énergies des blocs, donc sur la diminution du dimensionnement des ouvrages de génie civil situés à son aval.
- Il existe un décalage méthodologique entre le PPR et le principe même de l'analyse coût-bénéfice : Alors que le premier fixe directement un niveau de risque contre lequel on se protège, le second juge de l'opportunité de la protection selon la valeur actualisée nette. En d'autres termes, même si on prend en compte l'aléa de référence tel que défini par le PPR, le rapport coût-bénéfice pourra suggérer de ne pas protéger la zone étudiée en raison de coûts de protection trop importants au regard des enjeux.

- **Vers un glissement de l'approche « aléa » vers l'approche « enjeu »**

L'intérêt porté récemment par les décideurs sur l'analyse coût-bénéfice témoigne d'un glissement progressif depuis une approche «aléa » vers une approche « enjeu ». Le contexte économique difficile est l'un des principaux éléments explicatifs d'une telle évolution.

Avec la prise en compte de tels volumes, l'intégration de la forêt dans la stratégie de protection prend toute sa place dans l'approche « enjeu ». Pour un aléa fixé, c'est en effet la valeur des enjeux qui dicte les coûts que nous sommes en mesure d'accepter. Les coûts de gestion d'une forêt étant faibles en comparaison à ceux du génie civil, la gestion forestière serait donc le candidat idéal dans le cas d'enjeux de faible importance. L'analyse technique et les résultats du calcul économique effectué dans le cadre de cette étude apporteront des éléments de réponse.

Quoiqu'il en soit, l'aléa de référence, même pour une probabilité d'occurrence faible, est susceptible de causer des dégâts extrêmement importants, donc d'influencer fortement le résultat de l'analyse coût-bénéfice. On ne peut donc pas faire l'impasse sur ces volumes importants.
De plus, quelque soit l'approche favorisée, il est nécessaire de se fixer une limite de volume à prendre en compte. Il semble en effet illusoire de tester l'ensemble des volumes pouvant potentiellement se détacher de la falaise.
Il en résulte que le volume de référence tel que défini dans la méthodologie PPR représente un compromis acceptable. La définition de ce volume est d'ailleurs elle-même issue d'un consensus.
En conclusion, nous retiendrons l'aléa de référence comme le volume maximal à prendre en compte dans le calcul économique. Pour être réaliste, l'analyse devra également intégrer des volumes de plus faible importance, qui représentent la majeure partie des phénomènes observés.

2.3 Détermination de la fréquence de départ des blocs

- **Approximation par une loi puissance**

La fréquence de départ des blocs en falaise est un paramètre très difficile à déterminer. En effet, les données disponibles pour l'évaluer restent rares. Cependant, depuis les dix dernières années, des travaux ont été menés pour tenter d'établir des lois permettant de caractériser cette fréquence de départ. Ces travaux se basent sur l'analyse statistique d'évènements recensés sur différents territoires. Une publication récente (Dussauge-Peissier et Al. 2002, Hantz et al. 2003), montre que la fréquence spatio-temporelle, qui représente le nombre de chutes de blocs par unité de temps et par unité de surface pour une plage de volume définie, peut être modélisée par la formule suivante :

$$F_r = \frac{3abhk^{\frac{-1}{3}}}{(3b-1)}\left(V_{\min}{}^{\frac{1}{3}-b} - V_{\max}{}^{\frac{1}{3}-b}\right)$$

Fr : [nombre de chutes / an / m^2] Fréquence de chute pour des volumes compris entre Vmin et Vmax
h [m] : hauteur moyenne de la falaise
V_{min} : [m^3] volume minimum des blocs
V_{max} : [m^3] volume maximum des blocs
k : [1] coefficient de forme de la falaise
a : [1] [chutes/an/m²] Nombre de chutes de blocs observées historiquement
b : [1] : paramètre dépendant du site étudié

Pour les falaises grenobloises, les coefficients a, b et k sont connus, car une étude y a été réalisée. La fréquence d'éboulement a pu être estimée à partir d'un inventaire historique établi grace aux données d'archives du service RTM de l'Isère.

- **Choix de Vmin et de Vmax**

Dans le cas de notre étude, nous avons vu que le volume maximal à prendre en compte dans l'analyse correspond au volume de référence : Vmax = Vréf
Concernant le volume minimal, deux choix sont possibles :

- On choisit Vmin tel que la vulnérabilité sur l'enjeu est nulle.
- On choisit Vmin tel que l'enjeu n'est pas atteint par le bloc (Pprop = 0)

Une fois les volumes maximum et minimum déterminés, il suffirait en théorie de calculer la fréquence de départ pour des blocs compris entre Vmin = 0m^3 et Vmax = Vréf.

Cependant, les probabilités de propagation des blocs dans la pente ainsi que la vulnérabilité des enjeux sont très corrélés au volume.

Pour pallier ce problème, il est donc nécessaire de « découper » la plage de volume définie par Vmin et Vmax en sous-parties. Chaque plage de volume sera considérée comme similaire au niveau de la probabilité de propagation et de la vulnérabilité sur l'enjeu. Ce choix implique la réalisation d'une modélisation RockyFor3D par plage de volume.

2.4 Modélisations RockyFor3D

Les modélisations réalisées à l'aide du logiciel RockyFor3D permettent d'atteindre deux objectifs principaux :

- Déterminer la probabilité d'atteinte des blocs au niveau des enjeux.
- Déterminer l'énergie et la hauteur de passage des blocs à proximité des enjeux afin de dimensionner correctement les ouvrages de protection.

La détermination de ces valeurs dépend d'un grand nombre de variables, réparties en trois catégories :

- Les caractéristiques des blocs : forme, dimensions…
- La topographie
- La structure des peuplements forestiers : densité, diamètre et répartition des tiges…

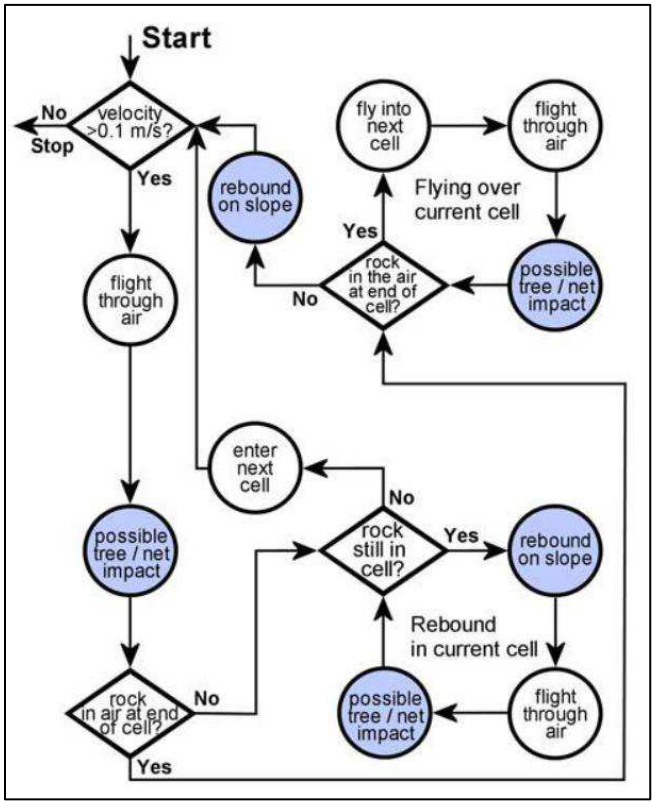
Plusieurs contraintes s'appliquent aux modélisations Rockyfor3D :

- elles doivent tenir compte de volumes de départ différents, répartis entre un volume minimum et un volume maximum égal à Vréf.
- elles doivent tenir compte de la structure et de l'évolution des peuplements tout au long de la durée de calcul (100 ans), selon trois scénarios (sans forêt, avec forêt non gérée, avec forêt géré)

2.4.1 Présentation du logiciel

L'outil de modélisation Rockyfor3D simule des trajectoires de chutes de pierre sur une zone à partir de différentes données réalisées au format ASCII. Les simulations peuvent être faites avec ou sans prise en compte de la forêt.
Pour chaque cellule définie comme cellule de départ, un nombre n (choisi par l'utilisateur) de chutes de blocs est simulé.
La trajectoire d'un bloc consiste en l'ensemble des chutes libres, rebonds et impacts qu'il réalise (cf. figure 8) ; le modèle ne permet pas de prendre en compte les roulements le long de la pente, et ces roulements sont donc modélisés comme une série de micro-rebonds, calculés sur le même modèle que les rebonds, modèle décrit ci-après.
Lors d'un rebond, le point d'impact est repéré (car, en tout instant de la chute, les coordonnées X (est-ouest), Y (nord-sud), Z (hauteur) du bloc sont connus), et on y récupère les caractéristiques de la pente et la vitesse d'arrivée du bloc. Un rebond ou un impact (arrivée du bloc sur un arbre ou un ouvrage (génie civil, bâtiment) provoque ensuite une déviation de la trajectoire, fonction du point

Figure 8 : Schéma de fonctionnement général de Rockfor3D



d'impact et de la vitesse d'arrivée au point. Ceci s'exprime au travers du calcul d'un angle, permettant de modifier la trajectoire du bloc et ainsi de continuer la modélisation et le calcul de la suite de la trajectoire selon un « schéma de décision » (voir figure modèle). Le modèle de trajectoires de Rockyfor3D se base sur différents postulats et algorithmes.
Il est important de souligner que Rockyfor3D ne prend pas en compte le fractionnement des blocs qui peut survenir lors des différents impacts. Le volume de chaque bloc à l'arrivée est donc identique à celui de départ.

2.4.2 Récoltes des données nécessaires à la modélisation

- **Données relatives à la topographie et aux caractéristiques des blocs**

Le tableau 3 résume l'ensemble des variables liées au milieu physique qui sont nécessaires à l'utilisation du logiciel RockyFor3D :

Tableau 3 : Variables topographiques du modèle Rockyfor3D

Variables	Modalités	Unités
Taille des blocs	D1 : longueur moyenne des blocs D2 : largeur moyenne des blocs D3 : hauteur moyenne des blocs	m
Forme des blocs	0 : pas de forme dominante 1 : forme rectangulaire 2 : forme ellipsoïdale 3 : forme sphérique 4 : forme de disque	-
Masse volumique de la roche	La masse volumique dépend de la nature de la roche	Kg/m^3
Altitude	Obtenue à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT)	m
Rugosité du sol	Rg10 : sur 10% de la surface Rg20 : sur 20% de la surface RG70 : sur 70% de la surface	m
Type de sol	0 : rivière, marécage, matériau dans lequel le bloc peut pénétrer complètement 1: sol fin (profondeur > 100 cm), et/ou sol de vallée composé de sables et graviers 2 : sol fin (profondeur < 100 cm) 3 : piste forestière, éboulis fin (Ø < ~10 cm), sol moyennement compacté avec des petites pierres 4 : éboulis grossier – talus (Ø > ~10 cm), sol compacté avec présence de pierres 5 : roche mère avec couvert fin de matériau altéré ou de sol 6 : roche mère 7 : route goudronnée (asphalte)	-
Hauteur de falaise	Hauteur moyenne de la falaise concernée par les chutes de blocs	m

Dans le cas de notre étude, les dimensions des blocs sont déterminées avant tout en fonction du volume de référence défini précédemment. Pour déterminer chaque dimension, on établit l'importance relative de chaque valeur par rapport aux autres. Il est ainsi possible d'ajuster le volume total simulé tout en respectant les proportions de chaque dimension.

- **Prise en compte de plusieurs volumes de départ**

Pour une modélisation, le logiciel RockyFor3D permet de faire varier le volume de départ de plus ou moins 50% autour de sa valeur moyenne. La détermination des volumes de départs à prendre en compte a doc été effectuée comme suit :

Tableau 4 : Détermination des volumes de départs

Volume de départ	Plage de volumes associée
$V_{réf}$	$V_{réf}$ + 50% $V_{réf}$ – 50%
V_2 tel que : V_2 + 50% = $V_{réf}$ – 50%)	V_2 + 50% V_2 – 50%
V_n tel que : V_n + 50% = $V_{(n-1)}$ – 50%	V_n + 50% V_n – 50%
V_{min}	V_{min} + 50% V_{min} – 50%

À chaque volume est associée une fréquence de départ calculée selon la formule vue au paragraphe 2.3.

Dans le cas de notre site d'étude, on obtient les volumes de départ suivant : $V_{réf}$: 10 m^3
V_2 : 3,3 m^3
V_3 : 1,11 m^3
V_{min} : 0,56 m^3

Pour une plage de volume inférieure à V_{min} = 0,56 m^3, les blocs ne parviennent plus à hauteur des enjeux.

- **Données relatives aux peuplements forestiers et création du « fichier arbre »**

RockyFor3D permet de prendre en compte la forêt selon deux méthodes :

- À partir d'un fichier rassemblant les coordonnées géographiques et la dimension des arbres sur l'ensemble de la zone d'étude. Ce type de fichier peut-être obtenu en cas de couverture Lidar sur la zone d'étude.
- À partir de données dendrométriques relevées sur le terrain. Dans ce cas-là, le logiciel crée un « fichier arbre ». Les arbres sont alors placés aléatoirement dans l'espace avec des dimensions proches de celles observées sur le terrain. Le logiciel crée donc un peuplement virtuel s'apparentant à la réalité.

Les données Lidar n'étant pas encore toujours disponibles selon le site étudié, c'est donc la seconde modalité qui a été retenue pour l'étude. Cependant, il est probable que dans un futur proche, la récolte des données sylvicoles sur le terrain soit grandement facilitée par les données Lidar.

Dans la version actuelle du logiciel, la simulation du « fichier arbre » correspond à un peuplement traité en futaie régulière. Or, **la majorité des peuplements de basse et moyenne altitude rencontrés aux alentours de Grenoble sont dominés par des traitements en taillis ou en taillis-sous-futaie.**
Dans le cadre de cette étude, un autre modèle a donc été utilisé pour créer le fichier arbre. Il a pour but de retranscrire plus fidèlement la répartition spatiale des tiges dans le cas des peuplements de taillis.
Ce modèle se base sur le travail d'un groupe d'étudiants forestiers d'AgroParisTech réalisé lors d'un projet en novembre 2012. Il prend la forme d'un script fonctionnant sous le logiciel R. Certaines modifications ont été apportées, afin de corriger quelques erreurs et d'améliorer la rapidité du script dans le cas de zones d'étude de surface importante. Toutefois, il s'agit d'un modèle qui n'a fait l'objet d'aucune validation, et une évaluation plus poussée serait nécessaire. Le script final est visible en annexe 3.

NB : Plusieurs études sont actuellement en cours à l'IRSTEA de Grenoble à propos des taillis. Elles ont pour objectif d'évaluer l'efficacité des taillis face aux chutes de blocs. L'inventaire et la caractérisation dendrométrique des peuplements de taillis font partie de ces études.

Les données de terrain nécessaires au fonctionnement du modèle sont regroupées dans le tableau 5:

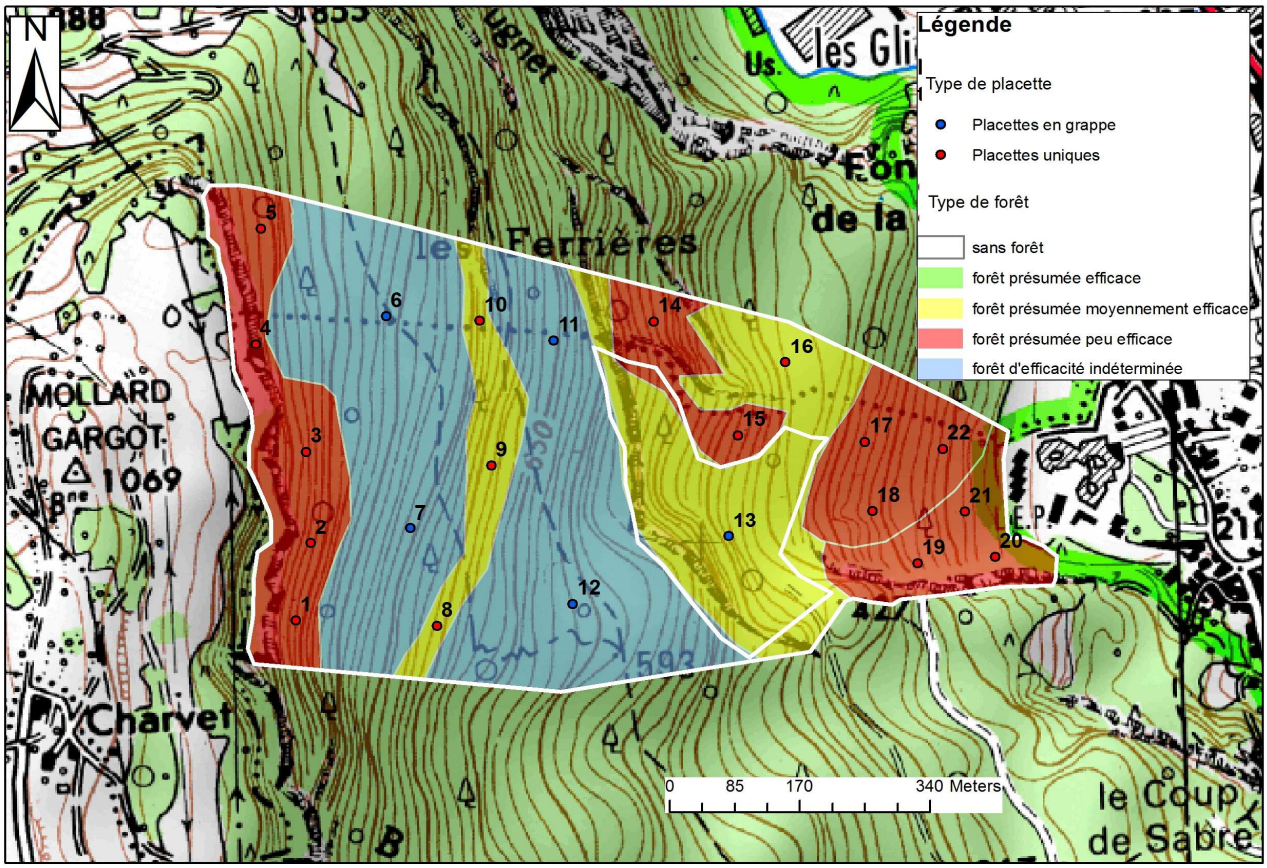
Tableau 5 : Synthèse des données de terrains nécessaires à l'analyse coût-bénéfice

Variables	Unités
Longueur (dans le sens de la pente)	m
Largeur du peuplement (perpendiculaire à la pente)	m
Proportion de résineux	%
Densité de cépées de taillis	cépées / ha
Nombre de moyen de brins par cépée	brins / cépée
Ecart-type du nombre de brins par cépée	brins / cépée
Diamètre moyen des brins de taillis à 1,30 m	cm
Ecart-type du diamètre moyen des brins de taillis	cm
Longueur de la cépée (sens de la pente)	m
Ecart-type de la longueur de la cépée	m
Largeur de la cépée (perpendiculaire à la pente)	m
Ecart-type de la largeur de la cépée	m
Densité de franc-pieds $D_{1,30}$ < 27,5 cm	tiges / ha
Densité de franc-pieds $D_{1,30}$ > 27,5 cm	tiges / ha
Diamètre moyen des francs-pieds $D_{1,30}$ < 27,5 cm	cm
Diamètre moyen des francs pieds $D_{1,30}$ > 27,5 cm	cm

- **Pré-cartographie des peuplements et mise en place d'un inventaire statistique**

Afin de récupérer les données décrites précédemment concernant les peuplements et les caractéristiques physiques de la zone d'étude, un protocole de relevé de terrain a été mis en place.
Dans un but d'efficacité, une précartographie des peuplements a été réalisée sur SIG à partir de différentes données telles que les orthophographies, les photographies infra-rouge, ou encore l'ombrage du modèle numérique de terrain.
Ensuite, des placettes on été positionnées en fonction des zones délimitées par la précartographie.
Pour faciliter le cheminement sur le terrain, les placettes on été disposées en grappes de 5, lorsque la surface de la zone le permettait. L'annexe 4 détaille le protocole utilisé pour la détermination du nombre et la localisation des placettes, et les modalités des relevés effectués sur chaque placette. La figure 9 présente la pré-cartographie réalisée sur le site de Fontaine.

Figure 9 : Pré-cartographie des peuplements – Site de Fontaine



2.4.3 Prise en compte de l'évolution des peuplements forestiers

Puisque la durée d'étude est fixée à 100 ans, il est nécessaire de prendre en compte l'évolution naturelle des peuplements forestiers, ainsi que l'influence des interventions sylvicoles.
Pour ce faire, un nouveau fichier arbre est créé pour chaque simulation RockyFor3D en fonction des interventions réalisées et de l'évolution naturelle du peuplement.
Afin de créer ces « fichiers arbres », un modèle d'évolution identique à celui utilisé dans le cadre du programme INTERREG a été retenu. Ce modèle utilise des valeurs issues de la base de données de l'inventaire forestier national (IFN). Les départements retenus pour l'analyse sont le Doubs, l'Isère, le Jura, la Savoie et la Haute-Savoie. L'annexe 5 présente la synthèse des données utilisées. Il permet de prendre en compte la mortalité naturelle, l'auto-éclaircie, et l'influence de la sylviculture. Les paragraphes suivant résument son fonctionnement.

- **Mortalité naturelle**

À partir d'un taux de mortalité naturelle et d'une durée de survie déterminés en fonction des caractéristiques des peuplements et des données IFN, le modèle supprime un certain nombre d'arbres. Ce taux de mortalité est appliqué à partir de la classe de diamètre 30 cm.

- **Auto-éclaircie.**

La phase durant laquelle est observée le plus de mortalité et donc de changements dans le peuplement est celle d'auto-éclaircie. Le mécanisme permettant de simuler cette phase est appliqué après la mortalité naturelle. Il se base sur les principes suivant :

- On définit une surface terrière maximale. Cette surface terrière est déterminée à dire d'expert en fonction de chaque peuplement. Les données IFN fournissent quant à elle des valeurs indicatives pour aider l'opérateur dans son choix.

- On élimine en priorité les arbres de plus faible diamètre pour arriver à la surface terrière maximale.

- **Sylviculture et évolution des zones avec intervention.**

- Sylviculture par trouées

Le guide des sylvicultures de montagne fournit un certain nombre de références et de conseils de gestion à appliquer dans le cas de forêts à fonction de protection contre les chutes de blocs. Les chantiers pilotes réalisés dans le cadre du programme INTERREG permettent de tester différentes modalités d'intervention.
À l'heure actuelle, c'est la sylviculture par trouées qui est le plus souvent préconisée. Ce choix s'explique en partie par les contraintes physiques propres aux zones montagneuses, qui rendent difficile une sylviculture pied à pied. C'est donc ce type de sylviculture qui sera retenu pour l'élaboration des scénarios sylvicoles de l'étude.

Selon ce mode de sylviculture, les interventions consistent en la création de trouées de petites dimensions (aux alentours de 1250 m^2). Les arbres sont le plus souvent laissés sur place et disposés en perpendiculaire de l'axe de plus grande pente. Cette opération permet notamment d'augmenter la rugosité du sol et de favoriser l'arrêt des blocs par les troncs.

- Quelle intensité d'intervention ?

Si les modalités d'intervention sont relativement bien décrites par le guide de sylviculture, la planification de la gestion nécessite de définir une intensité de trouée. Quelle surface doit être traitée à chaque intervention ?
Dans le cas des forêts de protection contre les chutes e blocs, cette intensité est fonction de deux facteurs principaux :

- L'exploitabilité physique. Celle-ci est fonction de la durée de vie en bonne santé du peuplement. Elle peut par exemple être fixée à 300 ans soit 1/3 de la surface régénérée en 100 ans.

- La structure du peuplement, qui doit garantir une efficacité satisfaisante.

Le forestier doit donc établir un compromis entre exploitabilité physique et efficacité de protection. Pour y parvenir, il faut d'abord pouvoir identifier les structures de peuplements permettant de garantir cette efficacité.

Une étude, menée en 2012 par Marion Pravin pour le compte du service des forêts et du paysage du canton du Valais (Suisse), porte sur la caractérisation d'une structure « idéale » pour une forêt à fonction de protection contre les chutes de blocs.
Cette étude met en évidence un « diamètre seuil », en dessous duquel les tiges ne sont plus significativement efficaces face aux blocs rocheux. Ce diamètre seuil est fonction de l'énergie des blocs. L'étude donne aussi des éléments pour déterminer la densité de tiges de diamètres supérieur ou égale au diamètre seuil nécessaire pour assurer une bonne protection. Cette densité minimale est fonction de différents paramètres.

Les résultats de cette étude ont été mobilisés pour ajuster les itinéraires sylvicoles et déterminer une intensité d'intervention adaptée selon les situations.
Pour simplifier la procédure, les rotations (durée entre deux interventions) sont supposées constantes et sont fixés à 25 ans.

- Comment positionner les trouées au sein du peuplement ?

Les trouées ne doivent pas être trop proches les unes des autres dans le sens de plus grande pente, afin d'éviter que les blocs ne reprennent trop d'énergie.
Elles sont placées en fonction de la carte des peuplements et des impacts physiques des blocs avant intervention (sortie du modèle RF3D).
Pour simplifier la procédure, la position des arbres avant trouée est gardée, leur diamètre est simplement ramené à 0 cm. Ces arbres grossissent alors en suivant l'accroissement trouvé ci-dessus.

- **Pas de prise en compte des perturbations majeures**

Sur une période de 100 ans, le risque qu'une perturbation importante (tempête, incendie, dépérissement majeur, etc…) intervienne sur les différentes forêts étudiées existe. Cependant, la probabilité d'occurrence de tels phénomènes à l'échelle locale reste très difficile à évaluer. Qui plus est, il serait également délicat de prévoir les dégâts causés aux peuplements. Ces dégâts sont en effets fonction de nombreux paramètres : intensité du phénomène, structure du peuplement, composition en essences… etc.
Comme dans le cadre du programme INTERREG, ces perturbations majeures ne seront donc pas prises en compte dans le calcul.

2.4.4 Nombre de modélisations

- **Simulations sans forêt**

Dans ce cas, une seule série de modélisations a été réalisée. Les valeurs obtenues seront en effet stables dans le temps. On effectue donc une modélisation pour chaque volume de départ. Dans le cas de Fontaine, on obtient donc 4 modélisations pour ce scénario.

- **Simulations avec forêt en évolution naturelle**

Pour rendre compte de l'évolution naturelle de la forêt, trois séries de modélisations sont effectuées :
- une simulation initiale (année n)
- une simulation à mi-parcours (année n + 50 ans)
- une simulation à l'état final (année n + 100 ans)

Puisque que chaque série est déclinée pour chaque volume de départ, on obtient pour Fontaine 12 modélisations pour ce scénario.

- **Simulations avec forêt gérée**

On réalise une série de simulations avant et après chaque intervention. Puisque la rotation est constante et fixée à 25 ans, on obtient 8 séries de modélisations, correspondant dans notre cas aux années suivantes : 2014, 2038, 2039, 2063, 2064, 2088, 2089, 2113. (La série de modélisation de 2013 a déjà été effectuée pour le scénario « forêt en évolution naturelle »). Pour Fontaine, on obtient 32 modélisations.

Au total, le site de Fontaine nécessite donc **48 modélisations Rockyfor3D.** Compte tenu du temps important que nécessite chaque modélisation, il s'agit d'un nombre particulièrement élevé. Les possibilités de réduire ce nombre de simulations seront un enjeu important pour la généralisation de la méthodologie à des échelles d'étude d'ordre territorial. Toutefois, la dernière version du logiciel Rockyfor3D a permis d'améliorer de manière extrêmement significative la vitesse de simulation. Ainsi, pour des sites de taille restreinte, le nombre élevé de simulation ne constitue pas forcément un obstacle.

2.5 Dimensionnement des ouvrages de génie civil

Avant de dimensionner les ouvrages de protection, leur positionnement exact a été répertorié sous SIG. Cette étape de positionnement a été réalisée en coopération avec les experts du service RTM de l'Isère.
Le dimensionnement des ouvrages de génie civil a ensuite été obtenu à partir des sorties Rockyfor3D. Les données de sorties utilisées permettent de caractériser l'énergie et la hauteur de passage des blocs au niveau de l'ouvrage. En fonction de ces valeurs, certains ajustements ont été opérés à dire d'expert pour mieux correspondre à la réalité de terrain.
Pour chaque scénario, le dimensionnement a été réalisé en prenant en compte l'effet de la forêt sur la réduction de l'énergie des blocs.
Les ouvrages de génie civil ont une efficacité technique égale à 100 %, c'est-à-dire que l'on fait l'hypothèse qu'aucun bloc ne franchira un ouvrage si celui-ci est bien dimensionné. Dans les faits, cette hypothèse serait discutable, mais ce choix a été retenu afin d'éviter de rendre les calculs encore plus complexes.

2.6 Inventaire et analyse des enjeux

Les enjeux pris en compte dans le calcul sont de trois types :

- les bâtiments
- les routes
- les voies ferrées.

Chaque type d'enjeu nécessite la récupération d'un certain nombre de variables, résumées dans les tableaux 6, 7 et 8 :

Tableau 6 : Variables liées aux enjeux de type « bâtiment »

Variables	Unités
Type (maison, bâtiment industriel…)	-
Estimation du nombre de personnes	Personnes / bâtiment
Proportion du bâtiment menacée	%
Estimation du taux d'occupation	%
Valeur du bâtiment	€

Tableau 7 : Variables liées aux enjeux de type « route »

Variables	Unités
Type de route (autoroute, nationale…)	-
Taux d'occupation moyen d'une voiture	Personnes / voiture
Taux d'occupation moyen d'un bus	Personnes / bus
Longueur du tronçon	m
Trafic auto journalier	Voitures / jour
Trafic bus journalier	Bus / jour
Vitesse moyenne	km/h

Tableau 8 : Variables liées aux enjeux de type « voie ferrée »

Variables	Unités
Taux d'occupation moyen d'un train	Personnes / train
Longueur moyenne d'un train	m
Coût de fermeture de la voie	€ / h
Longueur du tronçon menacée	m
Trafic journalier	Trains / jour
Vitesse	km / h

A partir de ces données, différents calculs sont effectués afin de déterminer la vulnérabilité associée à chaque enjeu.

NB : Ce système permet aussi de prendre en compte les enjeux de type « piéton isolé ». En effet, on peut caractériser un piéton selon des variables similaires à celles utilisées dans le cas d'enjeux de type « route ». Il suffit de fixer un nombre de personnes égal à 1, et d'ajuster les autres variables en conséquence (la vitesse, par exemple).

Pour Fontaine, l'enjeu unique est constitué par le lycée agricole. Les valeurs suivantes ont été retenues pour chacune des variables : Valeur : 2 500 000 €
Nombre de personnes : 225
Taux d'occupation : 20 %

2.7 Calcul économique

Une fois que l'ensemble des données nécessaires au calcul on été récupérées et que les itinéraires technique ont été définis, l'analyse économique peut être effectuée, selon les modalités qui ont été présentées précédemment.
La prochaine partie propose une présentation des principaux résultats, ainsi qu'une analyse de la sensibilité de certains paramètres du modèle.

3 Résultats de l'analyse coût-bénéfice appliquée à l'échelle locale

3.1 Notions d'efficacité

Au cours de l'analyse des résultats, deux notions d'efficacité différentes seront abordées. Il convient donc de bien les définir avant d'aborder la suite.

- **Efficacité brute**

L'efficacité brute correspond au rapport entre les dommages évités actualisés du scénario i par rapport au scénario témoin (sans ouvrages et sans forêt) :

$$Efficacité_{brute} = 1 - \frac{Cdommages_{scénarioi}}{Cdommages_{Témoin}}$$

Cette efficacité ne prend donc pas en compte les coûts d'installation et d'entretien des ouvrages, ni les coûts de gestion forestière.

- **Efficacité nette**

L'efficacité nette correspond au rapport entre l'ensemble des coûts actualisés du scénario i par rapport au scénario témoin :

$$Efficacité_{nette} = 1 - \frac{(Cdommages + Centretien + Cgestion)_{scénarioi}}{Cdommages_{Témoin}}$$

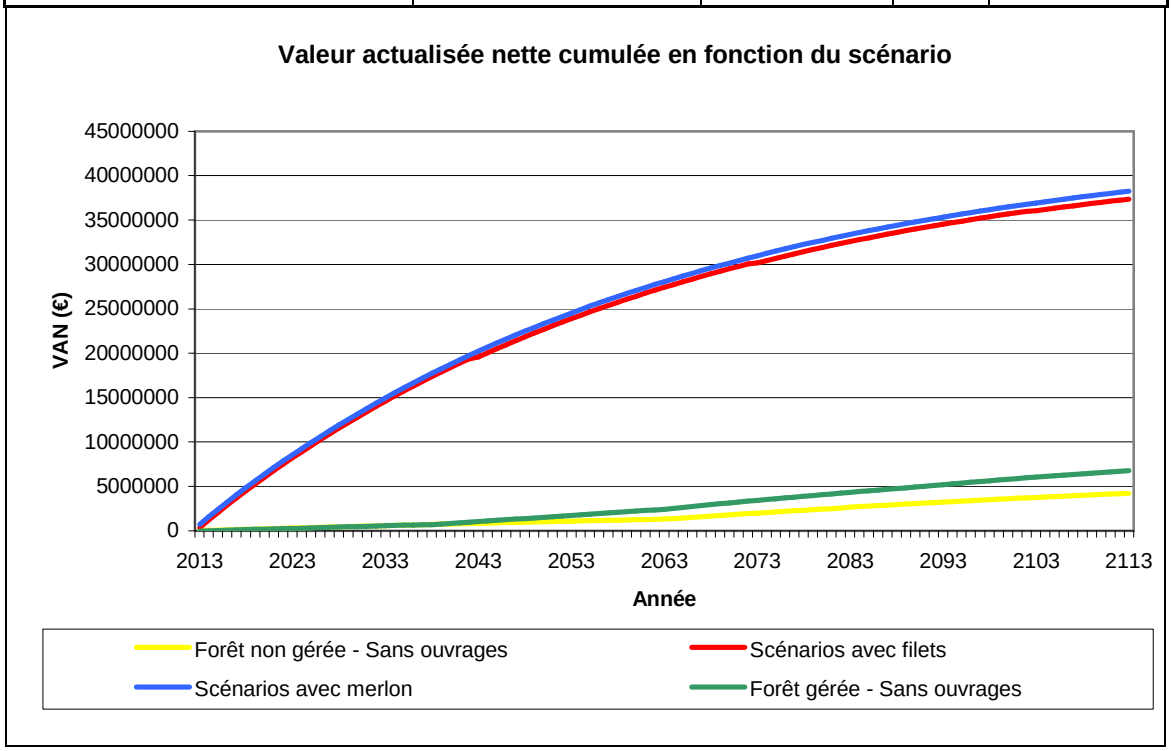
Il s'agit donc de l'efficacité économique réelle du scénario étudié.

3.2 Résultats bruts

Les résultats de l'analyse coût-bénéfice sur le site de Fontaine ont été classés selon leur valeur actualisée nette. Les résultats sont résumés ci-dessous :

Tableau 9 : Résultats bruts et interprétation graphique de l'analyse coût – bénéfice, site de Fontaine.

Scénario	Coûts actualisés (€)	VAN (€)	Rang	Efficacité nette
Forêt non gérée - Avec merlon	160638	38242321	1	99.6%
Sans forêt - Avec merlon	162678	38240281	2	99.6%
Forêt gérée - Avec merlon	343451	38059508	3	99.1%
Forêt non gérée - Avec filets	1046207	37356752	4	97.3%
Sans forêt - Avec filets	1047546	37355413	5	97.3%
Forêt gérée - Avec filets	1229021	37173938	6	96.8%
Forêt gérée - Sans ouvrages	31637041	6765917	7	17.7%
Forêt non gérée - Sans ouvrages	34202368	4200590	8	10.9%
Témoin	38402959	0	9	0%



- **Des valeurs de dégât très importantes**

Les dommages maximaux attendus sur les enjeux, exprimés par le témoin, correspondent au scénario « sans forêt et sans ouvrages ». On remarque qu'ils sont extrêmement important : de l'ordre de 38 millions d'euros sur 100 ans. Ces résultats peuvent s'expliquer par la grande importance des enjeux considérés. En effet, compte tenu des hypothèses de calcul utilisées, la valeur de l'enjeu à un instant t est égale à 27 500 000 €, comprenant la valeur du bâtiment et le nombre de vies humaines menacées.

- **Un net avantage pour les scénarios « génie civil »**

Les scénarios comprenant des ouvrages de génie civil sont très nettement supérieurs aux scénarios uniquement forestiers, avec des valeurs d'efficacité nette de l'ordre de 98 %. Cette grande différence est bien exprimée par le graphique des VAN cumulées.
On distingue un léger avantage pour les aménagements de type merlon par rapport aux aménagements avec filets. Cette différence s'explique par les coûts d'installation et d'entretien des merlons, qui sont ici bien inférieurs aux coûts des filets pare-blocs. En effet, les niveaux d'énergie obtenus sont élevés, et entraînent un fort surcoût dans le cas de filets. Néanmoins, les fortes valeurs d'enjeux tendent à atténuer ces différences. Les coûts liés aux dommages sont en effet très supérieurs aux coûts d'installations et d'entretien.

- **Gain d'efficacité lié à la gestion forestière**

On remarque que la gestion forestière apporte un gain d'efficacité nette de l'ordre de 7 % par rapport au scénario où la forêt n'est pas gérée. Même si ce gain d'efficacité reste relativement faible, cela représente environ 2 487 112 € de coûts évités supplémentaires par rapport au scénario « forêt non gérée », toujours en raison d'enjeux importants.
Cependant, ce gain d'efficacité ne permet pas de limiter le dimensionnement et les coûts d'entretien des ouvrages (fréquences de purge des filets par exemple) par rapport au scénario « forêt non gérée ». Cela peut notamment s'expliquer par le volume de référence qui reste élevé au regard de l'efficacité de la forêt face aux chutes de blocs. Dans des scénarios basés sur la complémentarité gestion forestière – génie civil, le coût de la gestion n'est donc pas amorti.
Par contre, la forêt sans gestion est intéressante dans le cadre d'une complémentarité avec le génie civil, puisqu'elle permet de limiter les coûts d'entretien et de purge, sans aucun investissement et par sa seule présence.

- **Des enjeux et des volumes de départ trop importants pour justifier économiquement la gestion forestière.**

Au regard des résultats, on constate que l'importance du risque nécessite une intervention sous forme de génie civil. Les merlons semblent la solution idéale en raison de leur rapport coût-efficacité excellent.
En cas de complément avec des ouvrages de génie civil, les coûts de gestion forestière ne sont pas amortis par le gain d'efficacité, et la meilleure solution serait donc de laisser la forêt évoluer naturellement, pour limiter les coûts d'entretien sur le merlon.

3.3 Comparaison avec les résultats du programme INTERREG

La comparaison des résultats de la présente étude avec ceux de l'analyse économique effectuée sur le même site dans le cadre du programme INTERREG met en évidence des différences importantes concernant plusieurs points de l'analyse.

- **Au niveau des dommages sur les enjeux**

Les dommages maximaux attendus selon l'étude INTERREG s'élèvent à 476 273 €. Ce montant ne représente donc qu'environ 1 % de la valeur obtenue par la présente étude. Comment expliquer une telle différence ? Plusieurs points peuvent apporter des éléments de réponses :

- Les délimitations du site d'étude ne sont pas les mêmes. Ainsi, notre analyse se base sur trois barres rocheuses différentes contre une seule dans le cadre du l'étude INTERREG. Il y a donc potentiellement plus de blocs qui sont libérés et qui peuvent atteindre les enjeux.

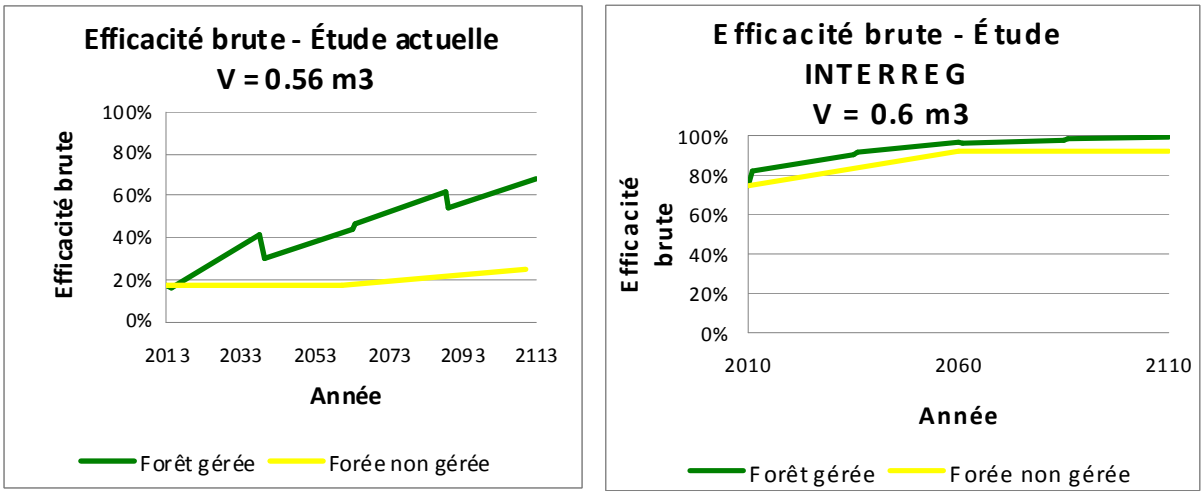
- Les volumes pris en compte sont plus importants et représentent une plage de valeurs plus large. Nous avons en effet considéré 4 volumes de départ, couvrant des valeurs allant de 0,28 m^3 à plus de 10 m^3. Ici encore, les fréquences de départ sont donc plus élevées, et cela se répercute sur la fréquence d'atteinte sur les enjeux. De plus, les plus gros volumes ont une probabilité de propagation dans le versant bien plus forte, et causent plus de dégâts (la vulnérabilité des bâtiments associée à ces volumes est plus grande).

- Les données de base sont différentes. C'est le cas par exemple du modèle numérique de terrain, et de l'ensemble des relevés (données sylvicoles, topographiques…). Or on sait que le modèle Rockyfor3D est très sensible à bon nombre de ces variables. C'est le cas par exemple des données de rugosité, pour lesquelles la détermination précise sur le terrain reste délicate.

- **Au niveau de l'efficacité brute de la forêt**

Même en considérant des volumes de départ comparables (0,56 m^3 contre 0.6 m^3), les efficacités brutes obtenues tant pour le scénario « forêt gérée » que pour le scénario « forêt non gérée » diffèrent fortement. La figure 10 présente pour chaque étude l'évolution de l'efficacité brute pour une forêt gérée ou non gérée :

Figure 10 : Comparaison des efficacités brutes de la forêt, Etude actuelle / Etude INTERREG



Les efficacités observées dans la présente étude sont bien inférieures à celles obtenues par l'étude INTERREG.

L'analyse des relevés concernant les peuplements forestiers contenus dans la zone commune aux deux études n'a pas permis de distinguer de différences significatives. Les résultats concernant notamment les densités et les diamètres moyens restent comparables. Les « fichiers arbres » issus du modèle de simulation adapté aux peuplements de taillis respectent bien les valeurs dendrométriques inventoriées, seule la répartition des tiges dans l'espace varie logiquement.

De plus, il est peu probable que ces différences d'efficacité soient imputables aux peuplements situés hors de la zone d'étude INTERREG. Les hétérogénéités observées entre les peuplements sur le site de Fontaine ne semblent pas assez importantes pour justifier un tel résultat.

Les différences observées seraient donc davantage liées aux variables topographiques qu'aux variables forestières. En raison de contraintes de temps, l'analyse de ces différences n'a pas permis de valider cette hypothèse, mais il serait intéressant de la poursuivre ultérieurement.

3.4 Sensibilité du modèle économique

La comparaison des résultats des deux études met en lumière tout l'intérêt de réaliser une étude de sensibilité du modèle par rapport à ses principaux paramètres.
La complexité de la méthodologie rend difficile l'analyse de sensibilité pour certains paramètres liés à l'analyse technique. Cela implique en effet de réitérer l'ensemble des modélisations Rockyfor3D.
L'analyse présentée ici ne porte donc que sur des paramètres qui peuvent être aisément modulés.

3.4.1 Valeur de la vie humaine

Le tableau 10 présente la variation de la valeur actualisée nette de chaque scénario en fonction de la valeur de la vie humaine.

Tableau 10 : Variation des VAN en fonction de la valeur de la vie humaine

Valeur de la vie humaine	500 000 €		1 000 000 € (Vréf)	1 500 000 €		2 000 000 €	
Scénario	Variation VAN	Rang	Rang	Variation VAN	Rang	Variation	Rang
Forêt non gérée - Avec merlon	-39%	1	1	39%	1	79%	1
Sans forêt - Avec merlon	-39%	2	2	39%	2	79%	2
Forêt gérée - Avec merlon	-40%	3	3	39%	3	79%	3
Forêt non gérée - Avec filets	-40%	4	4	40%	4	80%	4
Sans forêt - Avec filets	-40%	5	5	40%	5	80%	5
Forêt gérée - Avec filets	-40%	6	6	40%	6	81%	6
Forêt gérée - Sans ouvrages	-40%	7	7	40%	7	80%	7
Forêt non gérée - Sans ouvrages	-39%	8	8	39%	8	78%	8

La lecture des résultats obtenus permet de constater que la variation de la VAN est stable, quelque soit le scénario.

On remarque de plus que les valeurs des VAN évoluent moins rapidement que la valeur de la vie humaine. Par exemple, pour une valeur de 500 000 €, c'est-à-dire une variation de – 50 % de la valeur de la vie humaine, les VAN de chaque scénario décroissent de 40 %. Ce résultat s'explique par l'influence d'un certains nombre de paramètres tels que la létalité et la vulnérabilité du bâtiment. Leurs valeurs étant inférieures à 1, à chaque fois qu'un bloc atteint le bâtiment, les vies humaines ne sont pas complètement détruites.

Enfin, la variation de valeur de la vie humaine de 500 000 € à 2 000 000 € ne suffit pas à changer le rang des scénarios. Cela montre que dans le cas de Fontaine, le modèle possède une bonne robustesse vis-à-vis de ce paramètre, en termes de choix de gestion. Cependant, les valeurs actualisées nettes évoluent fortement, et le choix de la valeur de la vie humaine reste un paramètre à fixer avec précaution.

3.4.2 Taux d'actualisation

Tableau 11 : Variation de la VAN en fonction du taux d'actualisation

Taux d'actualisation	0.50%		2% (Vréf)	3.50%		5.50%	
Scénario	Variation VAN	Rang	Rang	Variation VAN	Rang	Variation	Rang
Forêt non gérée - Avec merlon	80.7%	1	1	-35.2%	1	-56.9%	1
Sans forêt - Avec merlon	80.7%	2	2	-35.2%	2	-56.9%	2
Forêt gérée - Avec merlon	80.8%	3	3	-35.2%	3	-57.0%	3
Forêt non gérée - Avec filets	80.9%	4	4	-35.3%	4	-52.2%	4
Sans forêt - Avec filets	80.9%	5	5	-35.3%	5	-57.2%	5
Forêt gérée - Avec filets	81.0%	6	6	-35.3%	6	-57.3%	6
Forêt gérée - Sans ouvrages	154.7%	7	7	-54.5%	7	-80.0%	7
Forêt non gérée - Sans ouvrages	154.5%	8	8	-53.4%	8	-77.8%	8

Comme pour la valeur de la vie humaine, la variation du taux d'actualisation ne fait pas apparaître de différence de classement des scénarios, tout en faisant varier fortement les valeurs actualisées nettes.

Par contre, on remarque que les scénarios ne faisant pas appel aux ouvrages de génie civil sont plus sensibles à la variation du taux d'actualisation. Ce résultat est du à l'efficacité comparée entre les ouvrages et la forêt. Puisque les ouvrages ont une efficacité égale à 100 % par hypothèse, il n'y a donc plus aucun dommage causé aux enjeux lorsque ceux-ci sont installés. La forêt ne possède pas une telle efficacité, donc les dommages causés aux enjeux pèsent chaque année sur la valeur actualisée nette.

En réalité, les VAN associées aux scénarios « avec ouvrages » évoluent elle aussi, en raison des coûts d'entretien. Cependant, compte tenu de la très forte valeur des enjeux, ces évolutions restent peu significatives. Par exemple, on remarque en moyenne une différence de 0,1 % de variation entre les scénarios avec merlon et les scénarios avec filets, en raison de coûts d'entretien différents.

Pour le site de Fontaine, le modèle se montre donc également robuste vis-à-vis du taux d'actualisation en ce qui concerne les classements des scénarios.

3.4.3 Vulnérabilité du bâtiment

Cette grandeur est plus délicate à analyser que les paramètres précédents. En effet, celle-ci dépend du volume considéré : plus le volume est important, plus la vulnérabilité de l'enjeu face au bloc est élevée. Concrètement, il s'agit d'un coefficient compris entre 0 et 1 que l'on applique à la valeur de l'enjeu.

Puisque la forêt n'a pas la même efficacité selon le volume pris en compte, l'analyse de la sensibilité du modèle par rapport à la vulnérabilité sera effectuée en deux parties :

- Sensibilité liée au volume de référence (10 m^3)
- Sensibilité liée au volume le plus faible (0,56m^3)

Les résultats sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau 12 : Variation de la VAN en fonction de la vulnérabilité de l'enjeu face à V = 0,56 m^3

	V = 0.56 m^3				
Vulnérabilité	**0**		**0.5 (Vréf)**	**1**	
Scénario	**Rang**	**Variation VAN**	**Rang**	**Rang**	**Variation VAN**
Forêt non gérée - Avec merlon	1	-8%	1	1	8%
Sans forêt - Avec merlon	2	-8%	2	2	8%
Forêt gérée - Avec merlon	3	-8%	3	3	8%
Forêt non gérée - Avec filets	4	-8%	4	4	8%
Sans forêt - Avecfilets	5	-8%	5	5	8%
Forêt gérée - Avec filets	6	-8%	6	6	8%
Forêt gérée - Sans ouvrages	7	**-23%**	7	7	**23%**
Forêt non gérée- Sans ouvrages	8	**-15%**	8	8	**15%**

Tableau 13 : Variation de la VAN en fonction de la vulnérabilité de l'enjeu face à V = 10 m^3

	V = 10 m^3				
Vulnérabilité	**0**		**0.5**	**1 (Vréf)**	
Scénario	**Rang**	**Variation VAN**	**Rang**	**Rang**	**Variation VAN**
Forêt non gérée - Avec merlon	1	-6%	1	1	6%
Sans forêt - Avec merlon	2	-6%	2	2	6%
Forêt gérée - Avec merlon	3	-6%	3	3	6%
Forêt non gérée - Avec filets	4	-7%	4	4	7%
Sans forêt - Avecfilets	5	-7%	5	5	7%
Forêt gérée - Avec filets	6	-7%	6	6	7%
Forêt gérée - Sans ouvrages	7	**0%**	7	7	**0%**
Forêt non gérée- Sans ouvrages	8	**0%**	8	8	**0%**

Ici aussi, le classement des scénarios reste stable, quelle que soit la vulnérabilité retenue.
Plus la vulnérabilité est élevée, plus la VAN augmente. Les dégâts observés sont en effet plus importants.
On remarque cette fois-ci que les VAN évoluent peu par rapport aux exemples précédents. Ceci est du au fait que l'on ne fait varier qu'une vulnérabilité à la fois. Il y a en tout 4 volumes de départs, donc 4 vulnérabilités différentes.
De plus, le modèle réagit différemment selon le volume considéré et selon le type de scénario :

- Concernant les scénarios comportant des ouvrages, leur sensibilité est légèrement inférieure pour le volume 10 m^3 que pour le volume 0,56 m^3. Ceci s'explique par le fait que les blocs de grosses dimensions ont une fréquence de départ moins élevée. Les dommages causés aux enjeux évoluent donc moins franchement. Cette différence de fréquence de départ n'est pas compensée par les probabilités de propagation, qui sont pourtant nettement supérieures dans le cas de gros volumes.
- Concernant les scénarios forestiers, leur sensibilité est très dépendante du volume considéré. Ainsi, la VAN varie de plus ou moins 18 % pour un volume de 0,56 m^3, alors que son évolution est négligeable pour le volume 10 m^3. Ceci traduit la différence d'efficacité de la forêt face à ces deux volumes. On remarque enfin que l'évolution de la VAN de la forêt gérée est plus nette. Ceci est du au gain d'efficacité lié à la gestion.

La sensibilité du modèle économique par rapport à la vulnérabilité du bâtiment est donc complexe à analyser. En effet, celle-ci dépend à la fois des volumes pris en compte, de leurs fréquences de départ respectives, et de l'efficacité de la forêt. Rappelons que nous n'avons fait varier qu'une vulnérabilité à la fois, ce qui atténue les variations de la VAN. En réalité, le modèle reste donc très sensible à ce paramètre.

3.4.4 Fréquence de départ

L'influence des fréquences de départ a été réalisée selon la même logique que la vulnérabilité. La plage de variation utilisée correspond à une puissance de 10. En effet, les données que l'on trouve dans la bibliographie permettent d'affirmer que les résultats de la formule peuvent être estimés à ce niveau de confiance (Hantz et al. 2013).

Tableau 14 : Variation de la VAN en fonction de la fréquence de départ associée à V = 0,56 m^3

	Vmax = 0.56 m3				
Fréquence de départ	**0.015**		**0.146 (Vréf)**	**1.15**	
Scénario	**Rang**	**Variation VAN**	**Rang**	**Rang**	**Variation VAN**
Forêt non gérée - Avec merlon	1	-7%	1	1	56%
Sans forêt - Avec merlon	2	-7%	2	2	56%
Forêt gérée - Avec merlon	3	-7%	3	3	57%
Forêt non gérée - Avec filets	4	-7%	4	4	58%
Sans forêt - Avec filets	5	-7%	5	5	58%
Forêt gérée - Avec filets	6	-7%	6	6	58%
Forêt gérée - Sans ouvrages	7	**-21%**	7	7	**166%**
Forêt non gérée- Sans ouvrages	8	**-13%**	8	8	**105%**

Tableau 15 : Variaition de la VAN en fonction de la fréquence de départ associée à V = 10 m^3

	Vmax = 10 m3				
Fréquence de départ	**0.001**		**0.01 (Vréf)**	**0.1**	
Scénario	**Rang**	**Variation VAN**	**Rang**	**Rang**	**Variation VAN**
Forêt non gérée - Avec merlon	1	-11%	1	1	109%
Sans forêt - Avec merlon	2	-11%	2	2	109%
Forêt gérée - Avec merlon	3	-11%	3	3	110%
Forêt non gérée - Avec filets	4	-11%	4	4	112%
Sans forêt - Avec filets	5	-11%	5	5	112%
Forêt gérée - Avec filets	6	-11%	6	6	112%
Forêt gérée - Sans ouvrages	7	**0%**	7	7	**-4%**
Forêt non gérée- Sans ouvrages	8	**0%**	8	8	**3%**

On constate que la sensibilité du modèle par rapport à ce paramètre est très élevée, quel que soit le volume considéré. D'autant plus que ces valeurs sont atténuées ici aussi par la pris en compte d'une seule fréquence de départ à la fois.
Les variations de VAN sont deux fois plus importantes pour le volume 10 m^3. La vulnérabilité des enjeux face aux gros volumes est plus élevée, et les probabilités de propagation de ces blocs sont proches de 1. Ce résultat est donc logique.
Ici aussi, la forêt réagit très différemment selon le volume considéré. La VAN est multipliée par 3,5 dans le cas de la forêt gérée pour un volume de 0,56 m3. En revanche, la VAN diminue légèrement pour le volume 10 m3. Une fois encore, ces tableaux mettent en avant les différences importantes d'efficacité de la forêt selon le volume.

Compte tenu des incertitudes importantes dans la définition des fréquences de départ, la forte sensibilité du modèle face à ce paramètre peut être problématique. En effet, les valeurs actualisées nettes peuvent varier énormément. Il est ainsi difficile d'interpréter la fiabilité des coûts obtenus.
Même si le classement des scénarios reste identique, il se peut qu'en d'autres occasions cela soit préjudiciable.

Pour les quatre paramètres étudiés, les résultats montrent une grande sensibilité du modèle. Les valeurs actualisées nettes varient ainsi fortement selon les valeurs associées à ces paramètres.
Pour autant, l'analyse de sensibilité n'a pas montré d'influence en ce qui concerne les classements des scénarios.
Les principales raisons de cette stabilité sont une valeur d'enjeu et des volumes de départ très importants. Dans ce contexte, il semble difficile de pouvoir justifier la mise en place d'une gestion forestière à but de protection contre les chutes de blocs.
D'un point de vue strictement économique, les résultats vont dans le sens d'une complémentarité entre un ouvrage de type merlon et une forêt non gérée.

Il faut néanmoins se souvenir des hypothèses de calcul retenues : le modèle ne prend par exemple pas en compte les perturbations exceptionnelles, qui auraient plus d'impacts dans le cas d'une forêt non gérée. De même, la possibilité d'exploiter les bois à des fins commerciales n'a pas été envisagée. Or, la vente des bois serait un moyen efficace de rentabiliser la gestion forestière, et aurait pour conséquence d'augmenter significativement la valeur actualisée nette associée aux projets faisant appel à la gestion.

3.5 Résultats en fonction des volumes de départ et de la valeur de l'enjeu.

Bien que les résultats obtenus en termes de classement semblent fiables pour le site de Fontaine, qu'en serait-il si les valeurs d'enjeu et les volumes de départ étaient différents ?
Il semble nécessaire d'adapter ces variables pour étudier convenablement les rôles de la forêt et sa place par rapport aux autres stratégies de protection.

Pour simplifier la procédure, l'influence de la valeur de l'enjeu ne sera évaluée que pour des volumes adaptés aux capacités de la forêt. Il convient donc d'abord de définir le volume maximal à prendre en compte dans l'analyse.

3.5.1 Efficacité nette de la forêt en fonction du volume maximal de départ

Pour étudier l'influence du volume maximal de départ sur l'efficacité de la forêt, l'analyse coût-bénéfice a été divisée en 4 niveaux. Chaque niveau représente un volume maximal différent.

Tableau 16 : Efficacité nette de la forêt en fonction de Vmax

Scénario	Volume maximal pris en compte			
	10 m^3	3,33 m^3	1.11 m^3	0,56 m^3
Forêt non gérée	11%	12%	27%	20%
Forêt gérée	18%	20%	46%	46%
Gain d'efficacité lié à la gestion	7%	8%	18%	25%

Ces valeurs font apparaître un seuil d'efficacité entre le volume 1,11 m^3 et le volume 3,33 m^3. En effet, entre ces deux volumes, la forêt a doublé d'efficacité, avec ou sans gestion.
De même, le gain d'efficacité lié à la gestion forestière augmente significativement au niveau de ce seuil.
Par contre, le volume 0,56 m3 n'apporte pas de surplus d'efficacité significatif. Lorsqu'elle n'est pas gérée, la forêt est même moins performante pour ce volume. Il est probable que ce résultat soit lié à une densité de tiges trop faible. En effet, les interventions sylvicoles permettent de maintenir des niveaux de densité plus élevés que lorsque le peuplement évolue naturellement. En cas de petits volumes, le peuplement géré constitue donc une meilleure « barrière » contre les blocs, même si les

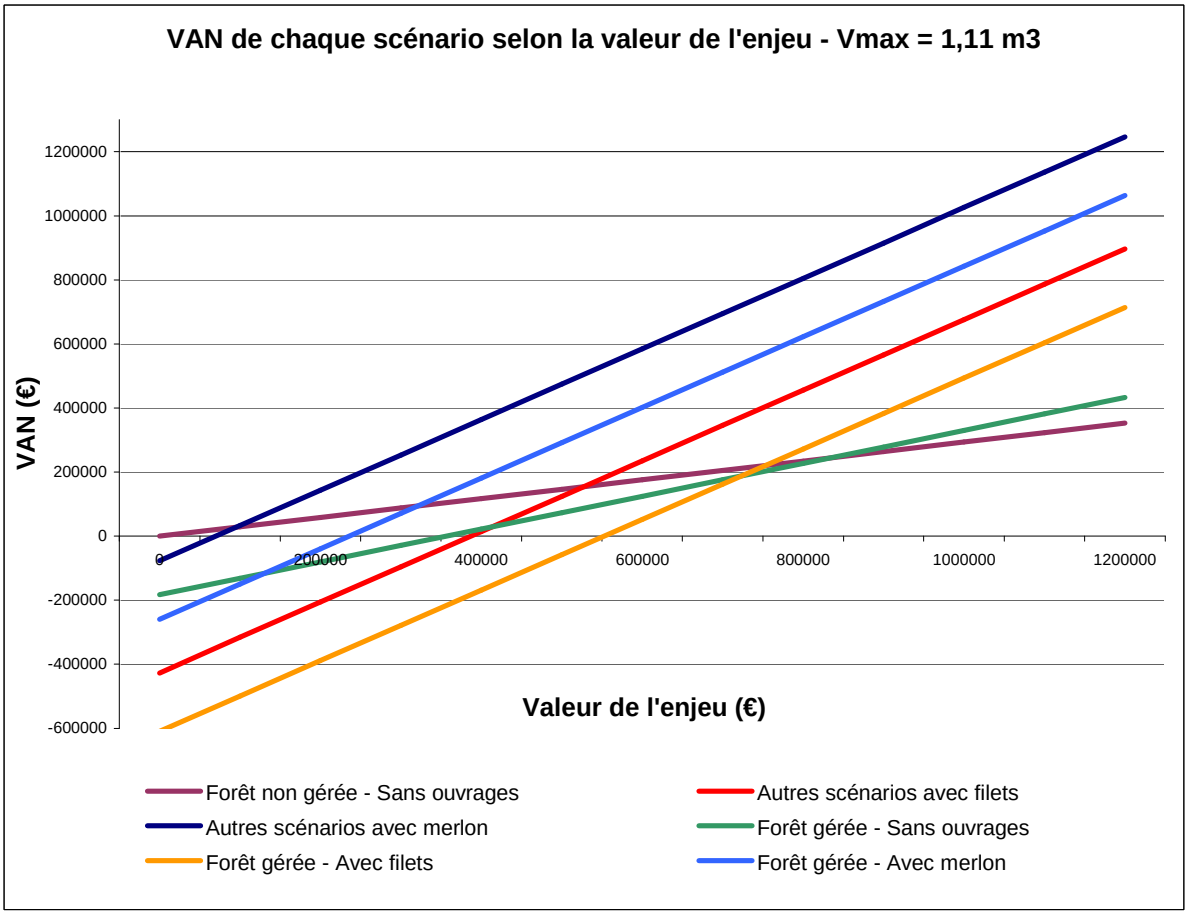
diamètres moyens peuvent être plus faibles. En effet, plus les volumes sont petits, moins le diamètre a besoin d'être important pour résister aux impacts.
Compte tenu de ces résultats, nous utiliserons donc un volume de départ maximal de 1,11 m^3 pour étudier l'influence de la valeur de l'enjeu sur le modèle économique.

3.5.2 Influence de la valeur de l'enjeu

A partir d'un modèle économique basé sur un volume maximal de départ de 1,11 m^3, les valeurs actualisées nettes de chaque scénario on été calculées pour une valeur d'enjeu allant de 0 à 1 200 000 €. Les ouvrages de génie civil ont été redimensionnés pour tenir compte de la différence de volume. Ils représentent donc un coût bien moins important que ceux utilisés pour un volume de 10 m^3.
Pour simplifier l'analyse et la lecture des résultats, les scénarios « sans forêt avec ouvrages » ont été regroupés avec les scénarios « forêt non gérée avec ouvrages ». Les valeurs obtenues sont en effet très proches, avec un léger avantage pour les scénarios intégrant la forêt.

Le comportement du modèle est décrit par la figure 11 :

Figure 11 : Evolution de la VAN en fonction de la valeur de l'enjeu – Vmax = 1,11 m^3



Ce graphique montre que les VAN suivent une progression linéaire en fonction de la valeur de l'enjeu. Ces données permettent de confirmer que plus la valeur d'enjeu augmente, moins les scénarios forestiers sont intéressants économiquement, car les pentes associées à leurs courbes sont moins élevées que celles des scénarios avec génie civil.

Compte tenu des paramètres retenus dans le modèle économique, la forêt gérée ne peut pas être le meilleur scénario, quelque soit la valeur de l'enjeu. En effet, la courbe associée à la forêt gérée seule n'obtient jamais la VAN la plus élevée.

En revanche, la forêt non gérée peut être le scénario retenu, lorsque les enjeux sont faibles (inférieur à 300 000 €). Dans de telles circonstances, les dégâts sur les enjeux ne suffisent pas à justifier une intervention, qu'elle soit en génie civil ou en gestion forestière. Elle reste plus efficace que les filets jusqu'à une valeur d'enjeu de 600 000 €.

Ici aussi, on remarque que la complémentarité en gestion forestière et génie civil n'est pas judicieuse. Ces scénarios sont en effet moins bien classés que les autres scénarios avec génie civil. Ce constat est valable quelque soit la valeur de l'enjeu.

Enfin, le gain d'efficacité nette lié à la gestion forestière ne devient intéressant que pour une valeur d'enjeu minimum, égale à environs 900 000 € pour le cas présent (lorsque la VAN de la forêt gérée devient supérieure à celle de la forêt non gérée). Les dommages sur les enjeux doivent en effet avoir une importance suffisante pour amortir les coûts de gestion.

Malgré un volume maximal de départ plus faible, la meilleure stratégie d'intervention reste donc le merlon, accompagné de la forêt non gérée.

3.5.3 Analyse paramétrique

Il est possible de donner une réalité physique aux paramètres des fonctions affines qui représentent chaque scénario :

- **L'ordonnée à l'origine représente la somme des coûts actualisés de chaque scénario**

Pour une valeur d'enjeu nulle, la VAN est égale aux coûts actualisés d'installation, d'entretien et de gestion. Ce résultat se retrouve sur le graphique et correspond à l'ordonnée à l'origine.

On remarque ainsi que les coûts de gestion forestière sont supérieurs aux coûts d'installation et d'entretien d'un merlon. Par contre, la gestion reste moins coûteuse que les filets pare-blocs.
Dans le cas présent, le coût de la gestion forestière est estimé à **85 €/ha/an**. Puisqu'elle est appliquée sur une zone de 50 ha, l'annuité correspondante s'élève à 4250 €/an.
En comparaison, l'annuité liée à un merlon accompagné d'une forêt non gérée est égale à : 1787 €/an.

- **La pente représente l'efficacité brute de chaque scénario**

Les dommages causés à l'enjeu sont proportionnels à la valeur de celui-ci. Ceci explique la progression linéaire des courbes observées sur le graphique.
Pour un scénario donné, dans le cas où l'ensemble des dommages sont épargnés, la pente de la courbe atteint un maximum. Autrement dit, l'efficacité brute de ce scénario atteint 100 %.

Par hypothèse, cette efficacité brute de 100 % est atteinte par tous les scénarios comprenant des ouvrages de génie civil (puisque aucun bloc ne peut les franchir). C'est pourquoi les pentes associées à leurs courbes sont égales, et représentent un maximum.

Dans le cas présent, on peut donc remarquer que la gestion forestière seule ne pourra jamais être plus rentable qu'un merlon, même pour une efficacité brute égale à 100 %, et quelle que soit la valeur de l'enjeu. Ceci est du à des coûts de gestion supérieurs aux coûts d'installation et d'entretien du merlon.

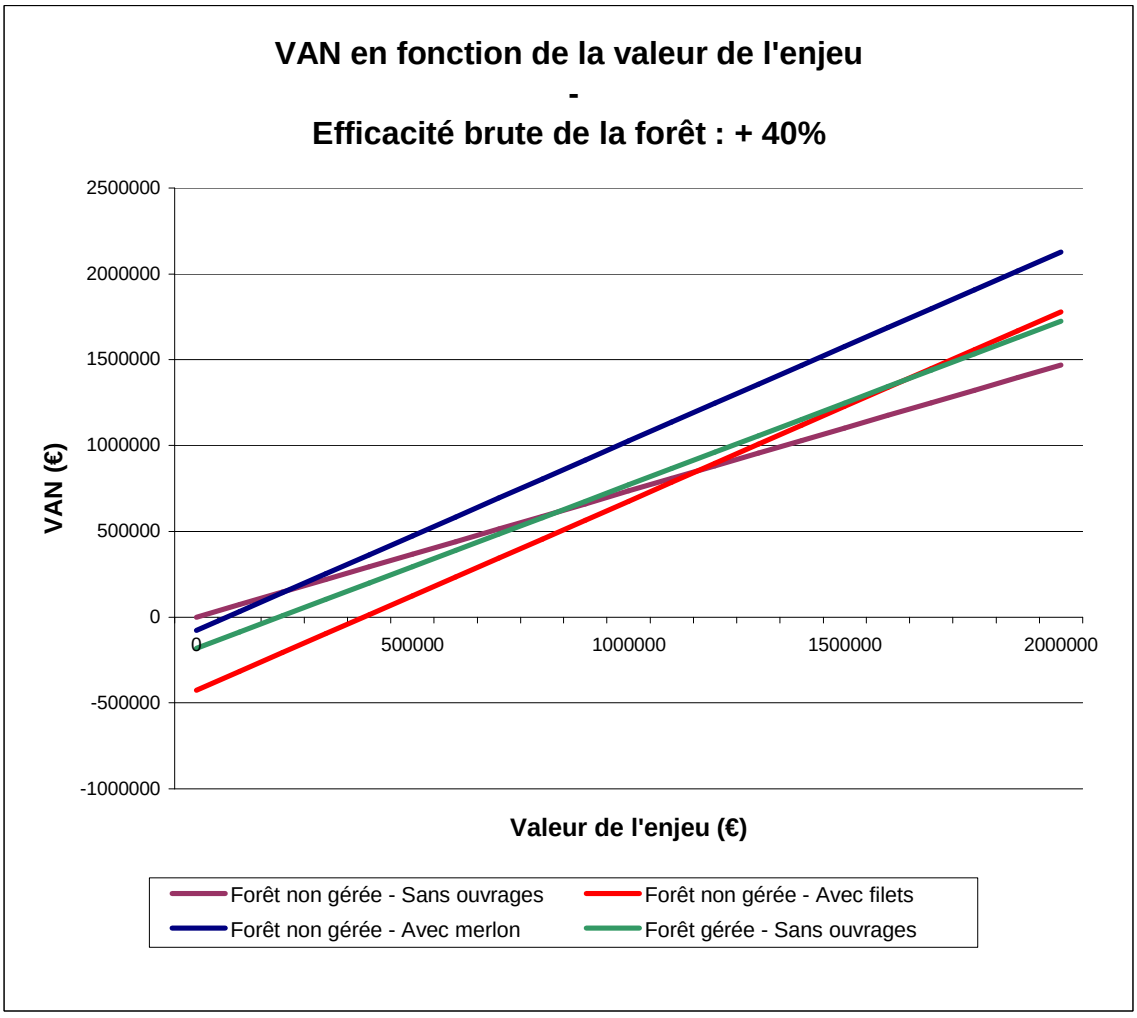
3.5.4 Influence de l'efficacité brute de la forêt

L'analyse effectuée précédemment montre toute l'importance de l'efficacité brute de la forêt sur les résultats obtenus. Pour quantifier plus précisément son influence, cette efficacité a été modulée. Les résultats présentés ici correspondent à une augmentation de 40 % de sa valeur :

Tableau 17 : Majoration de l'efficacité brute de la forêt de 40 %

	Scénario d'origine	+ 40 %
Forêt gérée	46%	86%
Forêt non gérée	27%	67%

Figure 12 : Évolution de la VAN en fonction de la valeur de l'enjeu – Efficacité de la forêt + 40%



Les efficacités brutes obtenues sont cette fois-ci comparables à celles de l'étude INTERREG.

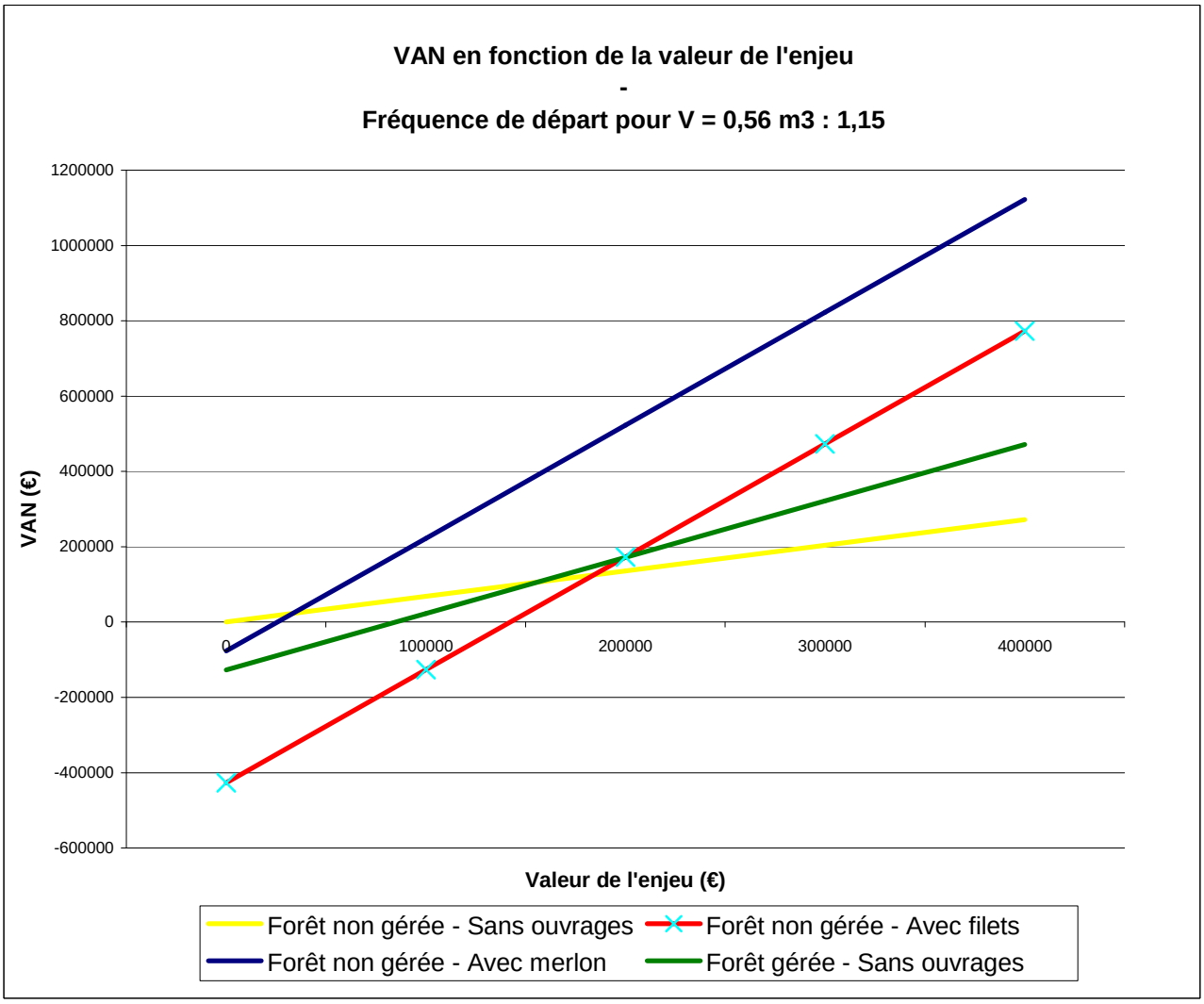
Selon cette configuration, la seule forêt gérée peut être plus rentable qu'un filet pare-blocs, mais reste moins performante qu'un merlon.
En cas d'impossibilité technique de mettre en place un merlon, la forêt gérée deviendrait le meilleur scénario pour des valeurs d'enjeu allant de 800 000 € à 1 500 000 €. Notons par ailleurs que la différence d'efficacité entre la forêt gérée et la forêt non gérée est maintenue. Si l'on augmentait ce gain d'efficacité, la forêt gérée pourrait occuper une plus large gamme de valeurs d'enjeu.

L'influence de l'efficacité brute de la forêt est donc déterminante dans le classement des scénarios. La variation de 40 % appliquée semble importante, mais la comparaison avec les résultats de l'étude INTERREG montre l'intérêt d'évaluer cette valeur avec précaution.

3.5.5 Influence de la fréquence de départ

Nous avons vu que la sensibilité du modèle par rapport à la fréquence de départ était particulièrement élevée. Dans le cas où tous les volumes sont pris en compte, et que la valeur de l'enjeu est élevée, cette sensibilité n'a pas d'influence sur les classements des scénarios.
Le graphique suivant illustre cette sensibilité dans le cas où le volume maximal est égal 1,11 m^3. Seule la fréquence de départ des blocs de 0,56 m^3 a été modifiée pour atteindre la borne maximale de la plage d'incertitude. L'efficacité brute de la forêt correspond à la valeur d'origine, issue de la présente étude.

Figure 13 : Evolution de la Van en fonction de la valeur de l'enjeu pour un fréquence de départ associée au volume 0,56 m3 égale à 1,15



Ces résultats confirment la sensibilité du modèle vis-vis-à-vis des fréquences de départ. Ainsi, le classement des scénarios peut évoluer en fonction de la détermination de cette valeur.
Dans ce cas, la forêt gérée peut être plus rentable qu'un filet pare-blocs. On rejoint donc les résultats obtenus en faisant varier l'efficacité brute. Cependant, ce résultat n'est obtenu que pour une plage de valeurs d'enjeu très restreinte, située entre 150 000 et 200 000 €.

3.5.6 Extrapolation à un enjeu de type linéaire

Compte tenu des résultats précédents, la gestion forestière ne peut atteindre une rentabilité supérieure à celle d'un merlon quelle que soit la valeur de l'enjeu. Si l'on admet une efficacité supérieure à celle obtenue dans le cadre de cette étude, elle peut dans certaines conditions être plus avantageuse qu'un filet pare-bloc. Ce résultat repose sur des coûts de gestion supérieurs à ceux engendrés par un merlon.

Pour se placer dans une situation où la gestion forestière serait justifiée, il existe donc deux possibilités :

- On diminue les coûts liés à la gestion forestière.
- On augmente les coûts des ouvrages de protection.

- **Diminution des coûts de gestion forestière**

Cette diminution pourrait s'opérer à plusieurs niveaux :

- La suppression de certaines interventions. L'itinéraire sylvicole retenu dans cette étude comprend par exemple un traitement de lutte contre les herbacées, effectué 10 ans après chaque trouée. Si l'on supprime ces traitements, et en supposant que les conditions de concurrence permettent à la forêt de se régénérer convenablement, on obtient un coût de gestion égale à 59 €/ha/an. Il s'agit d'une diminution non négligeable puisqu'elle représente 26 €/ha/an. Malgré cela, le merlon resterait moins coûteux avec une annuité de 1787 €, contre 2952 € pour la gestion forestière sur la période de 100 ans.

- la diminution de la surface gérée. L'itinéraire sylvicole prévoit en effet de traiter l'ensemble de la surface forestière contenue dans la zone d'étude. Il serait donc possible de limiter les coûts de manière très significative en limitant cette surface à gérer. Cependant, ce choix risquerait d'avoir des conséquences sur l'efficacité de la forêt. Une solution intéressante serait donc de prioriser les zones forestières en fonction de leur intérêt stratégique face aux chutes de blocs. Ce zonage permettrait de limiter la perte d'efficacité liée à la diminution de la surface gérée.

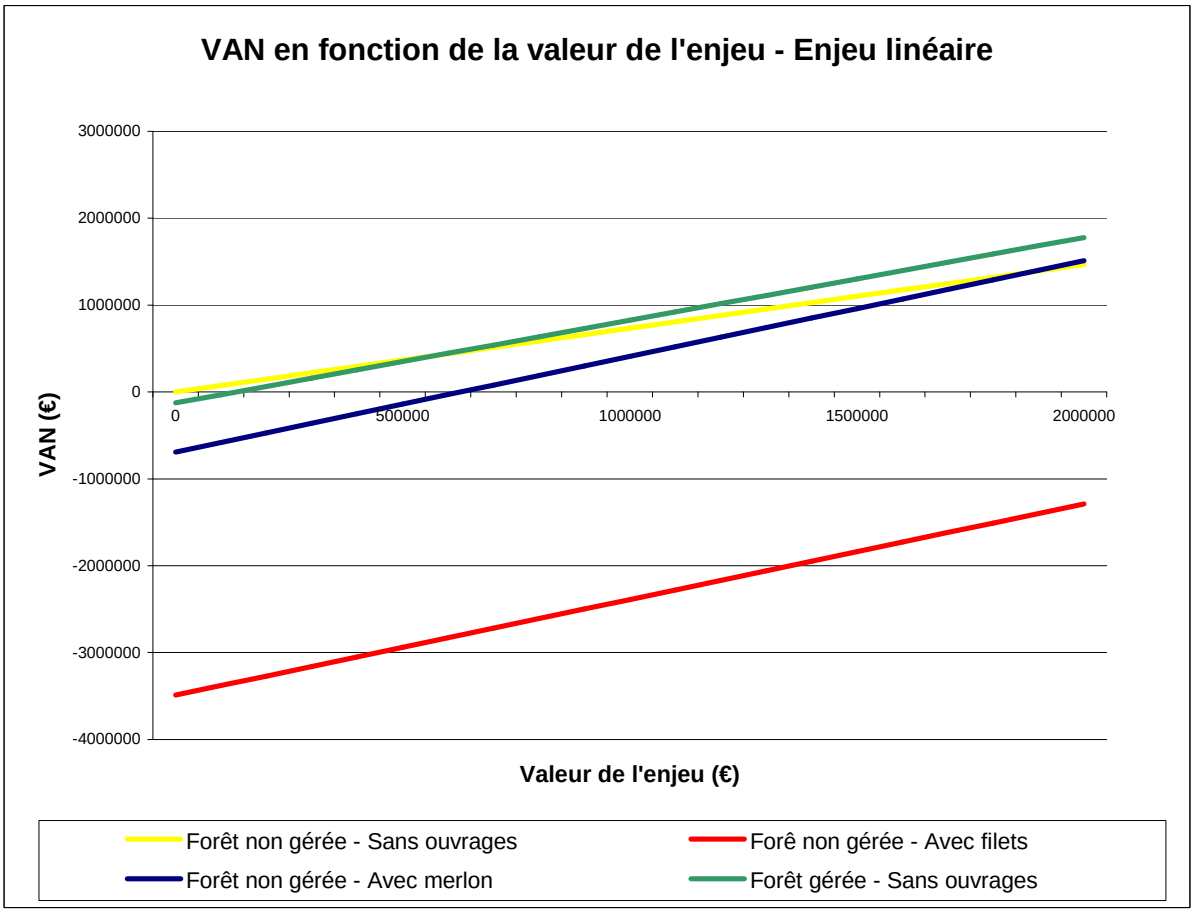
- La vente des bois. En effet, comme nous l'avons vu, la vente des bois serait un bon moyen de limiter les coûts de gestion. Néanmoins, elle pourrait aussi avoir des conséquences sur l'efficacité de la forêt. En effet, les arbres laissés en travers de la pente permettent d'augmenter la rugosité du sol afin de limiter l'énergie cinétique des blocs. Si ces arbres sont retirés, on ne dispose plus de ce bénéfice.

- **Diminution du coût des ouvrages de génie civil**

Les coûts d'installation des ouvrages sont directement liés à leur longueur. Si la longueur de l'enjeu à protégé était plus importante, le coût des ouvrages augmenterait fortement.
Ainsi, les enjeux de type linéaires, comme les routes ou les voies ferrées, pourraient favoriser la gestion forestière.

Afin de montrer un exemple de cas où la gestion forestière pourrait être particulièrement favorisée, les longueurs des ouvrages ont été multipliées par 10. De plus, les traitements de lutte contre les herbacées ont été retirés de l'itinéraire sylvicole. Enfin, l'efficacité brute de la forêt est toujours majorée de 40%. Les résultats obtenus sont présentés dans le graphique suivant :

Figure 14 : Evolution de la VAN en fonction de la valeur de l'enjeu, pour un enjeu hypothétique de type linéaire



Ce graphique fait très nettement apparaître le surcoût lié au dimensionnement des ouvrages dans le cas d'enjeux de forte longueur. C'est particulièrement le cas pour les filets pare-blocs, qui sont dans ici extrêmement onéreux.
Dans cette configuration, la gestion forestière est le meilleur scénario à partir d'une valeur d'enjeu de 650 000 €.

3.6 Conclusions pour le site de Fontaine

- **Une configuration nettement en faveur des ouvrages de génie civil**

Le modèle économique fournit des résultats très fiables concernant le classement des scénarios. D'un point de vue économique, l'aménagement « idéal » serait obtenu par l'installation d'un merlon et par le maintien d'une forêt en évolution naturelle.

- **Une grande sensibilité du modèle économique**

L'analyse présentée ici montre une sensibilité importante du modèle, pour les quatre paramètres étudiés. Si les classements restent inchangés dans le cadre de la configuration d'origine, la variation des paramètres peut entraîner des différences importantes dans le cas d'enjeux et de volumes de faibles importances.
De plus, les plages d'incertitudes caractérisant bon nombre de paramètres sont très larges. En effet, il est difficile de déterminer des valeurs fiables, tant pour la vulnérabilité des bâtiments, que pour la fréquence des départ. Ces paramètres sont eux-mêmes fonction d'une multitude d'autres variables qui n'ont pas pu être testées ici.
Enfin, l'étude de sensibilité n'a porté que sur l'influence de chaque paramètre indépendamment des autres, et l'interaction entre ces paramètres pourrait augmenter encore les incertitudes sur les résultats.

- **Mise en évidence de facteurs favorables à l'intervention en forêt**

L'ensemble des résultats confirment une efficacité non négligeable des espaces forestiers dans le cas d'enjeux de faible importance et pour des volumes de départ modérés (de l'ordre du mètre-cube).
Ils montrent également que la gestion forestière est particulièrement intéressante dans le cas d'enjeu linéaire, qui entraine un fort surcoût sur les ouvrages de protection.

- **Des différences méthodologiques déterminantes**

Les différences introduites dans la méthodologie de l'étude, effectuées dans le but d'être en accord avec une stratégie globale de gestion des risques, ont des conséquences cruciales sur les résultats. Cela montre tout l'intérêt pour le gestionnaire de se placer dans un contexte plus large que le seul espace forestier. Les contraintes d'ordre réglementaire peuvent peser fortement sur les choix de gestion.

4 Conséquences pour une application à l'échelle territoriale

La méthodologie employée sur le site de Fontaine, ainsi que l'ensemble des résultats qui en sont issus, fournissent bon nombre d'éléments déterminants pour le choix d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice appliquée à l'échelle d'un bassin de risque. Quelles adaptations doivent être opérées pour garantir la faisabilité d'une telle étude ?

Dans le cadre d'une échelle aussi large, les contraintes de temps et de coûts impliquent nécessairement une diminution de la précision des résultats, mais cette diminution doit être réfléchie de manière à garantir une fiabilité satisfaisante.
Compte tenu de la grande sensibilité du modèle économique, il est peu probable d'obtenir des résultats précis en ce qui concerne la valeur actualisée nette. En revanche, la fiabilité du classement des scénarios est capitale. En effet, c'est avant tout ce classement qui déterminera les choix de gestion. La méthodologie retenue doit donc garantir cette fiabilité.

À partir de ce constat, deux grandes catégories d'adaptations ont été envisagées. La première repose sur la réduction des temps de calcul et de modélisation propres à chaque site étudié. La seconde repose sur la hiérarchisation des sites en fonction de leur configuration topographique et forestière. L'objectif est de limiter l'analyse économique aux seuls secteurs pour lesquels les choix de gestion sont les plus difficiles à faire. Nous verrons que ces deux grands types d'adaptations peuvent être complémentaires.

4.1 Amélioration du temps d'étude pour chaque unité aléa - enjeu

Comme nous l'avons vu, l'analyse coût-bénéfice doit être effectuée pour chaque unité aléa – enjeu, afin de garantir la cohérence de l'étude économique. Dans le cas d'une application à l'échelle territoriale, **ces unités aléa-enjeu devront donc être définies au préalable.**

Un certain nombre d'adaptations peuvent être effectuées pour améliorer la durée globale de l'étude portée sur chacune de ces unités aléa - enjeu :

- Diminution de la phase de relevés de terrain
- Diminution du nombre de modélisations Rockyfor3D
- Optimisation des manipulations informatiques par l'automatisation des tâches.

Les deux premières adaptations ont été envisagées dans le cadre de l'étude INTERREG.

4.1.1 Diminution de la phase de relevés de terrain

L'acquisition des données de bases concernant la topographie, les peuplements forestiers et les enjeux représente une phase importante en termes de temps et de moyens. Le bilan dressé dans le cadre de l'étude INTERREG montre que cette phase représente environ un tiers du temps d'étude total, pour un site d'une dizaine d'hectare. Dans le cas de site de plus grande surface, cette proportion peut être encore plus importante.
Pour diminuer le temps attribué à cette phase, on pourrait envisager de réduire la précision des relevés en effectuant les adaptions suivantes :

- diminution du nombre des placettes d'inventaire. Cela revient à augmenter l'erreur relative pour chaque variable mesurée. Il convient donc de rester prudent pour ne pas trop dégrader les résultats. Notons par ailleurs que l'erreur relative sur la densité avait été fixée à 15 % pour le site de Fontaine, ce qui représente déjà une valeur considérable. Une autre piste de réflexion consiste à adapter le protocole de relevé utilisé pour gagner en efficacité. Pour des raison de temps, cette piste n'a pas été étudiée.
- attribution de valeurs moyennes pour les enjeux. Il peut être en effet fastidieux d'attribuer une valeur précise pour chaque enjeu considéré. Il serait donc intéressant d'établir des valeurs de

références en fonction du contexte et du type de d'enjeu. Par exemple, la valeur d'une maison pourrait être définie en fonction de la valeur moyenne de l'immobilier observé sur la commune d'étude.

4.1.2 Diminution du nombre de simulations Rockyfor3D

La méthodologie établie précédemment impose un nombre très élevé de modélisations Rockyfor3D. Pour le site de Fontaine, cela représente 48 simulations, pour un temps total de 13 h 30 de fonctionnement du logiciel. De plus, le nombre de modélisations est fonction du volume de référence pris en compte. Dans le cas de blocs de très grosses dimensions, ce nombre serait augmenté.

L'étude INTERREG propose de ne réaliser dans ce cas que trois séries de modélisations :

- Une sans forêt
- Une avec la forêt dans son état initial (on considèrera l'efficacité constante sur la période de calcul considérée)
- Une avec une forêt non gérée potentielle en fin de période

Cependant, l'analyse de sensibilité rappelle toute l'importance de bénéficier de valeurs précises, notamment concernant l'efficacité brute de la forêt. Cette réduction drastique du nombre de modélisation risque donc d'avoir une grande influence sur les résultats.

4.1.3 Optimisation des tâches informatiques

Le traitement informatique imposé par la méthodologie est complexe. Il fait appel à plusieurs types de logiciels, comprenant un tableur, un SIG, Rockyfor3D, et le logiciel R pour les scripts d'élaboration des « fichiers arbres ». Les manipulations de données sont nombreuses et sont sources d'erreurs et de pertes de temps.
Un grand nombre de tâches répétitives pourraient être automatisées, notamment grâce à l'élaboration de scripts. Cette démarche a été entreprise dans le cadre de cette étude, avec notamment la réalisation de modèles SIG sous ArcGIS 9.3.
L'automatisation a aussi l'avantage de libérer l'opérateur pour les tâches d'analyse qu'il peut effectuer en parallèle.

4.1.4 Les limites

La plupart des adaptations envisagées entraînent une réduction de la précision des résultats. Or, nous avons vu que la sensibilité du modèle impose une grande prudence dans la caractérisation des variables d'entrée. Dans les situations pour lesquelles la gestion forestière pourrait être pertinente, la précision des données est cruciale.
La diminution du nombre de placettes d'inventaire et de modélisation Rockyfor3D pourrait donc entrainer des différences significatives dans les résultats, au point de modifier le classement des scénarios.
Par contre, il semble acceptable d'utiliser des valeurs moyennes pour la caractérisation des enjeux. L'automatisation des tâches informatique ne pose quant à elle aucun problème particulier.

4.2 Hiérarchisation des unités aléa – enjeu

Puisqu'il semble difficile de diminuer significativement la durée d'étude propre à chaque site sans compromettre la fiabilité des résultats, il faut donc réduire le nombre de sites d'étude. Toute la difficulté réside dans le choix de ces sites prioritaires. Il y a donc une nécessité d'établir une hiérarchisation entre les sites. Cette partie propose quelques pistes de réflexions afin d'y parvenir.

4.2.1 Critères de sélection

Quels critères prendre en compte pour établir une hiérarchisation adaptée ?

L'analyse des résultats du site de Fontaine montre que le classement des scénarios est très lié aux rôles tenus par la forêt par rapport aux autres stratégies de protection.
En effet, alors que les VAN associées aux ouvrages de protection évoluent de manière similaire face aux variations des paramètres du modèle, les VAN liées aux scénarios forestiers ont un comportement bien différencié.

Ainsi le rapport entre la VAN des scénarios « forêt » et la VAN des scénarios « génie civil » est un indicateur intéressant. Les critères de sélection des sites peuvent donc être choisis en fonction de leur influence sur ce rapport.
Les critères les plus influents ont été déterminés grâce à l'analyse des résultats de Fontaine et regroupé dans le tableau 18 :

Tableau 18 : Sens d'évolution du rapport $VAN_{Forêt}$ / $VAN_{Ouvrages}$ en fonction du critère de sélection

Critère	Sens d'évolution de $\frac{VAN_{Forêt}}{VAN_{Ouvrages}}$	Remarques
Volume de référence	↘	Plus le volume de départ est élevé, moins la forêt est efficace, alors que les ouvrages gardent une efficacité constante.
Valeur et vulnérabilité des enjeux	↘	Les deux VAN ont une évolution positive, mais la VAN des ouvrages augmente plus rapidement en raison d'une efficacité brute maximale.
Efficacité potentielle de la forêt	↗	L'efficacité brute des ouvrages est constante et égale à 100 %. Donc plus l'efficacité brute de la forêt augmente, plus le rapport des VAN augmente également.
Gain d'efficacité attendu par la gestion forestière	↗	IDEM
Longueur de l'enjeu à protéger	↗	Plus la longueur de l'enjeu augmente, plus les coûts d'installation et d'entretien des ouvrages sont élevés, alors que ceux de la gestion restent constants.

La limite de l'utilisation de ce rapport $VAN_{Forêt}/VAN_{Ouvrage}$ réside principalement dans l'opposition entre les scénarios de génie civil à ceux liés à la forêt. Cette opposition ne permet pas de mettre en avant les situations pour lesquelles la complémentarité entre génie civil et gestion forestière serait judicieuse. Toutefois, plus la situation est favorable à la gestion forestière, plus les chances de complémentarité entre les deux stratégies de protection sont élevées.

Les critères retenus ont parfois des effets antagonistes sur le rapport des VAN. Il en résulte des interactions complexes qui peuvent être délicates à analyser.
La compréhension et la caractérisation des interactions entre ces critères de sélection sont donc à la base d'une méthode efficace de hiérarchisation des unités aléas – enjeu. Il s'agit d'un travail méthodologique important, qui n'a pas pu être développé dans le cadre de la présente étude, mais qui constitue une perspective de poursuite intéressante.

4.2.2 Exemples de situations favorables à l'analyse coût-bénéfice intégrant la forêt

Malgré la complexité des interactions entre les différents critères vus précédemment, on peut distinguer certaines synergies, qui représentent des situations pour lesquelles une analyse coût-bénéfice pourrait être tout à fait pertinente.

Pour toutes ces situations, il faut avant tout que la forêt puisse atteindre un niveau d'efficacité minimal. Par exemple, les versants de très courte longueur ne peuvent être retenus, car la largeur de la bande boisée ne conférerait aucune efficacité à la forêt. De même, certaines stations limitantes ne permettent pas aux peuplements de se développer correctement et d'atteindre une quelconque efficacité.

Voici deux exemples de synergies possibles :

- **Des enjeux et des volumes de faible importance**

Ces situations rendent les ouvrages de génie civil difficile à rentabiliser. La fonction de protection de la forêt peut donc prendre le relais, d'autant plus que les volumes de départ sont à la portée des capacités de contrôle des peuplements. Il reste alors à déterminer si la gestion forestière peut être justifiée ou si l'on peut laisser la forêt évoluer naturellement.
Dans le cas où les valeurs d'enjeu sont très faibles, la forêt peut être retenue même si les volumes de départs sont importants.

- **Des enjeux de type linéaire**

Nous avons vu que la protection d'enjeux linéaires (tels que les routes) par des ouvrages de génie civil entraînent des surcoûts énormes. Dans de telles situations, la forêt peut être intéressante économiquement, même pour des valeurs d'enjeux et de volumes relativement élevés.

4.3 Autres sites d'étude envisagés

Afin de mettre en application les différentes idées développées précédemment, des sites d'étude supplémentaires ont été envisagés. Les résultats des analyses effectuées sur ces sites ne sont pas encore validés, mais pourront être valorisés prochainement au sein du service RTM de l'Isère.

La complémentarité entre gestion forestière et ouvrages de génie civil pourrait être un point d'analyse intéressant concernant des sites situés sur les communes de Meylan et du Fontanil.
Ces deux sites regroupent en effet à la fois des enjeux localisés de grande valeur, tels que des habitations, et des enjeux de types linéaires, tels que des circuits de randonnée.

CONCLUSION

Le travail présenté dans ce rapport a abouti à la mise au point d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice spécifique à l'aléa « chute de blocs », et permettant de prendre en compte les rôles de la forêt dans l'atténuation de cet aléa.
La principale nouveauté apportée, notamment par rapport à l'étude similaire réalisée dans le cadre du programme INTERREG, réside dans l'objectif d'adapter l'analyse coût-bénéfice aux contraintes définies par le Plan de Prévention des Risques Naturels (donc par l'État).

Nous avons vu que ces contraintes ont de grandes conséquences sur les résultats de l'analyse économique. La principale raison est la prise en compte d'un aléa de référence, qui représente bien souvent un volume important.
Les résultats de l'analyse de sensibilité rejoignent par ailleurs les conclusions de précédentes études : les paramètres intervenant dans le calcul sont nombreux, parfois difficiles à définir et ont une grande influence sur les résultats du calcul.

Alors que la cohérence avec les principes du PPR suggère de mener l'étude économique à l'échelle d'un bassin de risque, d'ordre communal ou intercommunal, il semble difficile de limiter le temps de traitement de calcul en effectuant des hypothèses plus larges qui ne garantiraient pas une fiabilité satisfaisante. La faisabilité d'une analyse coût-bénéfice à cette échelle passerait donc par une hiérarchisation des unités aléa – enjeu du territoire.

Les interactions complexes entre les différents critères de sélection envisagés pour élaborer cette hiérarchisation démontrent un besoin de réflexion méthodologique supplémentaire.
Dans cette optique, d'autres sites d'études ont été envisagés. Les travaux réalisés sur ces sites pourraient être valorisés prochainement.

L'ensemble de ce travail confirme donc toute la complexité d'application de l'analyse coût-bénéfice dans le domaine des risques naturels. Beaucoup d'incertitudes demeurent quant à la validité des résultats, alors même que l'aléa chute de blocs rocheux est certainement le plus facile à modéliser.
L'application d'une telle analyse à l'ensemble des aléas naturels de montagne s'avère donc très complexe. Si les pouvoirs publics décident d'approfondir ce domaine d'analyse, cela ne pourrait s'accompagner que d'un grand nombre d'études, de recherches et de développements méthodologiques.

Références bilbliographiques

Aspects techniques

BAUERHANSL C, BERGER F, DORREN L, DUC P, GINZLER C, KLEEMAYR K, KOCH V, KOUKAL T, MATTIUZZI M, PERZL F, PRSKAWETZ M, SCHADAUER K, SCHNEIDER W, SEEBACH L _ 2010 _ Development of harmonized indicators and estimation procedures for forests with protective functions against natural hazards in the alpine space _ JRC Scientific and Technical Reports _ 181p.

BESSON L _ 2005 – Les risques naturels – De la connaissance pratique à la gestion administrative _ Techni-cités_592p.

BIGOT C _ 2006 _ Regard critique sur une forêt à fonction de protection contre les chutes de blocs, Retour d'expérience dans le canton de la Saucisse à Saint Martin le Vinoux (Isère) _ Mémoire de fin d'études de Master Géographie mention EGEPM _ 79p.

DORREN L, BERGER F, JONSSON M, KRAUTBLATTER M, MÖLK M, STOFFEL M, WEHRLI A _ 2007 _ State of the art in rockfall - forest interactions _ Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen (le Journal Forestier Suisse) 158(6) _ pp.128-141.

LE HIR C, BERGER F, DORREN L, QUETEL C _ 2004 _ Forest: A natural means of protection against rockfall, but how to reach sustainable mitigation? – Modelling tools coupling: Advantages and limits of rockfalls trajectories modelling taking into account forest stands _ Interpraevent_ 11p.

PEYRAUD S _ 2008 _ Programme européen Interreg IV – Mise en place d'un réseau international de chantiers pilotes en forêts à rôle de protection _ Mémoire de fin d'études AgroParisTech-ENGREF _ 168p.

PRAVIN M _ 2012 _ La structure idéale des forêts de protection contre les chutes de pierres _ mémoire de fin d'études AgroParisTech-ENGREF _ 124p.

WEHRLI A, DORREN L, BERGER F, ZINGG A, SCHÖNENBERGER W, BRANG P _ 2006 _ Modelling long-term effects of forest dynamics on the protective effect against rockfall _ For. Snow Landsc. Res. 80, 1 _ pp. 57–76

Aspects économiques

BASLER E _ 2009 _ RiskPlan Version 2.1, Documentation of methodological and mathematical basis _ OFEV _ 45p.

BERGER F, M. BOUZIT, BROCHOT S, GERARD A, TACNET J.M _ 1999 _ Eléments d'aide à la programmation des investissements de protection contre les risques naturels et à l'élaboration des PPR _ Cemagref _ 17p.

BLANCHART S, DUPIRE S, MIOLANE C, VERON C _ 2009 _ Evaluation économique du rôle de protection de la végétation, et des forêts de montagne en particulier _ Rapport de projet FIF, AgroParisTech-ENGREF _ 62p.

BROCHOT S, DUCLOS P, BOUZIT M _ 2003 _ L'évaluation économique des risques torrentiels : intérêts et limites pour les choix collectifs de prévention _ Ingénieuries n°spécial _ pp. 53-68.

CAHEN M _ 2010 _ Ouvrages de parade contre les risques naturels en montagne et fonction de protection de la forêt : analyse économique comparative _ Mémoire de fin d'études AgroParisTech-ENGREF _ 139p.

DIONNE G, LEBEAU M _ 2010 _ Le calcul de la valeur statistique d'une vie humaine _ CIRRELT _ 63p.

DUPIRE S _ 2011 _ Projet Interreg "Forêts de protection" – Etude économique : démarche et principaux résultats _ Laboratoire d'économie forestière, AgroParistech-ENGREF _ 27p.

DUPIRE S _ 2011 Projet Interreg « Forêts de protection » - Etude économique : Etapes précises de la méthodologie _ Laboratoire d'économie forestière, AgroParisTech-ENGREF_ _ 27p.

DUPIRE S_2011_ Projet Interreg « Forêts de protection » - Etude économique : Méthodologie de l'étude économique _ Laboratoire d'économie forestière, AgroParisTech-ENGREF _ 62p.

ERDLENBRUCH K, GILBERT E, GRELOT F, LESCOULIER C _ 2008 _ Une analyse coût-bénéfice spatialisée de la protection contre les inondations – Application de la méthode des dommages évités à la basse vallée de l'Orb _ Ingénieries – EAT n°53 _ 18p.

POILVET B, MASSON B, JAMIN L, LOVERO M _ 2010 _ Evaluation du coût et des résultats des méthodes permettant d'évaluer l'efficacité de la forêt face à l'aléa chute de bloc _ Rapport de projet FIF, AgroParisTech-ENGREF _ 54p.

TOUATY M, GIE G _ 2004 _ Synthèse des travaux français relatifs à l'évaluation des dommages _ contribution au 10ème colloque de comptabilité générale organisé par l'ACN _ 23p.

Aspects juridiques

LACROIX E, 2005 _ Risques naturels en montagne : aspects juridiques de l'affichage de l'incertitude dans les expertises _ mémoire de fin d'études Master professionnel « droit et développement de la montagne » _ 93p.

Aspects « gestion forestière »

2006 _ Guide des Sylvicultures de Montagne, Alpes du Nord françaises _ ONF, Cemagref, CRPF Rhône-Alpes_147p.

2008 _ Guide des Sylvicultures de Montagne, Alpes du Sud françaises _ ONF, Cemagref _ 147p.

DURAND A _ 2012 _ Boisements de protection des terrains domaniaux RTM de l'Isère _ Mémoire de fin d'études AgroParisTech-ENGREF_ 103p.

Tables des annexes

Annexe 1 : Principaux ouvrages de protection de génie civil utilisés dans la protection contre les risques naturels 63

Annexe 2 : Détail des calculs du modèle économique 67

Annexe 3a : Script R pour la modélisation du « fichier arbre » initial 69

Annexe 3b : Script R pour l'évolution des peuplements et l'établissement des « fichiers arbre » intermédiaires 72

Annexe 4 : Protocole de relevé des données de terrain 74

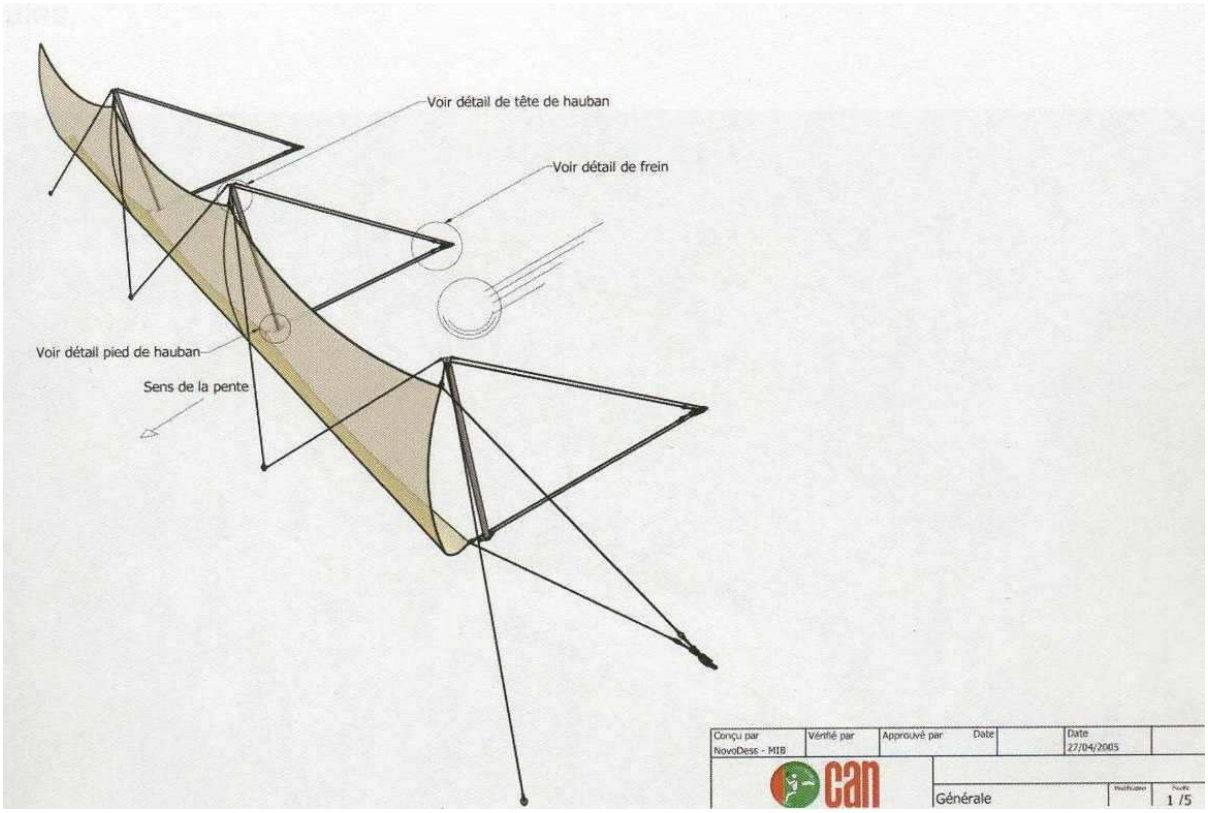
Annexe 5 : Données de l'IFN utilisées dans l'étude 77

Annexe 1 : Principaux ouvrages de génie civil utilisés dans la protection contre les risques naturels

- **Aléa « chute de blocs »**

<u>- Filets pare-blocs :</u>

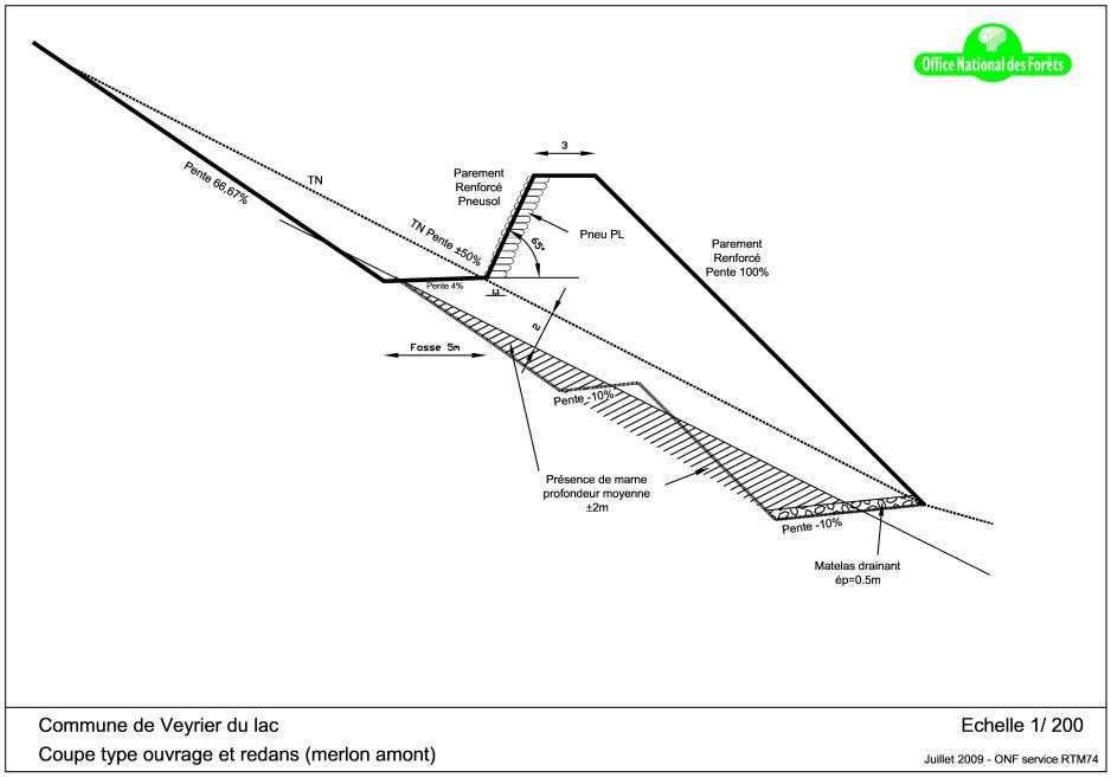
Les filets pare-blocs sont conçus pour avoir un comportement dynamique vis-à-vis du bloc. Ce comportement permet une meilleure atténuation de l'énergie et évite les casses de l'installation.
Les filets sont maintenus en place grâce à des poteaux ancrés profondément dans le sol. Ces poteaux constituent une zone de fragilité de l'installation, car leur rigidité ne leur permet pas de résister correctement aux impacts.



<u>Détail d'un filet pare-blocs (source : dossier de recollement CAN S.A. à Bonnevaux)</u>

- Merlon :

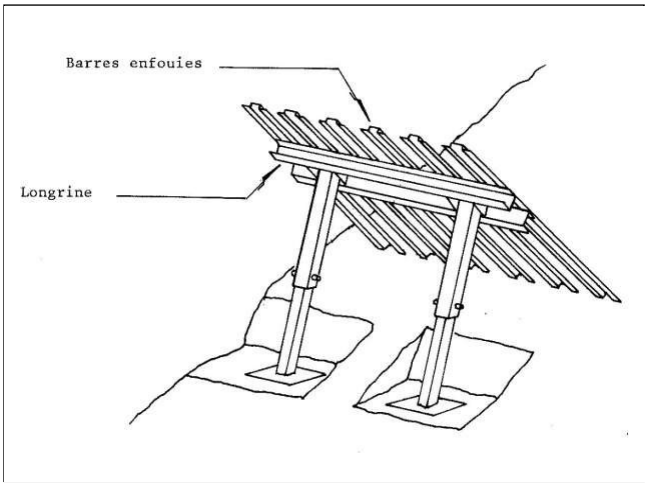
Le merlon consiste en une digue perpendiculaire à la pente. Une fosse est creusée à son amont afin de piéger les blocs lors de leur chute. Le détail d'un merlon type est visible ci-dessous :



- **Aléa « Avalanche »**

- Rateliers paravalanches :

Le râtelier permet de limiter les départs d'avalanches en améliorant la stabilité du manteau neigeux. Il s'agit donc d'un ouvrage de protection active. Le détail d'un râtelier est présenté ci-dessous :



Source : catalogue Entreprise Industrielle Montagne

- Filets paravalanche :

Il sagit de structures souples qui, installées dans les zones de départ des avalanches, empêchent la rupture du manteau neigeux en formant des obstacles de rétention. Ils sont conçus pour être installés sur des pentes variant entre 70 et 120 %. Ces barrières sont constituées de filets en câbles métalliques maintenus par des poteaux haubanés.

Source : geobrugg.com

- **Aléa « crue torrentielle »**

Les ouvrages de génie civil utilisés dans la lutte contre le risque torrentiel sont de multiple nature, et agissent souvent de manière complémentaire.
Ils visent notamment à corriger le profil en long du torrent, et à aménager des plages de dépôts pour les matériaux, afin d'éviter que ceux-ci ne se retrouvent emportés dans des zones comportant des enjeux. Voici un exemple de plage de dépôt aménagée sur le torrent du Manival :

Annexe 2 : Détail des calculs du modèle économique

1. Enjeu de type « bâtiment »

- **Ampleur annuelle des dommages pour un bien matériel A_{wb} :**

$$A_{wb} = F_{départ} \times P_{propagation} \times K \times Vulnérabilité \times V_b$$

A_{wb} [€/an]
$F_{départ}$ [nb/an] : Fréquence de départ du bloc
$P_{propagation}$ [%] : Probabilité qu'un bloc atteigne le bâtiment
K [%] : Proportion du bâtiment menacée
Vulnérabilité [%] : Vulnérabilité du bâtiment, fonction de l'énergie avec laquelle arrivent les blocs
V_b [€] : Valeur monétaire du bâtiment

- **Ampleur annuelle des dommages pour les personnes A_{wp} :**

$$A_{wp} = F_{départ} \times P_{propagation} \times Vulérabilité \times \lambda \times Nm$$

A_{wp} [morts/an]
$P_{départ}$ [%/an] : Probabilité de départ du bloc
$P_{propagation}$ [%] : Probabilité qu'un bloc atteigne le bâtiment
Vulnérabilité [%] : Vulnérabilité du bâtiment, fonction de l'énergie avec laquelle arrivent les blocs
λ [%] : Létalité pour les personnes à l'intérieur du bâtiment
Nm : [1] : Nombre de personnes effectivement menacées dans le bâtiment

$$Nm = Tocc \times Nh \times K$$

Tocc [%] : Taux occupation moyen du bâtiment
K [%] : Proportion du bâtiment menacée
Nh [1] : Nombre de personnes habitant le bâtiment

2. Enjeu de type « route »

- **Ampleur annuelle des dommages pour les personnes circulant en voiture A_{wpv} :**

$$A_{wp} = F_{départ} \times P_{propagation} \times Vulérabilité \times \lambda \times T_{occ\ veh} \times P_{présence}$$

A_{wpv} [morts/an]
$P_{départ}$ [%/an] : Probabilité de départ du bloc
$P_{propagation}$ [%] : Probabilité qu'un bloc atteigne la route
Vulnérabilité [%] : Vulnérabilité du véhicule, fonction de l'énergie avec laquelle arrivent les blocs
λ [%] : Létalité pour les personnes à l'intérieur du véhicule
$T_{occ\ veh}$ [1/Vhc] : Nombre moyen de personne dans un véhicule
$P_{présence}$ [%] : Probabilité de présence d'un véhicule

$$P_{présence} = \frac{L_{route} \times TJM}{v \times 24h}$$

L_{route} [km] : Longueur de la portion de route menacée
TJM : [Vhc/jour] Trafic moyen journalier

v [km/h] : Vitesse moyenne sur la portion de route

- **Ampleur annuelle des dommages pour les personnes circulant en autobus A_{wpa} :**

$$A_{wpa} = F_{départ} \times P_{propagation} \times Vulnérabilité \times \lambda \times T_{occ\,bus} \times P_{présence}$$

A_{wpa} [morts/an]
$P_{départ}$ [%/an] : Probabilité de départ du bloc
$P_{propagation}$ [%] : Probabilité qu'un bloc atteigne la route
Vulnérabilité [%] : Vulnérabilité du véhicule, fonction de l'énergie avec laquelle arrivent les blocs
λ [%] : Létalité pour les personnes à l'intérieur du bus
$T_{occ\,bus}$ [1/bus] : Nombre moyen de personne par bus
$P_{présence}$ [%] : Probabilité de présence d'un véhicule

$$P_{présence} = \frac{L_{route}}{v \times 24h} \times \left(\frac{L_{bus}}{L_{route}} + 1 \right)$$

Lroute [km] : Longueur de la portion de route menacée
Lbus [km] : Longueur moyenne d'un bus
TJM [Bus/jour] : Trafic moyen journalier
v [km/h] Vitesse moyenne sur la portion de route

3 Enjeu de type « voie ferrée »

- **Ampleur annuelle des dommages pour les personnes circulant en train A_{wpt} :**

$$A_{wpt} = F_{départ} \times P_{propagation} \times Vu\ln érabilité \times \lambda \times T_{occ\ train} \times P_{présence}$$

A_{wpv} [morts/an]
$P_{départ}$ [%/an] : Probabilité de départ du bloc
$P_{propagation}$ [%] : Probabilité qu'un bloc atteigne la voie ferrée
Vulnérabilité [%] : Vulnérabilité du véhicule, fonction de l'énergie avec laquelle arrivent les blocs
λ [%] : Létalité pour les personnes à l'intérieur du train
$T_{occ\ train}$ [1/train] : Nombre moyen de personne dans un train
$P_{présence}$ [%] : Probabilité de présence d'un train

$$P_{présence} = \frac{L_{voie}}{v \times 24h} \times \left(\frac{L_{train}}{L_{voie}} + 1 \right)$$

L_{voie} [km] : Longueur de la portion de voie ferrée menacée
L_{train} [km] : Longueur moyenne d'un train
TJM [train/jour] : Trafic moyen journalier
v [km/h] : Vitesse moyenne sur la portion de route

- **Ampleur annuelle de coût de fermeture de ligne A_{wfvf} :**

$$A_{wfvf} = F_{départ} \times P_{propagation} \times T_{fermé} \times C_{fermeture}$$

A_{wfvf} [morts/an]
$P_{départ}$ [%/an] Probabilité de départ du bloc
$P_{propagation}$: [%] Probabilité qu'un bloc atteigne la voie ferrée
$T_{fermé}$ [minutes] : Temps nécessaire pour rouvrir la ligne
$C_{horaire}$ [€/minute] : Coût horaire de fermeture de la ligne. (Evalué par le gestionnaire)

Annexe 3a : Script R pour la modélisation du fichier arbre initial

Le script R permet de simuler à la fois des brins de taillis et des tiges de franc-pied.
Il est basé sur une répartition aléatoire des tiges dans l'espace, à laquelle on ajoute certaines contraintes. Par exemple, la longueur et la largeur de cépée définissent un rectangle dans lequel les brins de cépée sont disposés aléatoirement.
Toutes les grandeurs sont estimées par une loi normale, dont les paramètres sont définis grâce aux relevés de terrain.

Le script est détaillé ci-dessous. Il comporte des annotations qui permettront au lecteur de comprendre chaque étape du calcul.

```
.....paramètres du modèle.....

#definition du dossier de travail
Nomsite<-"StMartin/poly5" #Inscrire le nom du site étudié entre guillemets
setwd(paste("C:/Users/Vincent/Documents/Travail, dossier divers/APT/3A Nancy/stage 3a/Modele_taillis/sorties
R/",Nomsite,sep=""))


#caracteristiques du peuplement

Longx<- 585 # dimension de la parcelle perpendiculairement au sens de plus grande pente (en mètres)
Longy<-390 # dimension de la parcelle dans le sens de plus grande pente (en mètres)
NCP <- 344 #densité cépées /ha
NFP <-  71 #densité FP < 27.5/ha
NFP2 <-20 #densité FP > 27.5/ha
NbBrins<- 5.24 # Nombre de brins par cepee
SdBrins<-2.4 # standard deviation pour la loi normale
MoyDiamT<-7.93 # diametre moyen des brins de taillis
SdDiamT<-4.85 # standard deviation pour la loi normale
L<-0.8 #Largeur maximale d'une cepee en metre
P<-0.8 #Profondeur maximale d'une cepee en metre
MoyDiamF<-16.11 # diamètre moyen des franc-pied < 27,5cm
SdDiamF<- 5.82 #standard deviation pour la loi normale
MoyDiamF2 <- 32.2 #diamètre moyeon franc-pied > 27,5cm
SdDiamF2 <- 1.8 #standard deviation pour la loi normale

DistMin<-0.4 # distance minimale entre 2 centre de cepee ou entre le centre d'une cepee et un Franc pied
surface<-Longx*Longy/10000 #Surface de la parcelle
NbCP<- surface*NCP # Nombre de cepee
NbFP<- surface*NFP # Nombre de Franc Pied < 27,5cm
NbFP2 <- surface*NFP2 # Nombre de Franc Pied > 27,5cm

xorigine <- 913491  #Coordonnées lambert93 correspondant au point de rotation. Elles sont lues sur SIG dans le coin
yorigine <- 6459587 #inférieur gauche de la zone étudiée quand on se place dans le sens de la pente


#.....creation du taillis.....


i=1
while (i<NbCP){
  if(i==1)  {
    x<-runif(1, xorigine, xorigine+Longx)#Tirage au sort des coordonnées du centre de la cépée
    y<-runif(1,yorigine, yorigine+Longy)
    BrinsCP<-floor(rnorm(1,mean=NbBrins, sd=SdBrins)) #Définition du nombre de brins selon une loi normale
    while(BrinsCP < 2){BrinsCP<-floor(rnorm(1,mean=NbBrins, sd=SdBrins))} #On verifie que la cépée comporte au moins 2
brins

    DataCP <- data.frame(matrix(ncol = 4,))
    colnames(DataCP) <- c("X","Y","D","idCP")
    for (j in 1:BrinsCP){
        X<-abs(runif(1,x-L/2, x+L/2)) #coordonnees x d'un brin appartenant a la cepee i
        Y<-abs(runif(1,y-P/2, y+P/2))#coordonnees y d'un brin appartenant a la cepee i
        D<- rnorm(1,mean= MoyDiamT, sd= SdDiamT) # Diametre du brin j
        if(D<= 0) {D=1} #On vérifie que le diamètre n'est pas égal ou inférieur à 0cm
        DataCPb <- data.frame(cbind(X,Y,D))
        DataCPb$idCP <-i# on ajoute une colonne avec le numero de la cepee
        DataCP<- rbind(DataCP,DataCPb) # on place le brin j dans une data frame
      }
```

```
      CPx<-x # on place la coordoonee x du centre de la cepee 1 dans un objet
      CPy<-y # on place la coordoonee y du centre de la cepee 1 dans un objet
      idCentre<-i # on indexe le centre de la cepee
      i<-i+1 # on passe a la cepee suivante
    }

  else {
    x<-runif(1, xorigine, xorigine+Longx)
    y<-runif(1,yorigine, yorigine+Longy)
    while (min(sqrt((x-CPx)^2+(y-CPy)^2))<DistMin){x<-runif(1, xorigine, xorigine+Longx)
                                        y<-runif(1,yorigine, yorigine+Longy)} # on verifie que deux centres de cepee ne soient pas trop
proche
    BrinsCP<-floor(rnorm(1,mean=NbBrins, sd=SdBrins)) #nb de brins dans une cepee
    while (BrinsCP <= 2) {BrinsCP<-floor(rnorm(1,mean=NbBrins, sd=SdBrins))} #On vérifie que la cépée comporte au moins 2
brins
     for (j in 1:BrinsCP){ # Nombre de brins dans une cepee
       X<-abs(runif(1,x-L/2, x+L/2))  #coordonnees x d'un brin appartenant a la cepee
       Y<-abs(runif(1,y-P/2, y+P/2)) #coordonnees y d'un brin appartenant a la cepee
       D<- rnorm(1,mean= MoyDiamT, sd= SdDiamT) # Diametre du brin choisit selon une loi normale
       if(D<= 0) {D=1} #On vérifie que le diamètre n'est pas égal ou inférieur à 0cm
       DataCPb <- data.frame(cbind(X,Y,D))
       DataCPb$idCP <-i # on ajoute une colonne avec le numero de la cepee
       DataCP<- rbind(DataCP,DataCPb) # on place le brin 1 dans une data frame
    }
       }
       CPx<-c(CPx,x) # on cre un vecteur comprenant les coordonees x des centres des cepees
       CPy<-c(CPy,y) # on cre un vecteur comprenant les coordonees y des centres des cepees
       idCentre<-c(idCentre,i)
       DataCentre<-as.data.frame(cbind(CPx,CPy,idCentre)) #data frame avec les coordonnees des centres des cepees
       i<-i+1 # on passe a la cepee suivante

  }

DataCP <-DataCP[-1,] #Suppression de la première ligne de la dataframe (ne comporte aucune valeur)

#.....Creation des francs pieds : D < 27,5 cm.....

i=1
while (i<=NbFP){
  if(i==1)  {
    xfp<-runif(1,xorigine, xorigine+Longx) # on choisit une coordonnee x
    yfp<-runif(1,yorigine, yorigine+Longy) # on choisit une coordonnee y
    while(min(((CPx-xfp)^2+(CPy-yfp)^2)^0.5)<DistMin){ xfp<-runif(1,xorigine, xorigine+Longx)
                                          yfp<-runif(1,yorigine, yorigine+Longy)}# on verifie que un franc pied ne soit pas trop proche
du centre d'une cepee
      Diamfp<-rnorm(1,mean=MoyDiamF, sd= SdDiamF) # on choisit un diametre selon une loi normale
      if(Diamfp<= 0) {Diamfp=1}
      FPx<-xfp # on stock la coordonee x du 1er franc pied dans un vecteur
      FPy<-yfp # on stock la coordonee y du 1er franc pied dans un vecteur
      FPDiam<-Diamfp # on stock le diametre du 1er franc pied dans un vecteur
      idFP<-i # on ajoute une colonne avec un identifiant
      i=i+1 # on passe au 2eme franc pied
    }

  else {
    xfp<-runif(1,xorigine, xorigine+Longx) # on choisit une coordonnee x
    yfp<-runif(1,yorigine, yorigine+Longy) # on choisit une coordonnee y
    while((min(((FPx-xfp)^2+(FPy-yfp)^2)^0.5) < DistMin) & (min(((CPx-xfp)^2+(CPy-yfp)^2)^0.5)<DistMin)) {
      xfp<-runif(1,xorigine, xorigine+Longx)
      yfp<-runif(1,yorigine, yorigine+Longy)
    } # on verifie que le deuxieme franc pied n'est pas trop proche du 1er franc pied
    Diamfp<-rnorm(1,mean=MoyDiamF, sd= SdDiamF)# On définit un diamètre selon une loi normale
    if(Diamfp<= 0) {Diamfp=1}
    FPx<-c(FPx,xfp) # on stock la coordonnee x du franc pied dans le vecteur
    FPy<-c(FPy,yfp) # on stock la coordonnee y du franc pied dans le vecteur
    FPDiam<-c(FPDiam,Diamfp) # on stock le diametre du franc pied dans le vecteur
    idFP<-c(idFP,i)
    i=i+1 # on passe au franc pied suivant
  }
  }



#.....Creation des francs pieds : D > 27,5 cm.....
```

```
#Procédé identique

i=1
while (i<=NbFP2){

   xfp<-runif(1,xorigine, xorigine+Longx)
   yfp<-runif(1,yorigine, yorigine+Longy)
   while(((min(((FPx-xfp)^2+(FPy-yfp)^2)^0.5)) < DistMin) & (min(((CPx-xfp)^2+(CPy-yfp)^2)^0.5)<DistMin)) {
     xfp<-runif(1,xorigine, xorigine+Longx)
     yfp<-runif(1,yorigine, yorigine+Longy)}
     Diamfp<-rnorm(1,mean=MoyDiamF2, sd= SdDiamF2)
     if(Diamfp<= 0) {Diamfp=1}
     FPx<-c(FPx,xfp)
     FPy<-c(FPy,yfp)
     FPDiam<-c(FPDiam,Diamfp)
     idFP<-c(idFP,NbFP+i)
     i=i+1

}

DataFP<-as.data.frame(cbind(idFP,FPx,FPy,FPDiam))



#.....……Fichier Final.....

#formatage de la data frame taillis et changement des noms de colonne
ID_treeCP <- as.integer(as.character(rownames(DataCP)))-1
Taillisfinal <- as.data.frame(cbind(ID_treeCP,DataCP$X,DataCP$Y,DataCP$D))
colnames(Taillisfinal) <- c("ID_tree","X","Y","D")

#recalcul des ID des franc-pieds <27.5 et changement des noms de colonne
DataFP$idFP <- idFP+max(Taillisfinal$ID_tree)
Futaiefinal <- DataFP
colnames(Futaiefinal) <- c("ID_tree","X","Y","D")


#construction et export de la data frame finale
final <- data.frame(rbind(Taillisfinal,Futaiefinal))
write.table(final, file = "poly1.txt",row.names = F, col.names = c("ID_tree","X","Y","D"), dec = ",", sep = "\t")
```

Annexe 3b : Script R pour l'évolution des peuplements et l'établissement des fichiers arbres intermédiaires.

Afin de gagner du temps dans le traitement des données, un script R a été élaboré pour limiter les manipulations sous Excel destinées à prendre en compte l'évolution des peuplements.
Ce script reprend tous les principes du modèle d'évolution initial. Ci-dessous est présentée la version du script permettant de prendre en compte l'évolution du peuplement dans le cas d'une forêt gérée.

```
#----------Modèle d'évolution des peuplements----------


#definir le dossier de travail
Nomsite<-"Meylan/géré" #Inscrire le nom du site étudié entre guillemets
setwd(paste("C:/Users/Vincent/Documents/Travail, dossier divers/APT/3A Nancy/stage 3a/modele_evolution/",Nomsite,sep=""))


#Paramètres
treefile_name <- "treefile_2013.txt"
annee_init <- 2013
age_init <- 60
Periode <- 25
Nb_periode <-4
Gmax <- 60
Mortalite <- 0.04
Survie <- 5



#----------Chargement et réorganisation du treefile initial----------

treefile <- read.table(treefile_name, sep="\t", dec = ".", h=T)
treefile <- as.data.frame(cbind(treefile$ID_tree, treefile$X, treefile$Y, treefile$D, treefile$Id,
treefile$Id_trouee,treefile$surface,treefile$Acct))
colnames(treefile) <- c("ID_tree","X","Y","D","Id","Id_trouee","Surface","Acct")
treefile_init <- treefile

j=0
while (j < Nb_periode) {
#----------Création de treefile après trouée----------

date <- annee_init+j*Periode +1
treefile <- subset(treefile, Id_trouee != date)
filename <- paste("treefile_",date,".txt",sep="")
write.table(treefile, file = filename,row.names = F, col.names = c("ID_tree","X","Y","D","Id","Id_trouee","surface","Acct"), dec =
",", sep = "\t")

treefileRF3D <- as.data.frame(cbind(treefile$X,treefile$Y,treefile$D))
treefileRF3D$espace <- ""
colnames(treefileRF3D) <- c("X","Y","D","espace")
treefileRF3D <- as.data.frame(cbind(treefileRF3D$espace,treefileRF3D$X,treefileRF3D$Y,treefileRF3D$D))
filename <- paste("treefileRF3D_",date,".txt",sep="")
write.table(treefileRF3D, file = filename, quote = FALSE, row.names = F,dec = ".", sep = " ")


#----------Evolution du peuplement de treefile_init vers treefile-init + Periode----------

#Calcul du rang de chaque arbre

treefile$Rang <- rank (treefile$D)


#calcul de la mortalité naturelle

GB <- subset(treefile, D > 27.5)
PB <- subset (treefile, D <= 27.5)

i=1
while (i <= nrow(GB)) {

  if (runif(1, 0, 1) <= (Mortalite*Periode/Survie)) {
    GB <- GB[-i,]}
```

```
  i<-i+1
}

treefile <- as.data.frame(rbind(GB,PB))


#calcul de l'autoéclaircie

#Création d'une liste d'identifiants de zone, tri croissant des rangs, accroissement des abres
ListeId <- as.data.frame(unique(treefile$Id))
ListeId <- ListeId[order(ListeId[,1]),]
ListeId <- data.frame(ListeId)
treefile$D <- treefile$D + treefile$Acct*Periode
treefile <- treefile[order(treefile$Id,treefile$Rang),]
treefile$g <- pi * ((treefile$D * 0.01)^2)/4

#Création d'une dataframe vide poiur stocker les résultats
treefile1 <- data.frame(matrix(ncol = 10,))
colnames(treefile1) <- c("ID_tree","X","Y","D","Id","Id_trouee","Surface","Acct","Rang","g")

#Autoéclaircie par zone, et stockage dans la dataframe
i=1
while (i <= nrow(ListeId)) {
  zone <- subset(treefile, Id == ListeId[i,])
  while (sum(zone$g)/(mean(zone$Surface)/10000) >= Gmax) {
    zone <- zone[-1,]
  }
  assign(paste("Ghazone",i),sum(zone$g)/(mean(zone$Surface)/10000))
  treefile1 <- rbind(treefile1,zone)
  i<-i+1
}

#-----------------------------------------------------------------Réorganisation et export du nouveau treefile-----------------------------------------------

#Suppression de la ligne "NA" dans la dataframe
treefile1 <- treefile1[-1,]

#Réorganisation de la dataframe


#Croissance des arbres dans les trouées
trouees <- subset(treefile_init,Id_trouee==date)
trouees$D <- trouees$D + trouees$Acct*Periode

#Jointure des dataframes et export du treefile
treefile1 <- treefile1[,c(-9,-10)]
treefile <- rbind(treefile1, trouees)
date <- annee_init + (j+1)*Periode
filename <- paste("treefile_",date,".txt",sep="")
write.table(treefile, file = filename,row.names = F, col.names = c("ID_tree","X","Y","D","Id","Id_trouee","surface","Acct"), dec =
",", sep = "\t")

treefileRF3D <- as.data.frame(cbind(treefile$X,treefile$Y,treefile$D))
treefileRF3D$espace <- ""
colnames(treefileRF3D) <- c("X","Y","D","espace")
treefileRF3D <- as.data.frame(cbind(treefileRF3D$espace,treefileRF3D$X,treefileRF3D$Y,treefileRF3D$D))
filename <- paste("treefileRF3D_",date,".txt",sep="")
write.table(treefileRF3D, file = filename, quote = FALSE, row.names = F,dec = ".", sep = " ")


j <- j+1
```

Annexe 4 : Protocole de relevé des données de terrain

- **Pré-cartographie**

La première étape du travail consiste à déterminer des zones homogènes du point de vue des peuplements forestiers et des caractéristiques topographiques.
Cette détermination s'opère sous SIG, par photo-interprétation.
Dans le cas de cette étude, la phase de photo-interprétation a été facilitée par les résultats d'une étude INTERREG qui visait à effectuer un zonage de l'ensemble des forêts à rôle de protection, pour toute la région grenobloise. L'utilisation des couches SIG issues de cette étude a été donc permis de gagner du temps.

- **Choix de l'effort d'échantillonnage**

Le choix de l'effort d'échantillonnage dépend de la précision désirée sur les résultats.

$$e_r = \frac{t \times CV}{\sqrt{n}}$$

- CV correspond au coefficient de variation. Il traduit l'homogénéité du phénomène que l'on souhaite mesurer.
- n correspond au nombre de placettes.
- t est une valeur que l'on doit lire dans la table de la loi de Student. Elle doit être lue à la ligne correspondant à n-1.

Il est donc possible de calculer le nombre de placette minimal à réaliser pour obtenir l'erreur relative voulue sur les résultats.

Compte tenu du choix des paramètres, le nombre théorique de placettes est égal à 42 dans le cadre de la présente étude.

- **Plan d'échantillonnage**

Compte tenu des difficultés de déplacement observées dans les zones montagneuses, le choix d'un plan d'échantillonnage de type systématique ne semble pas le plus judicieux.
Pour gagner du temps, les placette ont donc été disposées en grappes de 5, et le cheminement entre les placettes a été réfléchi pour que l'opérateur puisse suivrent au maximum les courbes de niveau.

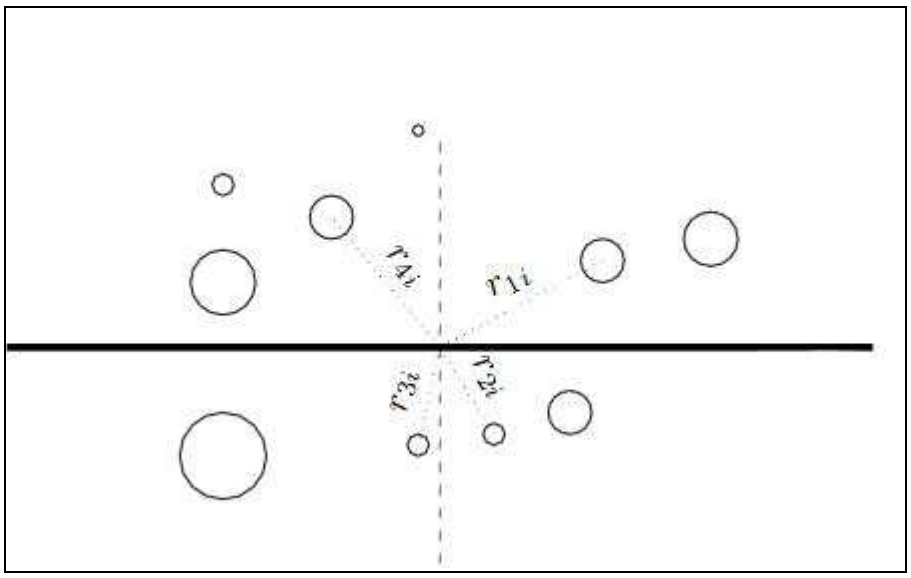
- **Placettes PCQM**

La méthode PCQM (Point-Centred Quarter Method) s'apparente aux placettes à nombre d'arbres fixe. Elle en diffère par le fait que l'on recherche, pour chaque quart de placette, l'individu le plus proche du centre. De ce fait la forme de la placette n'est pas circulaire. La méthode nécessite de fixer au préalable la population concernée par l'échantillonnage.
Dans notre cas, on distingue trois populations :

- les cépées de taillis
- les tiges de francs-pieds d'un diamètre inférieur à 27,5 cm
- les tiges de francs-pied d'un diamètre supérieur à 27,5 cm.

La division de la placette en quatre quarts se fait à la boussole, soit en se servant du sens de cheminement, soit en utilisant les 4 points cardinaux. En plus du jalon central, il suffit de 2 jalons pour délimiter les 4 quarts. Ils seront numérotés dans le sens des aiguilles d'une montre.

La méthode consiste à mesurer la distance du centre de la placette au milieu de l'individu pour chacune des populations souhaitées et pour chacun des quarts de placettes (Mitchell, 2007). En cas d'arbres penchés, c'est le pied de l'arbre qui sert de référence.



L'intérêt principal de la méthode PCQM réside dans sa rapidité de mise en œuvre. Elle se révèle très efficace (bon coefficient de variation pour un faible effort d'échantillonnage), y compris pour une distribution agrégée des individus. C'est une méthode adaptée à la mesure du taillis.
Cette méthode est donc particulièrement appropriée aux peuplements rencontrés sur les versants aux alentours de Grenoble.

Les données à relever sur chaque placette sont résumées dans la fiche de relevé présentée en page suivante.

Fiche de relevé de terrain

Lieu / site :	
N° polygone :	
N° placette :	
Pente moyenne (%) :	
Hauteur de falaise facultatif (m) :	

Date :	
Altitude :	
Type sol* :	
Nature roche :	

Zone :	Départ	Transit	Dépôt

Rugosité (m)	Rg10	Rg20	Rg70

Quart	Population	Distance (m)	Diamètre (cm)	Essence
1	7,5 cm < D < 27,5 cm			
	D > 27,5 cm			
	Cépée : Largeur (m) : Profondeur (m) : Nb de brins :			
2	7,5 cm < D < 27,5 cm			
	D > 27,5 cm			
	Cépée : Largeur (m) : Profondeur (m) : Nb de brins :			
3	7,5 cm < D < 27,5 cm			
	D > 27,5 cm			
	Cépée : Largeur (m) : Profondeur (m) : Nb de brins			
4	7,5 cm < D < 27,5 cm			
	D > 27,5 cm			
	Cépée : Largeur (m) : Profondeur (m) :			

Blocs	Longueur	Largeur	Epaiseur	Forme
1				
2				
3				
4				
5				

* codes sol :

1. Rivière, marécage, sol très mou
2. Sol lache >100cm
3. Sol lache <100cm
4. Piste, ébouli fins, sol moyennement compacté
5. Eboulis grossiers, sol compacté avec pierres
6. Route goudronnée, roche mère
7. Roche mère

Distance horizontale

Annexe 5 : Données IFN utilisées dans l'étude

Ces tableaux sont issus de l'étude économique du programme INTERREG « Forêts de protection »

- **Accroissement annuel sur le diamètre**

Classes de diamètre	Département	Epicéa commun	Sapin pectiné	Hêtre	Pin sylvestre	Châtaignier	Chênes	Charme
10	38	0.10	0.11	0.07	0.08	0.21	0.08	0.14
	74	0.14	0.09	0.07	0.07	0.06	0.09	0.12
	73	0.13	0.18	0.08	0.13	0.13	0.07	0.09
	Moyenne Essence	0.13	0.13	0.08	0.09	0.13	0.08	0.11
15	38	0.17	0.14	0.10	0.12	0.17	0.10	0.13
	74	0.15	0.10	0.08	0.11	0.13	0.09	0.09
	73	0.18	0.22	0.10	0.13	0.16	0.08	0.10
	Moyenne Essence	0.17	0.15	0.09	0.12	0.15	0.09	0.11
20	38	0.21	0.16	0.13	0.11	0.14	0.11	0.14
	74	0.14	0.21	0.12	0.04	0.12	0.10	0.10
	73	0.23	0.23	0.11	0.14	0.13	0.09	0.11
	Moyenne Essence	0.19	0.20	0.12	0.10	0.13	0.10	0.12
25	38	0.20	0.18	0.15	0.08	0.19	0.13	0.17
	74	0.23	0.28	0.16	0.09	0.20	0.10	0.12
	73	0.24	0.22	0.14	0.14	0.21	0.09	0.15
	Moyenne Essence	0.22	0.23	0.15	0.10	0.20	0.10	0.15
30	38	0.21	0.20	0.16	0.10	0.17	0.14	0.35
	74	0.21	0.27	0.17	0.04	0.16	0.13	0.25
	73	0.21	0.22	0.14	0.10	0.17	0.10	0.25
	Moyenne Essence	0.21	0.23	0.16	0.08	0.17	0.12	0.28
35	38	0.22	0.18	0.18	0.11	0.20	0.18	0.17
	74	0.20	0.20	0.15	0.17	0.17	0.12	0.23
	73	0.19	0.26	0.17	0.12	0.34	0.13	0.28
	Moyenne Essence	0.20	0.22	0.17	0.13	0.24	0.14	0.22
40	38	0.21	0.23	0.20	0.10	0.19	0.20	0.21
	74	0.22	0.25	0.18	0.24	0.25	0.15	0.17
	73	0.21	0.25	0.17	0.14	0.21	0.13	0.61
	Moyenne Essence	0.21	0.25	0.18	0.16	0.22	0.16	0.33
45	38	0.21	0.31	0.21	0.10	0.25	0.23	0.23
	74	0.22	0.27	0.16	0.06	0.33	0.19	
	73	0.22	0.24	0.21	0.12	0.17	0.16	
	Moyenne Essence	0.22	0.27	0.19	0.09	0.25	0.20	0.23
50	38	0.25	0.22	0.22	0.09	0.14	0.19	
	74	0.21	0.28	0.21		0.15	0.14	
	73	0.24	0.24	0.21	0.09	0.30	0.13	
	Moyenne Essence	0.23	0.25	0.21	0.09	0.20	0.15	
55	38	0.25	0.29	0.22	0.08	0.12	0.17	
	74	0.23	0.35	0.18		0.24	0.16	
	73	0.23	0.29	0.25	0.08	0.11	0.20	
	Moyenne Essence	0.24	0.31	0.22	0.08	0.15	0.18	
60	38	0.25	0.27	0.24	0.08	0.20	0.17	
	74	0.26	0.26	0.23		0.17	0.25	
	73	0.22	0.32	0.18		0.22	0.10	
	Moyenne Essence	0.24	0.28	0.22	0.08	0.20	0.18	
65 et +	38	0.19	0.28	0.27		0.09	0.15	
	74	0.22	0.33	0.19		0.25	0.14	
	73	0.31	0.31	0.22		0.13	0.09	
	Moyenne Essence	0.24	0.31	0.22		0.16	0.13	
Moyenne	**38**	**0.20**	**0.22**	**0.18**	**0.09**	**0.17**	**0.15**	**0.19**
	74	**0.20**	**0.24**	**0.16**	**0.10**	**0.19**	**0.14**	**0.16**
	73	**0.22**	**0.25**	**0.17**	**0.12**	**0.19**	**0.11**	**0.23**
	Moyenne Essence	**0.21**	**0.24**	**0.17**	**0.10**	**0.18**	**0.14**	**0.19**

- **Mortalité des arbres de diamètre supérieur à 30 cm observée sur les placettes IFN**

Essences	Mortalité des arbres de diamètre supérieur à 30 cm (en nombre en nombre de tiges)
Epicéa commun	2%
Sapin pectiné	3%
Hêtre	2%
Pin Sylvestre	19%
Châtaignier	8%
Chênes	5%
Charme	3%

- **Surface terrière maximale observée sur les placettes IFN.**

	Essences concernées	Surface terrière maximale observée
Essences pures	Sapin seul	80 - 85 m²/ha
	Epicéa seul	80 - 85 m²/ha
	Hêtre seul	80 - 85 m²/ha
	Châtaignier seul	70 - 75 m²/ha
	Chênes seuls	60 m²/ha
	Pin sylvestre	75 m²/ha
Essences en mélange	Sapin - Hêtre - Epicéa	80 - 85 m²/ha
	Chênes - Charme - Châtaignier	60 - 65 m²/ha
	Pin sylvestre - Mélèze d'europe	50 - 55 m²/ha