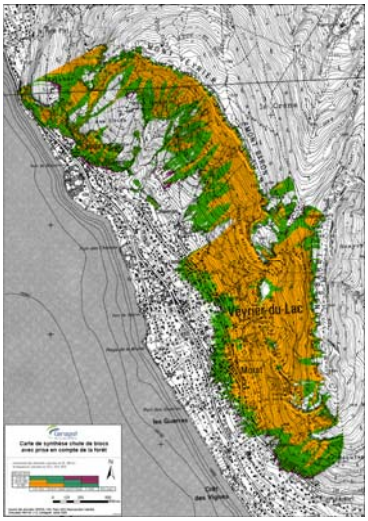
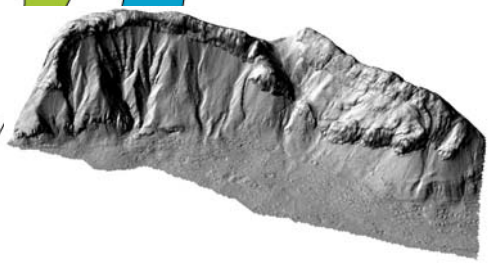




Expertise trajectographique en 3 dimensions, de l'aléa chute de pierres et de blocs rocheux, pour l'aide à la réalisation de la révision du PPR de la commune de Veyrier-du-Lac

Coordinateur de l'expertise : F. BERGER

31 août 2009

Cemagref
Sciences, eaux & territoires

UR- Ecosystèmes Montagnards

Centre de Grenoble • Domaine universitaire, 2 rue de la Papeterie, BP 76, F-38402 Saint-Martin-d'Hères cedex
Tel. +33 (0)4 76 76 27 27 • Fax +33 (0)4 76 51 38 03 • www.cemagref.fr

Personnels du Cemagref ayant participé à la réalisation de cette expertise :
F.BERGER, N. CLOUET, J-M. MONNET, J. LOPEZ, E. MERMIN,
P.TARDIF, C. BIGOT, O. JANCKE

Errata

Suite à un problème de compatibilité de police d'imprimante entre les documents cartographiques SIG et l'imprimante du Cemagref, le signe égal a disparu des symboles ≤ et ≥ des légendes des documents cartographiques. Le tableau ci-dessous présente les bornes des intervalles à utiliser avec les cartes de ce rapport.

Energie moyenne en kJ	$E \leq 30$				
	$30 < E \leq 300$				
	$300 < E$				
		$PA \geq 10^{-2}$	$10^{-2} > PA \geq 10^{-4}$	$10^{-4} > PA \geq 10^{-6}$	$10^{-6} > PA$
		Probabilité d'atteinte			

Table des matières

Contexte de l'étude 8
Objet de l'expertise du Cemagref 10
Phase 1 : prise de contact initiale avec le secteur d'étude. 10
Phase 2 : relevés de terrain et acquisition des données topographiques 11
Phase 3 : détermination de l'aléa de référence centennal 13
Phase 4 : prédétermination globale des enveloppes de propagation des projectiles rocheux avec le principe de la ligne d'énergie 14
Phase 5 : réalisation des travaux de simulations trajectographiques en 3 dimensions pour le scénario à terrain nu. 16
Phase 6 : réalisation des travaux de simulations trajectographiques en 3 dimensions en tenant compte de la végétation forestière actuellement présente sur le site d'étude 17
Phase 7 : Analyse du rôle de protection de la végétation forestière actuellement présente sur le site d'étude 19
Là encore, les résultats sont exprimés sous la forme de carte de synthèse. 19
Phase 8 : Rédaction du rapport de synthèse et transmission au commanditaire de l'expertise 20
Présentation succincte de la technologie Lidar 20
Figure 8 : Balayage laser à partir d'un avion 21
Figure 9 : Principe de différenciation des échos. 21
Présentation des outils de simulations utilisés 24
Le modèle de détermination des zones de départ probable à partir d'un MNT 24
Le principe de la ligne d'énergie et l'utilitaire Rockfor^{LIN} 25
La figure suivante présente l'expression cartographique de ces seuils. 26
Figure 15 : Expression cartographique des seuils de ligne d'énergie utilisés par le Cemagref. 26
Le modèle de simulation trajectographique en 3dimension : Rockyfor3D 27
Figure 16 : représentation schématique du modèle Rockyfor 3D. 28
Figure 18 : utilitaire visuel pour l'aide à la détermination des classe Rg10, 20 et 70% 30
Résultats des inventaires de terrain 31
Carte 1 : Carte de localisation des placettes d'inventaire. 32
Carte 3 : Courbes de niveau de la carte au 1/25000 de l'IGN 35
Carte 4 : Courbes de niveau obtenues par interpolation du MNT Lidar au pas de 1*1m 37
Carte 5 : Courbes de niveau obtenues par interpolation du MNT de l'IGN au pas de 50*50m 38
Carte 6 : Carte des types de végétation forestière utilisée pour les travaux de simulations 40
Carte 7 : Carte des coefficients de restitution normale 41
Carte 11 : Carte des points de départ utilisés pour les travaux de simulation 47
Détermination de l'aléa de référence centennal 48
Résultat des simulations trajectographiques avec Rockyfor3D 56
Proposition de cartes de synthèses de l'aléa chutes de pierres et de blocs rocheux 79
Comparaison des résultats du cemagref aux études ADRGT 1989, SAGE 2007, IMSRN 2002 et Géolithe 2007 et 2008. 90
Conclusion 99

Listes des figures, cartes et tableaux

Figure 1 : Présentation schématique de la première phase de la démarche méthodologique du Cemagref de Grenoble. 11
Figure 2 : Présentation schématique de la deuxième phase de la démarche méthodologique du Cemagref de Grenoble. 13
Figure 3 : Présentation schématique de la troisième phase de la démarche méthodologique du Cemagref de Grenoble. 14
Figure 4 : Présentation schématique de la quatrième phase de la démarche méthodologique du Cemagref de Grenoble. 15
Figure 5 : Présentation schématique de la cinquième phase de la démarche méthodologique du Cemagref de Grenoble. 17
Figure 6 : Présentation schématique de la sixième phase de la démarche méthodologique du Cemagref de Grenoble. 19
Figure 7 : Présentation schématique de la septième phase de la démarche méthodologique du Cemagref de Grenoble. 20
Figure 8 : Balayage laser à partir d'un avion. 21
Figure 9 : Principe de différenciation des échos. 21
Figure 10 : Exemple de MNS obtenu par traitement de donnée lidar (extraction d'une zone du territoire de la commune de Veyrier-du-Lac)..... 22
Figure 11 : Exemple de MNT obtenu par traitement de donnée lidar (extraction d'une zone du territoire de la commune de Veyrier-du-Lac)..... 23
Figure 12 : Exemple de MNE (classement en fonction de la hauteur des obstacles obtenue par traitement de donnée lidar (extraction d'une zone du territoire de la commune de Veyrier-du-Lac)..... 23
Figure 13 : Exemple de valeur d'angle de pente sur MNT et dans la réalité (pour des questions de lisibilité de la représentation schématique les angles ont volontairement exagérés sur le schéma)..... 24
Figure 14 : Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β. 25
Figure 15 : Expression cartographique des seuils de ligne d'énergie utilisés par le Cemagref. 26
Figure 16 : représentation schématique du modèle Rockyfor 3D. 28
Figure 17 : Fiche de relevé de terrain pour l'utilisation de Rockyfor 3D. 30
Figure 18 : utilitaire visuel pour l'aide à la détermination des classe Rg10, 20 et 70%. 30
Figure 18 : vue en 3D du territoire de la commune de Veyrier-du-Lac réalisé avec le MNT Lidar au pas de 1m. 34
Figure 19 : vue en 3D du territoire de la commune de Veyrier-du-Lac réalisé avec le MNT ce l'IGN au pas de 50m. 34
Figure 20 : Visualisations de face, profil et en contreplongée, pour une maison individuelle située dans la commune de Veyrier-du-Lac, des données lidar du MNE et photographie de la maison. 39

Carte 0 : Localisation de la commune de Veyrier du Lac. 8
Carte 1 : Carte de localisation des placettes d'inventaire..... 32
Carte 2 : Carte, photo et vue lidar 3D de localisation des placettes d'analyse dendrogéomorphologique (en rouge les placettes situées en pied de falaise et en vert les deux placettes situées dans le couloir). 33
Carte 3 : Courbes de niveau de la carte au 1/25000 de l'IGN..... 35
Carte 4 : Courbes de niveau obtenues par interpolation du MNT Lidar au pas de 1*1m. 37
Carte 5 : Courbes de niveau obtenues par interpolation du MNT de l'IGN au pas de 50*50m. 38
Carte 6 : Carte des types de végétation forestière utilisée pour les travaux de simulations..... 40
Carte 7 : Carte des coefficients de restitution normale. 41
Carte 8 : Carte de la rugosité présente sur 10% (Rg10) de la surface des unités géomorphologique, exprimée en hauteur moyenne des matériaux présents sur 10% de la surface de référence..... 42
Carte 9 : Carte de la rugosité présente sur 20% (Rg20) de la surface des unités géomorphologique, exprimée en hauteur moyenne des matériaux présents sur 20% de la surface de référence..... 43
Carte 10 : Carte de la rugosité présente sur 70% (Rg70) de la surface des unités géomorphologique, exprimée en hauteur moyenne des matériaux présents sur 70% de la surface de référence..... 44
Carte 10 : Carte des pentes calculées à partir du MNT Lidar au pas de 1*1m et exprimées en degrés. 46
Carte 11 : Carte des points de départ utilisés pour les travaux de simulation..... 47
Carte 12 : Carte de prédétermination des zones de propagation maximale probable obtenues avec l'utilitaire RockforLIN et pour des valeurs de ligne d'énergie de 32, 35 et 38°..... 49
Carte 13 : Comparaison de la carte de prédétermination des zones de propagation maximale probable obtenues avec l'utilitaire RockforLIN avec la localisation des points d'arrêt recensés dans la carte de localisation des évènements naturels historiques établie par le RTM de Haute-Savoie. 50
Carte 14 : Carte de découpage du territoire communal en 9 secteurs de simulation en fonction de l'estimation du volume de l'aléa de référence centennal. 51
Carte 15 : Enveloppe de propagation maximale obtenue pour le scénario sans prise en compte de la forêt..... 57
Carte 16 : Enveloppe de propagation maximale obtenue pour le scénario avec prise en compte de la forêt..... 58
Carte 17 : Différence des enveloppes de propagation des blocs rocheux entre les simulations avec et sans prise en compte de la forêt. 59
Carte 18 : Carte des points d'arrêt des blocs exprimés en fonction du volume unitaire de dépôt obtenue pour le scénario sans prise en compte de la forêt. 61
Carte 19 : Carte des points d'arrêt des blocs exprimés en fonction du volume unitaire de dépôt obtenue pour le scénario avec prise en compte de la forêt..... 62
Carte 20 : Fréquence de passage des blocs (ou d'atteinte d'un point) pour le scénario sans prise en compte de la forêt. 63
Carte 21 : Fréquence de passage des blocs (ou d'atteinte d'un point) pour le scénario avec prise en compte de la forêt. 64
Carte 22 : Différence des fréquences de passage des blocs (ou d'atteinte d'un point) avec et sans prise en compte de la forêt. 66
Carte 26 : Energie cinétique moyenne des blocs pour le scénario sans prise en compte de la forêt. 67

Carte 27 : Energie cinétique moyenne des blocs pour le scénario avec prise en compte de la forêt. 68
Carte 28 : Différence des énergies cinétiques moyennes des blocs avec et sans prise en compte de la forêt. 69
Carte 29 : Energie cinétique maximale des blocs pour le scénario sans prise en compte de la forêt. 71
Carte 30 : Energie cinétique maximale des blocs pour le scénario avec prise en compte de la forêt. 72
Carte 31 : Différence des énergies cinétiques maximales des blocs avec et sans prise en compte de la forêt. 73
Carte 32 : Hauteur normale (par rapport à la pente) maximale de passage des blocs pour le scénario sans prise en compte de la forêt. 75
Carte 33 : Hauteur normale (par rapport à la pente) maximale de passage des blocs pour le scénario avec prise en compte de la forêt. 76
Carte 34 : Différence de hauteur normale (par rapport à la pente) maximale de passage des blocs avec et sans prise en compte de la forêt. 77
Carte 35 : Proposition de carte de synthèse de l'aléa chute de pierres pour le scénario sans prise en compte de la forêt. 81
Carte 36 : Proposition de carte de synthèse de l'aléa chute de pierres pour le scénario avec prise en compte de la forêt. 82
Carte 37 : Localisation des points d'arrêt des principaux blocs de l'événement du 20 janvier 2009, dont ceux ayant été le plus loin, sur la carte des fréquence d'atteinte sans prise en compte de la forêt. 83
Carte 38 : Localisation des points d'arrêt des principaux blocs de l'événement du 20 janvier 2009, dont ceux ayant été le plus loin, sur la carte des fréquence d'atteinte avec prise en compte de la forêt. 84
Carte 39 : Localisation des points d'arrêt des principaux blocs de l'événement du 20 janvier 2009, dont ceux ayant été le plus loin, sur la carte de proposition de synthèse de l'aléa sans prise en compte de la forêt. 85
Carte 40 : Localisation des points d'arrêt des principaux blocs de l'événement du 20 janvier 2009, dont ceux ayant été le plus loin, sur la carte de proposition de synthèse de l'aléa avec prise en compte de la forêt. 85
Carte 41 : Comparaison de la carte de synthèse de l'aléa pour le scénario sans prise en compte de la forêt avec la localisation des points d'arrêt recensés dans la carte de localisation des évènements naturels historiques établie par le RTM de Haute-Savoie. 87
Carte 42 : Comparaison de la carte de synthèse de l'aléa pour le scénario avec prise en compte de la forêt avec la localisation des points d'arrêt recensés dans la carte de localisation des évènements naturels historiques établie par le RTM de Haute-Savoie. 88
Carte 43 : Différences des cartes de synthèse de l'aléa chutes de pierre avec et sans prise en compte de la forêt. 89
Carte 44 : Comparaison des résultats de l'étude ADRGT 1989 et ceux du Cemagref pour le scénario sans prise en compte de la forêt. 91
Carte 45 : Comparaison des résultats de l'étude ADRGT 1989 et ceux du Cemagref pour le scénario avec prise en compte de la forêt. 91
Carte 46 : Comparaison des résultats de l'étude ADRGT 1989 et ceux du Cemagref pour le scénario sans prise en compte de la forêt. 92
Carte 47 : Comparaison des résultats de l'étude ADRGT 1989 et ceux du Cemagref pour le scénario avec prise en compte de la forêt. 92
Carte 48 : Comparaison des résultats de l'étude IMSRN 2002 et ceux du Cemagref pour le scénario sans prise en compte de la forêt. 94

Carte 49 : Comparaison des résultats de l'étude IMSRN 2002 et ceux du Cemagref pour le scénario avec prise en compte de la forêt. 94
Carte 50 : Comparaison des résultats de l'étude Géolithe 2007 et ceux du Cemagref pour le scénario sans prise en compte de la forêt. 95
Carte 52 : Carte des types de peuplements forestiers selon la composante densité (nombre d'arbre à l'hectare). 97
Carte 53 : Carte des types de peuplements forestiers selon la composante diamètre moyen des arbres (mesurés à 1,30m par rapport au sol) 98

Tableau 1 : Histogramme de répartition pour les arbres analysés du nombre de blessures par chutes de pierres en fonction des années (donnée Cemagref 2008). 54
Tableau 2 : Nombre de simulations réalisées par secteur d'étude. 55
Tableau 3 : Traduction des valeurs de 30 et 300 kJ d'énergie en hauteur de chute libre et vitesse équivalentes pour des blocs rocheux en calcaire de 1, 2 et 5m^3. 66
Tableau 4 : Tableau comparatif des seuils de zonage d'aléa dans les précédentes études trajectographiques réalisées avant celle du Cemagref. NB : l'ADRGT et SAGE sont en fait le même bureau d'étude. 79
Tableau 5 : Proposition de seuillage par le Cemagref pour les classes des probabilités d'atteinte. 79
Tableau 6 : Matrice de qualification de l'aléa chutes de pierres proposé par le Cemagref. 80

Expertise trajectographique en 3 dimensions, de l'aléa chute de pierres et de blocs rocheux, pour l'aide à la réalisation de la révision du PPR de la commune de Veyrier-du-Lac

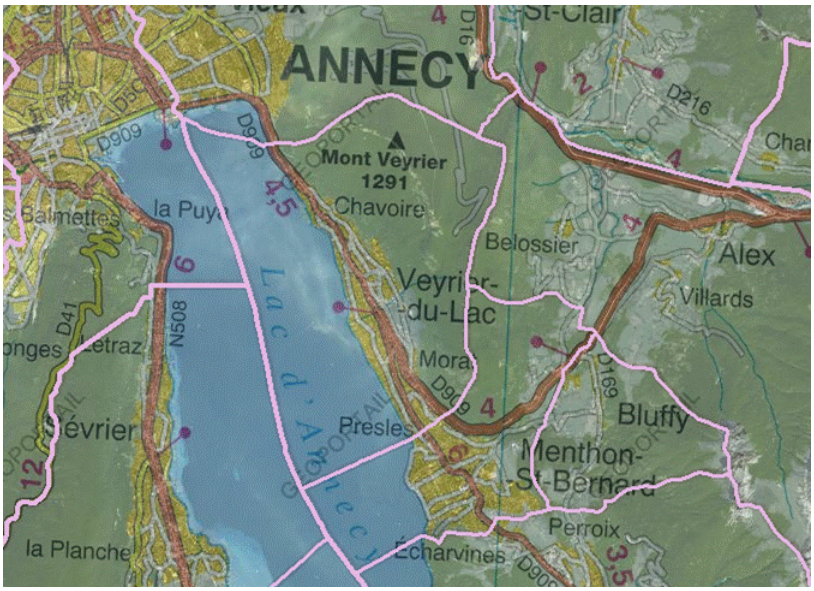
Rapport de synthèse

Note au lecteur : les auteurs de ce rapport tiennent à remercier l'ensemble des personnes et services qui ont mis à leur disposition tous les documents (rapports d'études, photographies) relatifs à l'aléa chutes de pierres sur le territoire de la commune de Veyrier-du-Lac.

Contexte de l'étude

La commune de Veyrier-du-Lac, couvrant un territoire d'un peu plus de 8 km^2, est située dans un contexte géologique tel, (décrit dans les documents : Géolithe mars 2007 et PPR-livret I novembre 2007), que l'occurrence de phénomènes de chutes de pierres et de blocs rocheux peut s'avérer importante. Depuis 1950, ce n'est pas moins de 23 évènements (avérés par témoignages et archives) qui ont été recensés par le service RTM, dont 13 depuis l'année 1994. La date de 1994 est importante car, le 18 mai 1994, Monsieur le Préfet de la Haute-Savoie a approuvé pour cette commune et après enquête publique, la cartographie réglementaire réalisée en application de l'article R.111.3 du Code de l'urbanisme.

A compter de cette date ce document a valeur de plan de prévention des Risques naturels. En 2003 un événement au lieu dit du Péril a mis en évidence la justesse du zonage de 1994 à cet endroit. Du fait de cet événement et de ceux de 2004, 2005 et 2006, Madame le maire a demandé à Monsieur le Préfet de la Haute-Savoie de prescrire la révision du PPR de 1994.



Carte 0 : Localisation de la commune de Veyrier du Lac.

L'analyse de l'aléa chutes de pierres nécessite de déterminer en premier lieu le volume maximale le plus probable des projectiles susceptibles de se détacher sur une période de temps donnée, souvent dénommé « aléa de départ », et en second lieu la zone probable de propagation (dénommé « aléa de propagation ») des projectiles de l'aléa de départ. La cartographie de l'aléa de propagation peut, en fonction des outils utilisés, se limiter à la cartographie de la limite maximale de la zone de propagation des projectiles ou, au contraire, être exprimée en zones correspondantes à différents seuillages de paramètres calculés : probabilité d'atteinte, énergie maximale de passage, énergie moyenne de passage, hauteur maximale de passage, etc. Autant la première cartographie peut être réalisée à dire d'expert et avec un inventaire de terrain, autant le calcul des paramètres cinématiques ne peut se faire qu'avec l'aide d'un outil de simulation trajectographique. Depuis 1983, des progrès importants ont été réalisés dans le domaine de la simulation numérique trajectographique et ces outils sont de plus en plus utilisés comme outil d'aide à la réalisation du volet chutes de pierres des PPR. Ils permettent en effet de fournir, aux experts des services en charge de la réalisation des PPR, des cartes d'aide à la décision pour la réalisation de la carte de l'aléa chutes de pierre puis celle du zonage règlementaire. En parallèle à ces progrès dans le domaine des outils d'analyse trajectographique, celui réalisé dans le développement et l'utilisation des systèmes d'informations géographiques (permettant de croiser et d'analyser différentes couches d'informations géographiques) permet d'offrir également aux experts de nouveaux outils pour mieux déterminer l'emprise des aléas.

Au regard de l'intérêt de disposer d'une étude trajectographique lors de la réalisation d'un PPR, la commune de Veyrier-du-Lac a commandé en 2007, dans le cadre de la révision du PPR de 1994, au bureau d'étude Géolithe une étude portant sur les risques de chutes de pierres et d'éboulement rocheux en provenance des parois rocheuse surplombant l'agglomération.

Plusieurs études trajectographiques sur des secteurs restreints du territoire communal avaient déjà été faites avant la réalisation de l'étude Géolithe mars 2007 sur la totalité du territoire communal : ADRGT 1989, ADRGT 1994, IMSRN 2002. Pour les secteurs concernés, les résultats des études ADRGT 1989 et IMSRN 2002 ne convergent pas avec ceux de l'étude Géolithe mars 2007. Au regard de ces divergences, trois propriétaires, en désaccord avec les résultats de l'étude Géolithe mars 2007, ont commandé au regard de leurs parcelles des études trajectographiques complémentaires. Messieurs Wotus, Plantier et Meige (les deux derniers s'étant regroupés pour une commande commune) ont ainsi missionné respectivement les bureaux d'études Géolithe (février 2008) et SAGE (septembre 2007) pour réaliser de nouvelles études trajectographiques. Il faut préciser que Monsieur WOTUS avait fait réaliser l'étude IMSRN 2002. Là encore au regard des zones concernés par ces deux études complémentaires, les résultats de celles-ci ne convergent pas avec celle de l'étude Géolithe mars 2007. Il apparaît ainsi qu'au regard de la propriété de Monsieur Wotus le bureau d'étude Géolithe n'a pas interprété de la même manière ces résultats d'analyse trajectographique entre l'étude de mars 2007 et celle de février 2008.

Il ressort de ces divergences et de la critique faite lors de l'enquête publique sur la délimitation des zones règlementaires du PPR que le commissaire enquêteur a donné **un avis favorable** au projet issu de la révision du PPR de la commune de Veyrier-du-Lac **<u>sous réserve</u> que la définition de la zone exposée située en limite inférieure soit étudiée plus en détail afin de préciser le niveau de l'aléa en fonction de la topographie et des conditions locales.**

Il est important de préciser que toutes les études trajectographique réalisées entre 1994 et 2008 ont été faites avec des outils de simulation en 2 dimensions, simulant la propagation des blocs rocheux le long d'un profil en long, et à ce titre ne pouvaient prendre en compte des déviations latérales. La spatialisation des résultats obtenus avec un logiciel en 2 dimensions nécessite d'interpoler les résultats obtenus entre deux profils en long. Cette interpolation peut s'avérer être une source d'erreur importante si la topographie réelle du terrain n'est pas correctement intégré dans le raisonnement.

Objet de l'expertise du Cemagref

Dans le domaine de la simulation trajectographique, la prise en compte réaliste de la topographie (thalweg, ligne de crête, accident de terrain,..) et des conditions locales (l'occupation du sol par la végétation forestière par exemple) nécessite de disposer d'un outil de simulation capable d'intégrer les 3 dimensions (x,y,z) de l'espace d'analyse et de prendre en compte l'action de dissipation d'énergie de la végétation forestière.

Depuis 1983 le Cemagref de Grenoble travail sur la caractérisation du comportement mécanique des arbres lors de l'impact d'un bloc rocheux et depuis 1998 il participe au développement de Rockyfor3D le premier logiciel opérationnel à ce jour de simulation trajectographique en 3 dimensions et capable d'intégrer l'action de la végétation forestière. Ce modèle a, entre autre, été validé par la réalisation d'expérimentation grandeur nature de chutes de bloc (1997, 2003, 2004 et 2005) sur les sites expérimentaux de Vailly (74) et de Vaujany (38). Le Cemagref est un Etablissement Public à caractère Scientifique et Technique sous la tutelle du Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, et du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

Au regard du savoir faire du Cemagref de Grenoble dans le domaine des expertises trajectographiques et des outils de simulation développés par celui-ci, le Service Aménagement, Risques de la DDEA de Haute-Savoie a donc décidé de le missionner pour réaliser une expertise trajectographique en 3 dimensions avec et sans prise en compte de la végétation forestière présente sur la totalité du territoire de la commune de Veyrier-du-Lac.
Cette expertise a deux objectifs :

- Le premier est de fournir aux experts en charge de la révision du PPR de la commune de Veyrier-du-Lac les données nécessaires à la réalisation de la carte de l'aléa « chutes de pierres » en absence de toute végétation forestière afin d'apprécier l'aléa chute de pierre potentiel maximal,
- Le deuxième est de fournir les données nécessaires à la caractérisation de l'action de protection réelle et actuelle de la végétation forestière présente sur le territoire communal.

La démarche méthodologique du Cemagref lors de la réalisation d'une expertise trajectographique.
Pour la réalisation d'expertises trajectographiques le Cemagref de Grenoble utilise une démarche méthodologique construite autour de 8 grandes phases d'action, à savoir :

Phase 1 : prise de contact initiale avec le secteur d'étude.

L'objectif de cette phase de travail est double. Le premier est de permettre aux opérateurs en charge de l'expertise de parcourir une première fois et de façon la plus exhaustive possible le secteur d'étude.

Ce premier objectif est très important car les opérateurs vont ainsi pouvoir se faire une première idée générale de la topographie, de l'occupation des sols et surtout des traces d'activités liées aux chutes de pierres. Lors de cette première prise de contact avec le terrain les opérateurs vont prédéterminés par lecture de paysage in situ des zones homogènes d'un point de vue géomorphologique et de type de végétation.

A partir du moment où ce premier parcours de terrain est réalisé, le deuxième objectif de cette tâche de travail consiste alors à collecter l'ensemble des documents disponibles et relatifs aux chutes de pierres : rapports des études trajectographiques déjà réalisées, le PPR, coupures de presse, photographies etc…Avec ces documents les opérateurs vont caractériser les aléas de départs déterminés et utilisés lors de ces travaux.

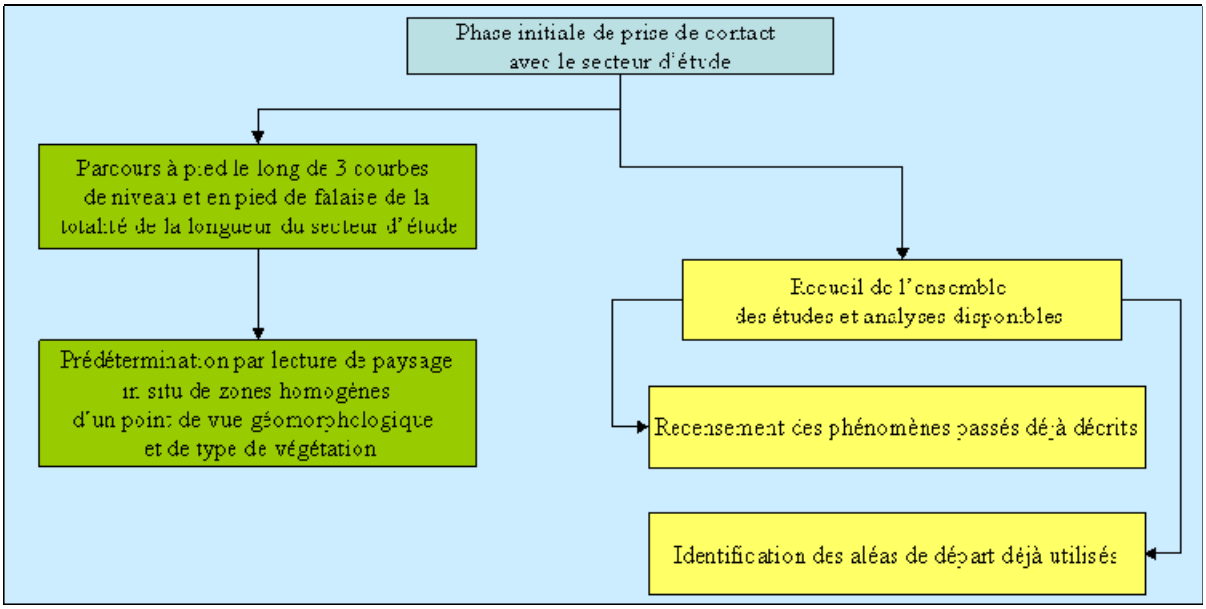


Figure 1 : Présentation schématique de la première phase de la démarche méthodologique du Cemagref de Grenoble.

Phase 2 : relevés de terrain et acquisition des données topographiques

L'utilisation d'outils de simulations de propagations projectiles rocheux nécessite de disposer d'un certain nombre de données relatives à la dimension des projectiles de l'aléa de départ de référence, la topographie, le comportement mécanique des sols et les types de végétation présents sur le site d'étude. De plus, les résultats des travaux de simulations doivent faire l'objet d'une phase de validation par comparaison aux évènements passés (entre autre la localisation des points d'arrêt) et le cas échéant en analysant la convergence des résultats entre différents outils de simulation. Concernant ce dernier point, le Cemagref de Grenoble utilise deux outils de simulations.

Le premier est un modèle statistique qui permet d'obtenir un ordre de grandeur des enveloppes de propagation des projectiles, le deuxième est un modèle de simulation en trois dimensions qui permet, en plus de déterminer les enveloppes de propagation, de calculer les paramètres cinématiques liées aux propagations des projectiles rocheux. Ces deux modèles sont présentés dans le chapitre « Présentation des outils de simulations utilisés ».

Il est important de préciser dès maintenant que le modèle de simulation en 3D du Cemagref de Grenoble nécessite de disposer de cartes représentatives de la répartition spatiale des paramètres relatifs aux propriétés mécaniques des sols et des arbres.

Les objectifs de cette phase de travail sont donc :

- D'acquérir et de valider les données orographiques permettant de construire le modèle numérique de terrain (MNT) qui sera utilisé comme base de données topographiques pour la suite des travaux de simulation. L'utilisation des outils de simulation du Cemagref de Grenoble requiert une représentation de la topographie en 3 dimensions (x,y,z), contrairement aux outils de simulation en 2D qui ne nécessite que des profils en long (x,z). La technologie Lidar (présentée dans le chapitre suivant de ce rapport) permet d'acquérir des MNT de très hautes résolutions (de 5 à 20 points par m^2 avec une précision de l'ordre de 25cm en xy et de 15cm en z). De plus la technologie Lidar permet aussi de disposer des données altimétriques au toit des obstacles présents sur le site d'étude : le modèle numérique de surface (MNS). Des outils d'analyses existent afin d'extraire du MNE des informations relatives aux types de peuplements forestiers : hauteur des arbres, position des arbres dominants, diamètre des arbres dominants (calculé à partir de la hauteur).Le Cemagref travail avec des données Lidar qui sont acquises auprès d'un prestataire de service. A ce titre il est nécessaire de vérifier et valider la qualité des données livrées.
- D'utiliser le MNT pour cartographier les zones de départ des projectiles rocheux. La détermination de cette zone est réalisée en utilisant un modèle de pente développé par le Cemagref.
- De valider la carte des zones de départs par confrontation à la réalité terrain et présentation aux experts de l'Etat en charge de la réalisation du PPR
- De réaliser les relevés de terrain nécessaires à la détermination exhaustive des paramètres nécessaires (paramètres dendrométriques, coefficients de restitution des sols) aux outils de simulations, à la validation du MNT et du MNS.
- De réaliser et valider la traduction cartographique des relevés de terrain.

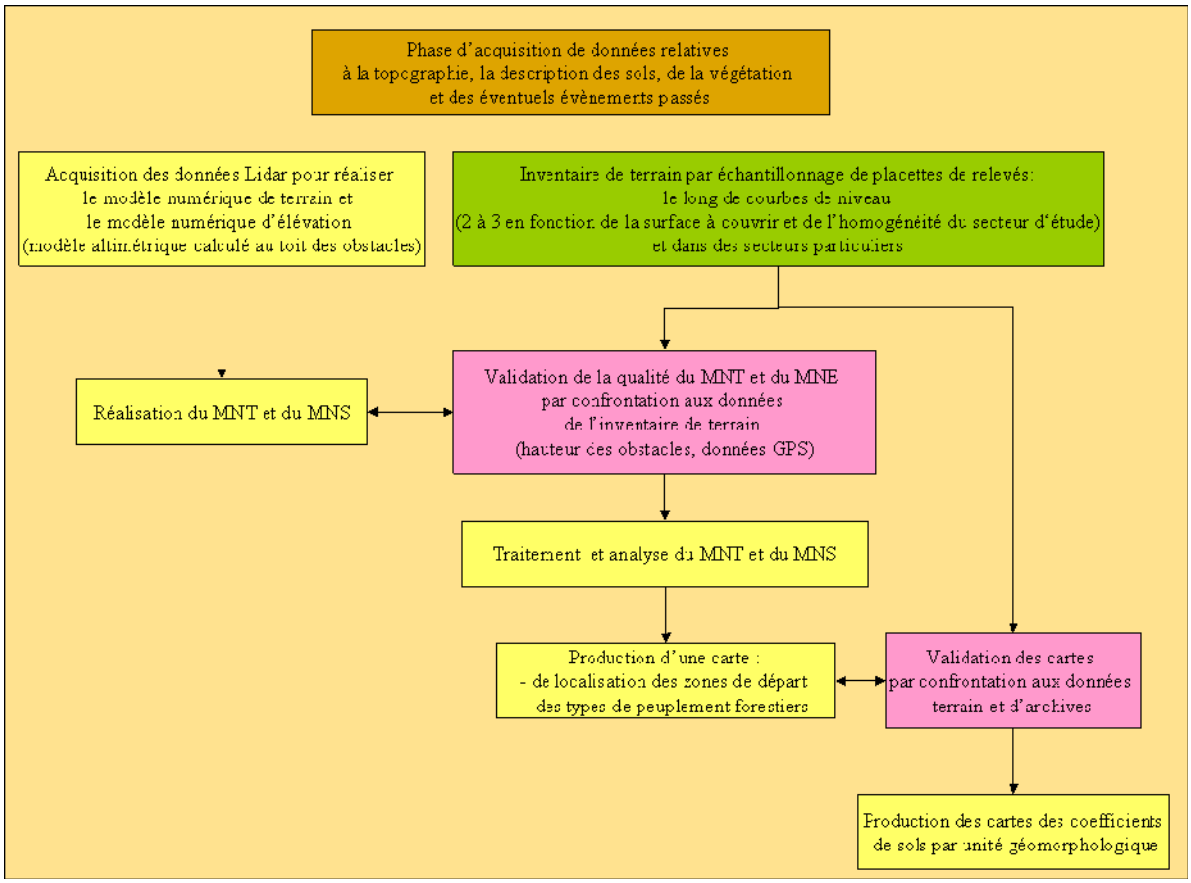


Figure 2 : Présentation schématique de la deuxième phase de la démarche méthodologique du Cemagref de Grenoble.

Phase 3 : détermination de l'aléa de référence centennal

La réalisation d'un PPR nécessite de définir un aléa de référence centennal. Par définition un aléa centennal a une probabilité de 1 chance sur 100 de ce produire chaque année. Il possède ainsi une période de retour centennal et on parle donc d'aléa centennal. La détermination de cet aléa centennal est très importante pour la suite des travaux de simulation. En effet, c'est elle qui va conditionner le choix du volume des projectiles qui seront utilisés lors des simulations. Cette détermination nécessite de connaître l'historicité des évènements sur le secteur d'étude, d'analyser les informations relatives aux anciens projectiles présents sur les points des relevés de terrain réalisés lors de la phase 2 de cette démarche méthodologique, d'analyser les études géologiques réaliser à ce jour sur le secteur d'étude.

L'historicité des phénomènes est déterminée à partir des données d'archives, des fiches évènements du RTM, de témoignage et le cas échéant par analyse dendrogéomorphologique. Le principe d'une analyse dendrogéomorphologique est basée sur le fait qu'il est possible, à partir de l'analyse des cernes de croissance d'un arbre, de déterminer la date de réalisation des blessures occasionnées par des projectiles sur son tronc. Dans les secteurs soumis à des chutes de pierres, il est facile de déterminer les blessures dues à l'impact d'un projectile rocheux et donc la fréquence de ce phénomène. Par contre, une telle analyse ne permet pas de déterminer le volume des projectiles rocheux.

C'est donc une analyse qui fournie des informations relatives à la productivité, tout projectile confondu, des zones de départ et qui est limitée par l'âge des arbres présents sur le site d'analyse. Quoiqu'il en soit elle permet d'obtenir un ordre de grandeur.

Les objectifs de cette phase de travail sont donc :

- De proposer aux experts de l'Etat en charge de la réalisation du PPR un découpage de la zone d'étude en secteurs d'analyse pour lesquels une quantification, en termes de volume, de l'aléa de référence centennal est proposée à partir de l'ensemble des données disponibles et des relevés de terrain.
- De valider ou modifier, par discussion et argumentation avec les experts de l'Etat, nos propositions de découpage en secteurs d'analyse en fonction de notre détermination de l'aléa centennal. Cette détermination des secteurs d'analyse en fonction de l'aléa centennal de référence peut se faire soit par validation directe de nos propositions en cas d'accord avec les experts, soit en cas de désaccord par retour sur le terrain avec les experts.

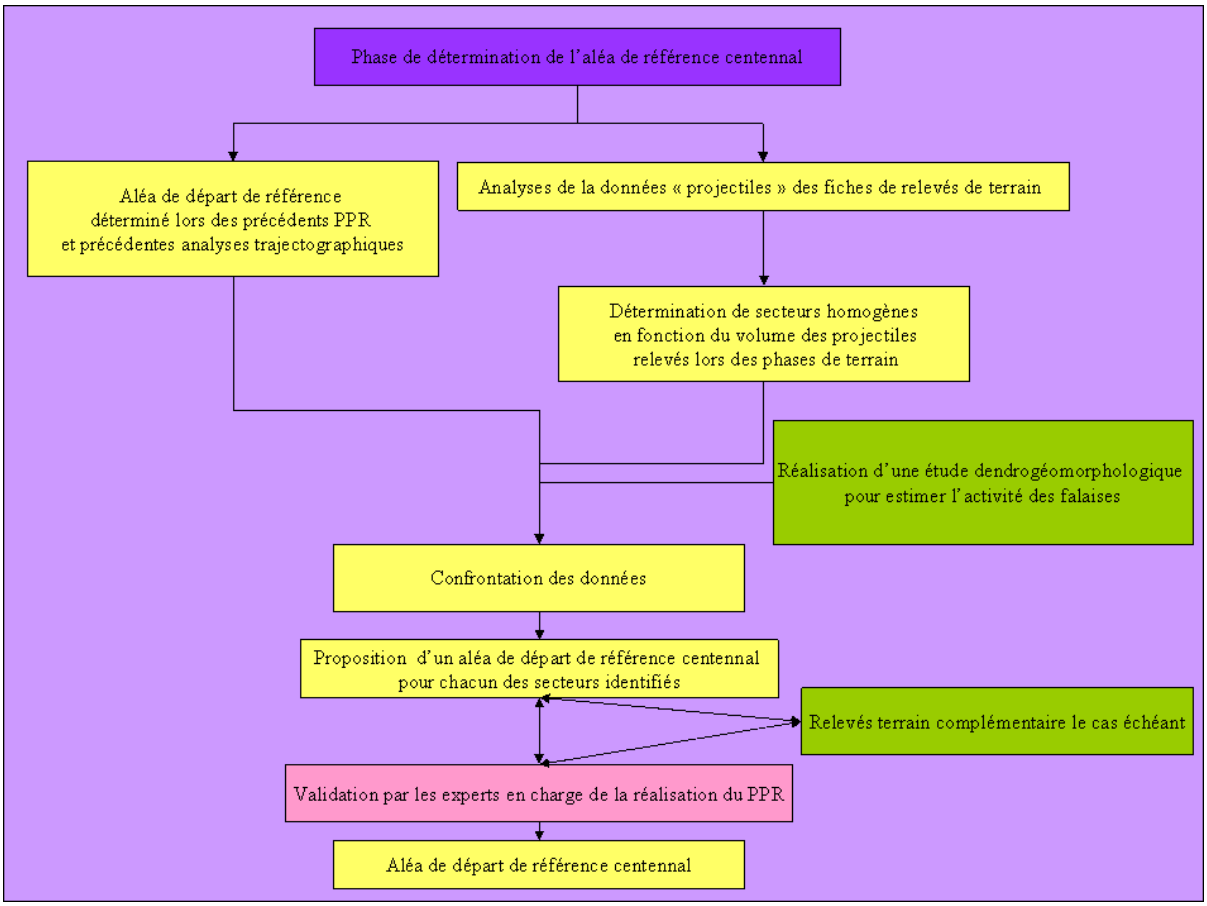


Figure 3 : Présentation schématique de la troisième phase de la démarche méthodologique du Cemagref de Grenoble.

Phase 4 : prédétermination globale des enveloppes de propagation des projectiles rocheux avec le principe de la ligne d'énergie.

Comme nous l'avons déjà écrit précédemment, il est important lors de la réalisation d'une expertise trajectographique de pouvoir disposer de deux outils simulations (basés sur des principes différents), afin de valider la proposition définitive de carte de synthèse de l'aléa en étudiants la convergence des résultats obtenus avec ces deux modèles.

Le Cemagref a développé, à partir du principe de la ligne d'énergie de Heim (1932), un modèle statistique (Rockfor^{LIN}) qui permet d'obtenir un ordre de grandeur des enveloppes de propagation des projectiles. Lors de nos expertises nous utilisons systématiquement ce modèle pour tester et valider les résultats de nos simulations en 3 D (Rockyfor3D), tel que décrit précédemment, mais aussi pour prédéterminer les enveloppes de propagation maximale probable et surtout pour affiner le découpage en secteurs d'analyses issu de la phase 3.

Comme pour tous travaux de simulation, cette carte de prédétermination est confrontée aux données relatives aux phénomènes passés afin de s'assurer que les points d'arrêt observés sont bien situés à l'intérieur des enveloppes de propagation simulées. Il est important de préciser dès maintenant que l'utilisation du principe de la ligne d'énergie ne permet que de proposer un découpage du territoire en trois catégories, uniquement qualitative et non quantitative, d'enveloppe de propagation relatives aux probabilités de propagation suivantes : forte, moyenne et faible. Cette approche statistique ne permet pas en effet de quantifier en pourcentage les seuils de ces probabilités. La carte ainsi obtenue est une carte dite « d'ambiance » qui permet de disposer d'un ordre de grandeur maximale des enveloppes de propagation.

Là encore cette carte est présentée aux experts de l'Etat pour validation. Une fois validée elle est alors utilisée pour la suite des travaux d'analyse.

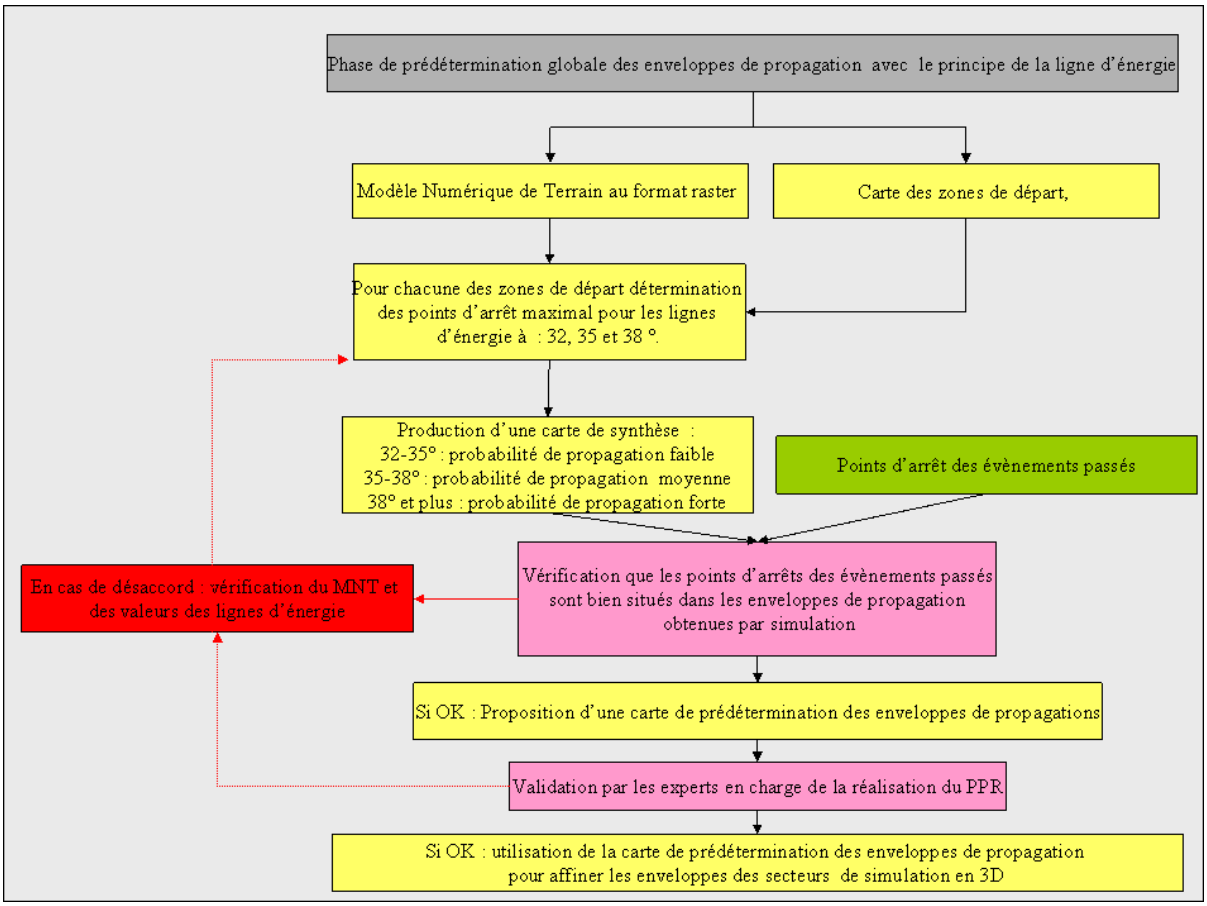


Figure 4 : Présentation schématique de la quatrième phase de la démarche méthodologique du Cemagref de Grenoble.

Phase 5 : réalisation des travaux de simulations trajectographiques en 3 dimensions pour le scénario à terrain nu.

Lors de la réalisation du volet chutes de pierres d'un PPR il est important pour l'aléa de référence centennal de déterminer l'aléa de propagation maximal associé. Cette détermination nécessite de faire abstraction des obstacles suivants et actuellement présents sur le site d'étude : les bâtiments, pylônes, tout ouvrage de génie civil et les arbres. Il faut donc évaluer cet aléa de propagation maximale pour un scénario dit « à terrain nu ». Pour mettre en œuvre ce scénario au sein d'un outil de simulation, il suffit de disposer d'un MNT et de ne pas prendre en compte lors des calculs la couche d'information relative à la végétation forestière. En effet, les MNT sont calculés à partir de données altimétriques mesurées au sol et non au toit des obstacles.

L'objectif final de cette phase de travail est d'obtenir pour la totalité du site d'étude une carte de synthèse de l'aléa chute de pierres validées par les experts de l'Etat en charge de la révision du PPR.
Pour obtenir cette carte nous utilisons notre logiciel de simulation Rockyfor 3D. Les paramètres d'entrée et les couches d'informations géographiques nécessaires à l'utilisation de ce logiciel sont :

- Le modèle numérique de terrain
- La carte de localisation des zones de départ probable
- Les cartes relatives aux paramètres de comportement mécanique des sols lors du rebond d'un projectile rocheux (cartes des coefficients de restitution des sols)
- Le volume de l'aléa de référence centennal pour chacun des secteurs d'analyse

Compte tenu de la surface totale de la zone d'étude et pour optimiser à la fois les temps de calcul, nous avons décidé de travailler avec un MNT au pas de 5x5 m calculé par interpolation du MNT Lidar à la résolution initiale de 1x1 m. Pour chacune des zones de départ identifiées, est simulé le départ unitaire de 500 projectiles rocheux. Les calculs de propagation ne concernent qu'un projectile rocheux à la fois. Il n'y a pas de simulation de départ en masse (les 500 projectiles en même temps). Le choix de 500 projectiles par zone de départ a été conditionné par le fait, qu'avec un MNT au pas de 5x5 m, les résultats des simulations avec Rockyfor 3d convergent (plus de différence statistiquement significative entre les résultats) à partir de ce nombre de 500 « runs ».

Les simulations sont effectuées pour chacun des secteurs d'analyses puis une carte de synthèse globale pour chacun des paramètres cinématiques calculés est réalisée à l'échelle de la totalité du territoire communal.

La première vérification des résultats obtenus porte sur la comparaison entre les points d'arrêt des évènements passés observés et les enveloppes de propagation simulées. Il est important de préciser que l'utilisation de Rockyfor3D se fait en « aveugle », c'est à dire que la détermination des coefficients de restitution de sols ne se fait pas par rétro calage à partir des évènements passés mais à partir des paramètres relevés sur les placettes d'inventaire lors de la phase de terrain. Si les points d'arrêt des évènements passés sont bien situés dans les zones de propagation simulées alors les cartes des principaux paramètres cinématiques sont présentées pour teste et validation aux experts de l'Etat en charge du PPR.

A partir des résultats des travaux de simulation une carte de synthèse de l'aléa chutes de pierres pour le scénario à terrain nu est proposée aux experts de l'Etat.

Dans le cadre de la révision du PPR de la commune de Veyrier du Lac, le Cemagref et les experts de l'Etat ont co-construit une matrice de classification de l'aléa chute de pierre pour la réalisation de la carte de synthèse de l'aléa. Cette matrice de classification de l'aléa a été basée sur celles utilisées lors de la réalisation de l'équivalent des PPR en Suisse et sur les pratiques actuelles de zonage en France à partir d'études trajectographiques. Cette matrice croise à la fois la probabilité d'atteinte et l'énergie moyenne des projectiles. Cette matrice est présentée dans le chapitre de présentation des résultats.

Cette carte n'est considérée comme opérationnelle qu'à partir du moment où les experts de l'Etat en charge du PPR l'ont validée.

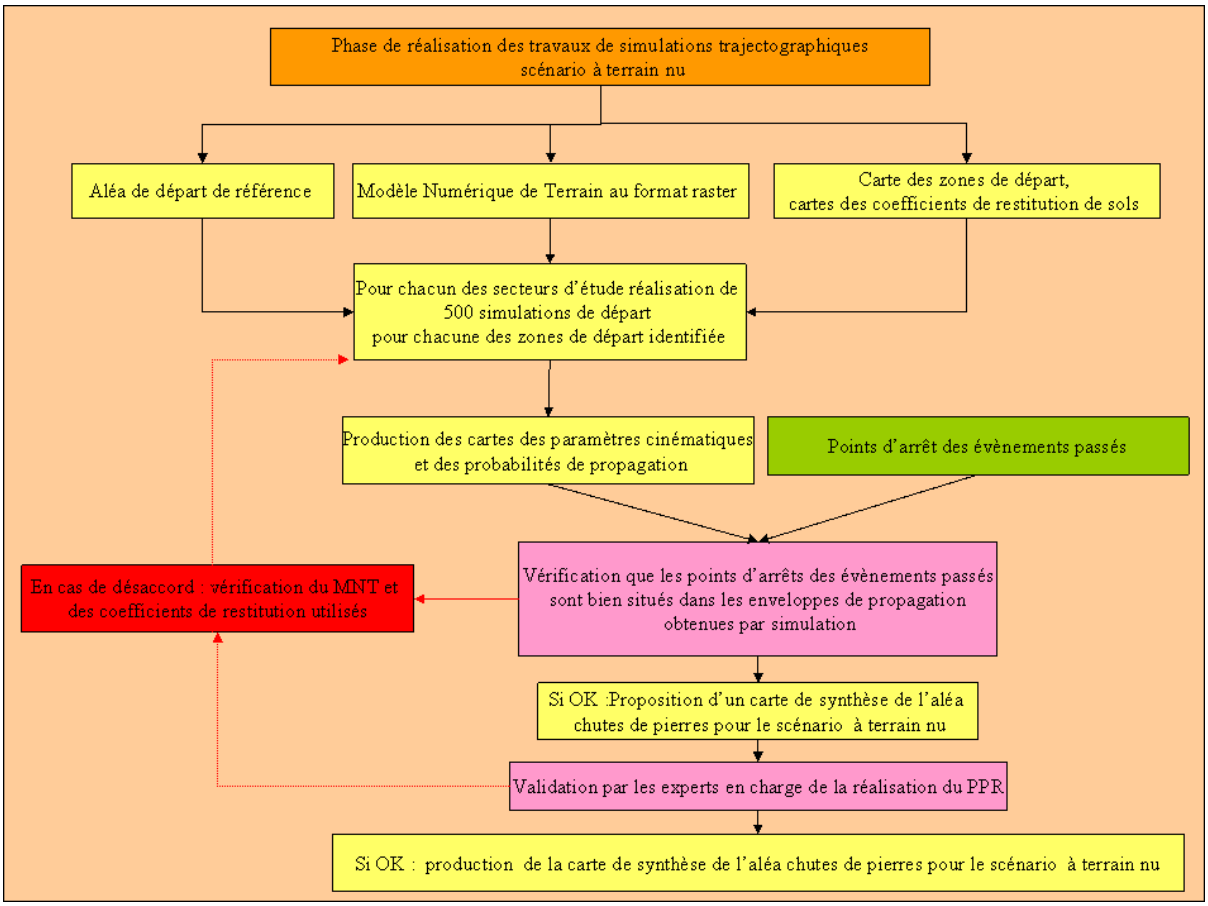


Figure 5 : Présentation schématique de la cinquième phase de la démarche méthodologique du Cemagref de Grenoble.

Phase 6 : réalisation des travaux de simulations trajectographiques en 3 dimensions en tenant compte de la végétation forestière actuellement présente sur le site d'étude

La végétation forestière (arbres et arbustes) peut, en fonction de la surface qu'elle occupe, de sa localisation géographique sur les versants et de sa composition, être en mesure d'avoir un rôle de protection efficace. A ce titre, elle peut s'avérer être un véritable ouvrage naturel de protection pare-pierres. Dans certain cas (peuplement très dense, projectiles de faibles dimensions, longueur suffisante de la bande boisée), l'efficacité de cet ouvrage est de 100% et aucun projectile rocheux ne peut franchir l'écran forestier. Une telle efficacité est à même de masquer l'aléa aux usagers du territoire concerné.

Fautes d'interventions sylvicoles où au contraire suite à la mise en œuvre d'une sylviculture inadaptée, la protection offerte par le couvert forestier peut diminuer voire être réduite à néant.

Par conséquent, la prise en compte de cette fonction de protection est importante lors de la réalisation d'un PPR, afin d'identifier les secteurs où la forêt actuellement présente associée à une gestion forestière adéquate permet de maîtriser l'aléa ou de limiter efficacement celui-ci et ceux au contraire où la forêt ne peut offrir une telle protection.

Le Cemagref a participé au développement du module forestier au sein du logiciel Rockyfor3D. Ce module a été testé et validé à partir des expériences grandeur nature réalisées par le Cemagref dans le cadre du projet européen ROCKFOR. L'utilisation de celui-ci nécessite de disposer soit d'une cartographie des arbres présents ainsi que de leur essence et diamètre (possible à partir des données Lidar) soit d'une cartographie des types de peuplement exprimée en répartition des essences, nombre d'arbres à l'hectare et répartition des diamètres. Les relevés de terrain et l'analyse du MNS Lidar réalisés lors de la phase 2 de notre méthodologie d'analyse permettent de créer la couche d'informations forestières nécessaires à l'utilisation du module forestier de Rockyfor3D.

La démarche d'analyse suit exactement le même principe que celui décrit pour la phase 5 pour le scénario à terrain nu mais en intégrant dans les paramètres d'entrée du modèle la couche d'information forestière.

Au final, une carte de synthèse de l'aléa est proposée pour validation aux experts de l'Etat en charge du PPR. Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus pour les deux scenarii de simulations (terrain nu et prise en compte de la végétation forestière) la même matrice de classification de l'aléa est utilisée.

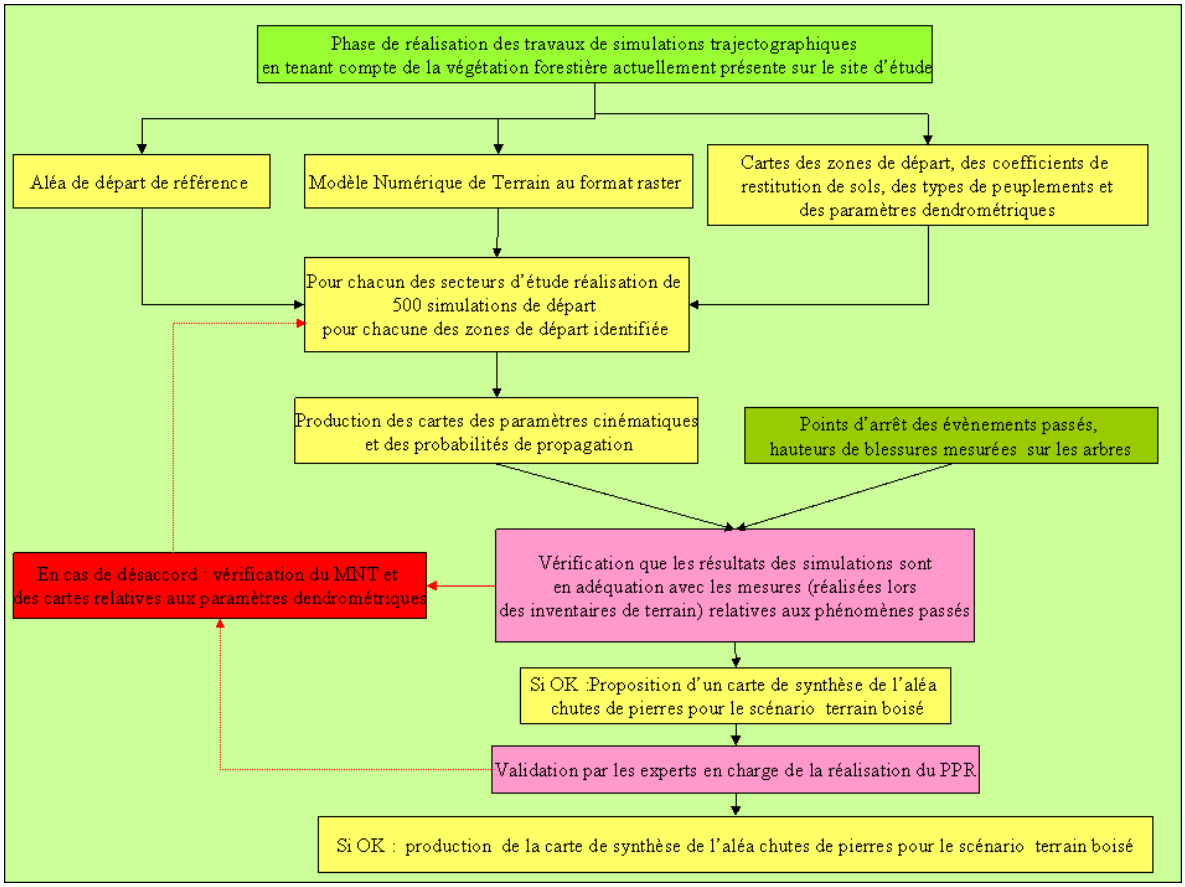


Figure 6 : Présentation schématique de la sixième phase de la démarche méthodologique du Cemagref de Grenoble.

Phase 7 : Analyse du rôle de protection de la végétation forestière actuellement présente sur le site d'étude

L'objectif de cette phase de travail est d'afficher le rôle réel de la végétation forestière présente sur le site par comparaison deux à deux des cartes thématiques obtenues pour chacun des scénarii de simulations. Cette comparaison est réalisée par croisement cartographique avec un Système d'Information Géographique (logiciel d'analyse de données spatialisées) des cartes thématiques. Ce type de logiciel permet de mettre en évidence les différences entre plusieurs cartes soit en termes d'extension géographiques (i.e. zone de propagation maximale) soit en termes de différence de classes et/ou de valeur de paramètres (i.e. énergie moyenne de passage)

Là encore, les résultats sont exprimés sous la forme de carte de synthèse.

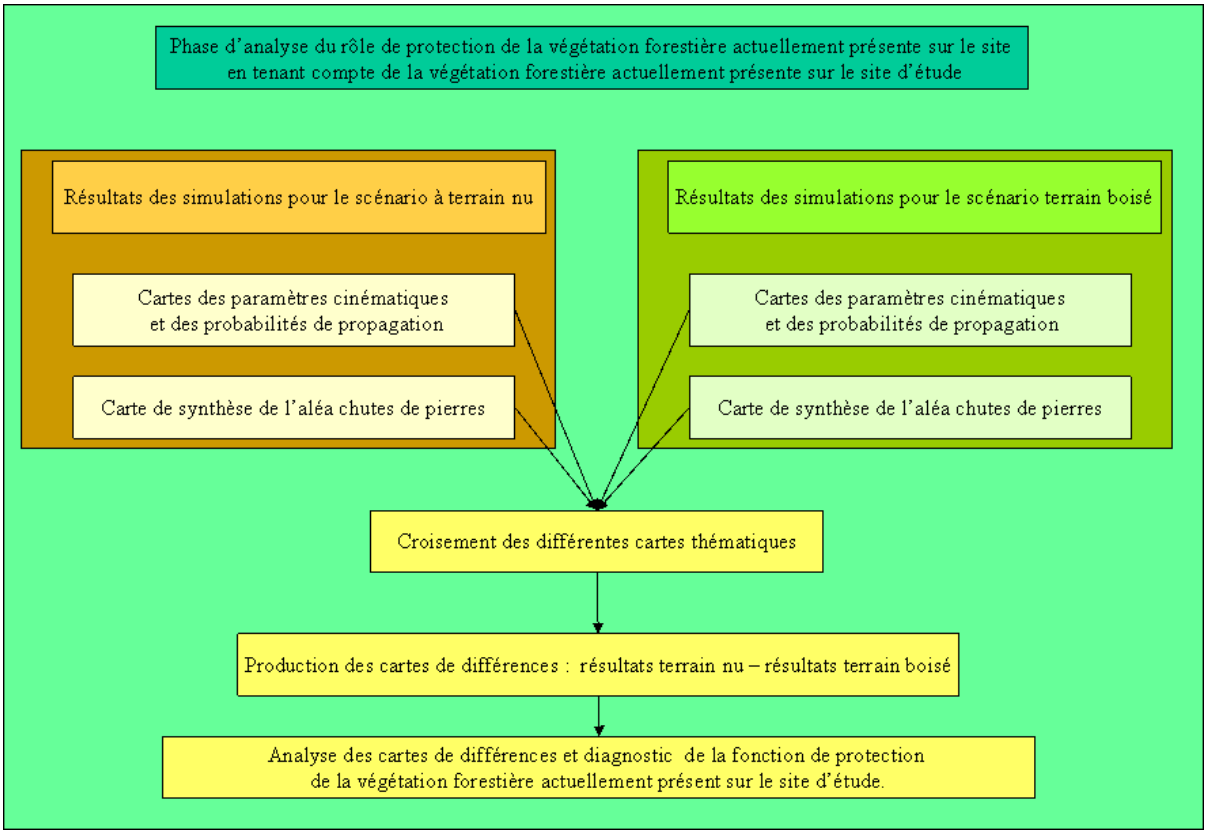


Figure 7 : Présentation schématique de la septième phase de la démarche méthodologique du Cemagref de Grenoble.

Phase 8 : Rédaction du rapport de synthèse et transmission au commanditaire de l'expertise

La dernière étape de notre démarche méthodologique concerne la formalisation des résultats des travaux de simulations et leurs transmissions au commanditaire de l'expertise. Le rapport d'étude contient toutes les cartes réalisées et les cartes de synthèse validées par les experts de l'Etat en charge du PPR. Ces documents seront utilisés par ces experts pour élaborer la carte d'aléa chute de pierre du PPR et proposer une carte de zonage règlementaire.

Les couches d'informations SIG sont fournies avec le rapport de synthèse. Les fiches de relevés de terrain sont disponibles et consultables au Cemagref de Grenoble.

Présentation succincte de la technologie Lidar

L'utilisation de modèles de simulation de propagation de chutes de blocs nécessite de disposer d'une représentation numérique de la topographie la plus réaliste possible, de disposer d'informations sur l'occupation des sols et, en fonction des modèles, d'une description des peuplements forestiers. Pour une zone d'étude donnée, la construction du modèle numérique de terrain associé peut se faire soit en achetant des données auprès de l'IGN, soit par photogrammétrie, soit par un levé de terrain. Ces trois techniques fournissent des MNT avec des résolutions et des précisions différentes, le maillage des points variant d'un point tous les 50m pour l'IGN à un point tous les mètres (voire moins) pour les autres techniques.

Ces dernières années, une nouvelle technique est apparue le Laser-scan aérien aussi dénommée Lidar.
Le Laser-scan aérien est une technique récente d'acquisition de données topographiques qui se développe de plus en plus compte tenu des progrès techniques réalisés dans les domaines des lasers et du GPS. Le principe général de cette méthode repose sur la mesure du temps de parcours d'une impulsion lumineuse entre la source émettrice (l'avion dans lequel est embarqué le laser) et la surface interceptée. Pour chacun des points de mesure, le faisceau laser effectue un balayage latéral (cf. Fig.8). Ainsi, compte tenu de la direction du vol et de ce balayage latéral, une grande surface de territoire est couverte en un passage.

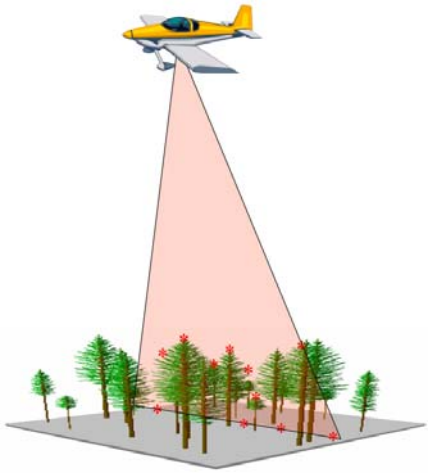


Figure 8 : Balayage laser à partir d'un avion.

Cette technique permet de réaliser, selon le laser embarqué, des MNT à raison de 1 à 20 points par m^2 et avec une précision verticale pouvant être de 10 cm en fonction de la configuration du site.
Pour générer un MNT il est nécessaire de connaître, avec la plus grande précision possible, l'angle de balayage utilisé, ainsi que la position et l'altitude de l'avion. Ces deux derniers paramètres, sont obtenu grâce au GPS embarqué et à la centrale inertielle de l'avion. Le grand nombre de points de mesure utilisé ainsi que leur distribution régulière font que cette technique se distingue des autres techniques classiques. Pour chacun des points de mesure, la différenciation du premier écho (point le plus haut de la surface balayée) et du dernier écho (point le plus bas de la surface balayée) permet d'identifier et de déterminer la nature et les propriétés du terrain (cf. Fig.9)

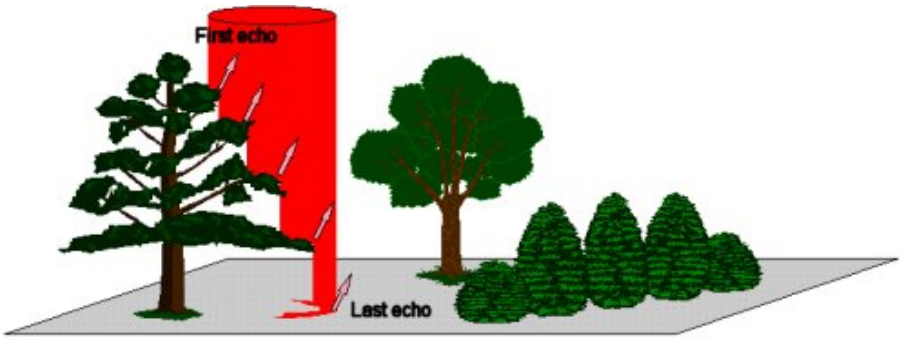


Figure 9 : Principe de différenciation des échos.

Ces différents échos sont utilisés pour générer deux types de modèle numérique :

- Le modèle numérique de terrain (MNT) à proprement parler en ne conservant que les derniers échos ;
- le modèle numérique dit de surface (MNS) en ne conservant que les premiers échos.

A partir de ces deux modèles numériques, on peut calculer un modèle numérique dit d'élévation (MNE) qui est obtenu par différence entre le MNS et le MNT. Ce dernier modèle permet ainsi d'obtenir la hauteur des bâtiments et autres «obstacles» (arbres, pylônes, etc.).
Ainsi, cette technique présente l'avantage de pouvoir acquérir en une seule fois une masse d'information considérable sur la topographie, et ce avec une maille de mesure constante.

Le Cemagref de Grenoble a développé des algorithmes mathématiques (sous environnement MATLAB) afin d'obtenir pour une zone d'étude donnée et à partir des données brutes du Lidar, le MNS, MNT et MNE (cf. Fig. 10-12). Le MNE peut être par la suite utilisé pour réaliser une cartographie de tous les arbres dominants présents sur la zone d'étude et/ou une cartographie des types de peuplements présents en fonction de la hauteur de ceux-ci.

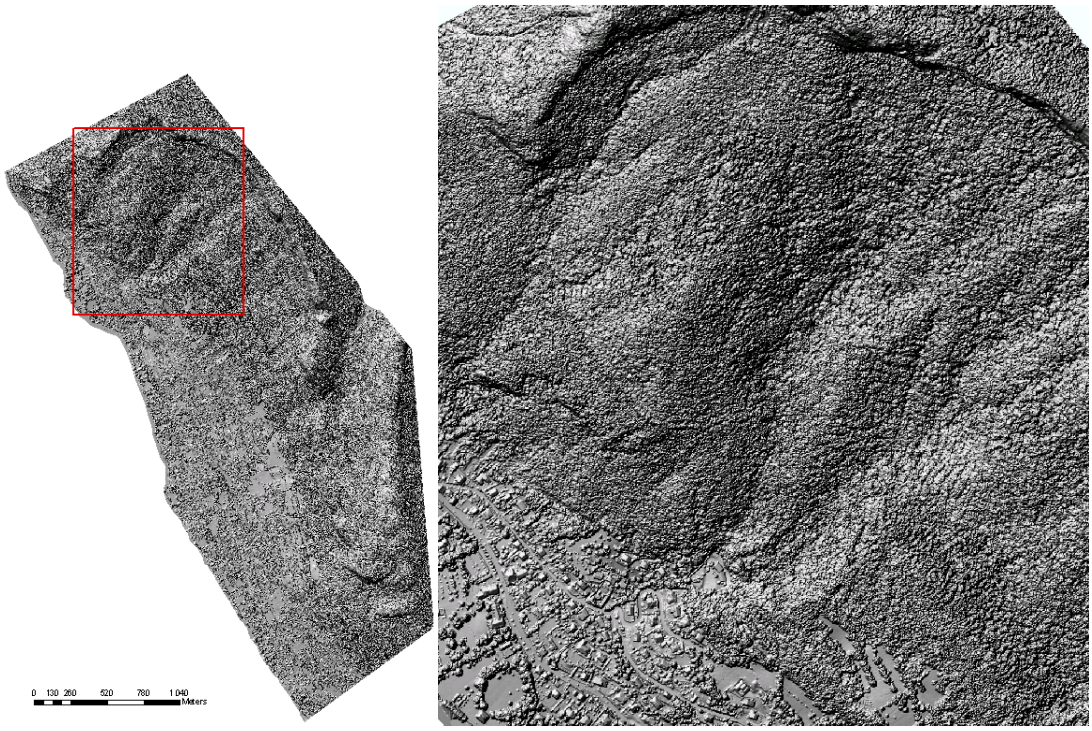


Figure 10 : Exemple de MNS obtenu par traitement de donnée lidar (extraction d'une zone du territoire de la commune de Veyrier-du-Lac).

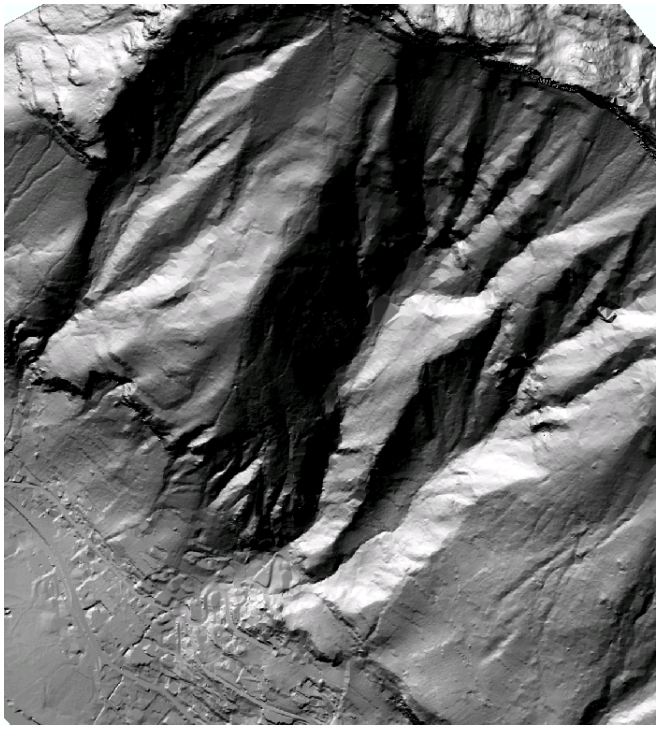


Figure 11 : Exemple de MNT obtenu par traitement de donnée lidar (extraction d'une zone du territoire de la commune de Veyrier-du-Lac).

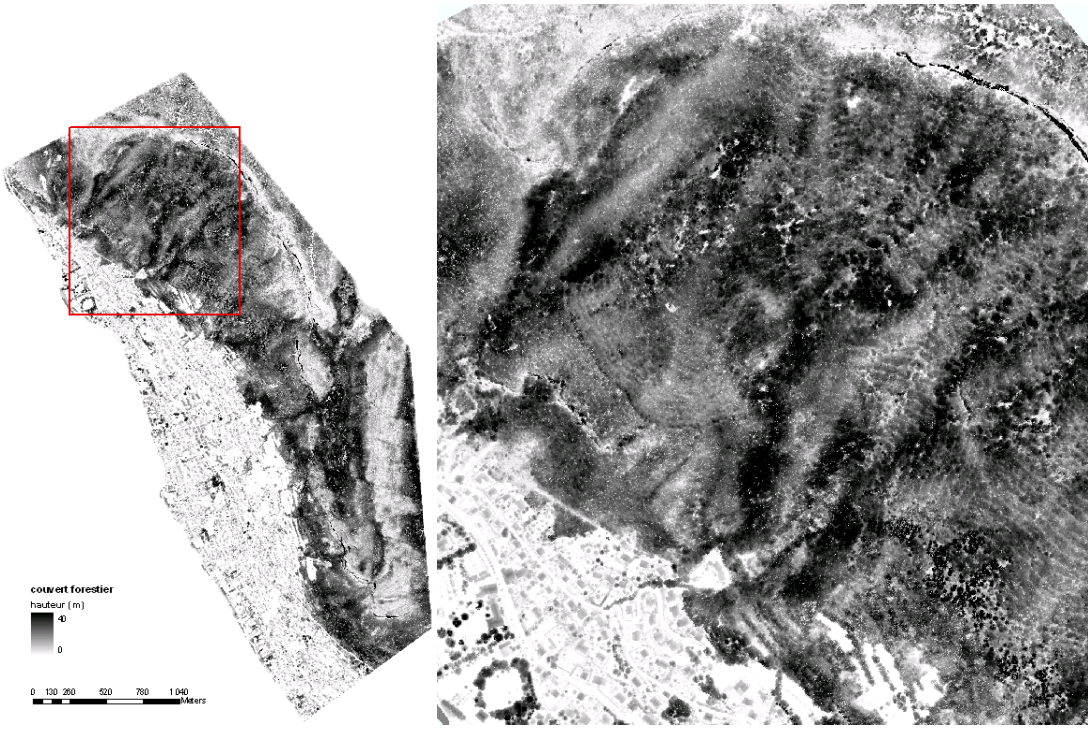


Figure 12 : Exemple de MNE (classement en fonction de la hauteur des obstacles obtenue par traitement de donnée lidar (extraction d'une zone du territoire de la commune de Veyrier-du-Lac).

Présentation des outils de simulations utilisés

Le modèle de détermination des zones de départ probable à partir d'un MNT

Les zones de départ réelles de chutes de pierre sont des barres rocheuses et des falaises. La localisation de ces zones peut se faire soit par reconnaissance de terrain, soit par photo-interprétation soit en utilisant un MNT. Les deux premières méthodes nécessitent de réaliser une vision exhaustive de ces sites. Lors des inventaires de terrain il n'est pas toujours possible de parcourir la totalité du territoire étudié. La photo-interpréation peut s'avérer impossible à réaliser, s'il existe des zones d'ombres portées sur les documents photographiques et/ou si le couvert forestier masque des barres rocheuses. Par contre l'emploi d'un MNT, s'il est de qualité et si le traitement est robuste, offre la possibilité d'avoir une vision exhaustive des zones de départ probable présentes sur l'ensemble du site étudié.
Dans un MNT, les falaises et les barres rocheuses peuvent être identifiées soit par visualisation en 3 dimensions du secteur d'étude soit à partir du plan dérivé du MNT qu'est la carte des pentes. En fonction de la résolution du MNT (aussi dénommé le pas du MNT), il faut définir la valeur de pente minimale permettant de détecter le plus grand nombre possible de falaises et barres rocheuses.

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

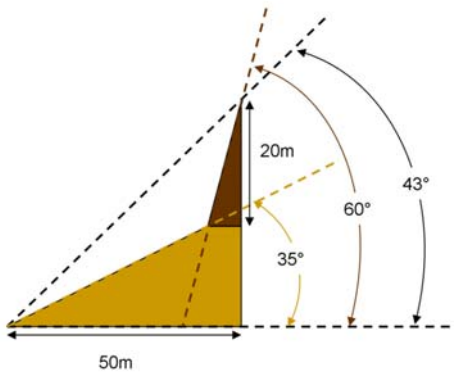


Figure 13 : Exemple de valeur d'angle de pente sur MNT et dans la réalité (pour des questions de lisibilité de la représentation schématique les angles ont volontairement exagérés sur le schéma).

Par conséquent il est nécessaire pour un MNT donné, d'estimer l'angle α évalué par celui-ci dans la carte des pentes qui permet de caractériser les falaises le plus précisément possible.

A partir de l'analyse des zones de départ de plusieurs sites d'étude situés en France, Suisse et Autriche nous avons construit un modèle permettant de calculer la valeur cet angle α. La formule de ce modèle mathématique est la suivante :

$$\alpha = 55° * RES^{-0,075}$$

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

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

Le principe de la ligne d'énergie et l'utilitaire Rockfor^{LIN}

Le modèle de simulation de chutes de pierres numérique le plus simple est un modèle dit statistique qui ne nécessite pas à proprement parlé de détermination des coefficients de réponse des sols. Ce modèle est basé sur le principe de la ligne d'énergie, principe similaire çà celui utilisé pour l'élaboration du modèle statistique norvégien pour les avalanches.

Cette méthode développée par Heim en 1932 repose sur un principe simple et trivial:
Un bloc ne peut progresser sur une pente que si celle-ci est suffisamment raide.
Ainsi, si la pente est supérieure à un angle limite β, il accélère. Si elle est inférieure à β, il ralentit. En partant de ce constat, un bloc peut aller d'une zone de départ A jusqu'à B, point d'intersection du relief avec une ligne imaginaire partant de la zone de départ et formant un angle β avec l'horizontal (Cf. Fig. 14).Cette ligne est appelée la ligne d'énergie et l'angle β, l'angle de la ligne d'énergie.

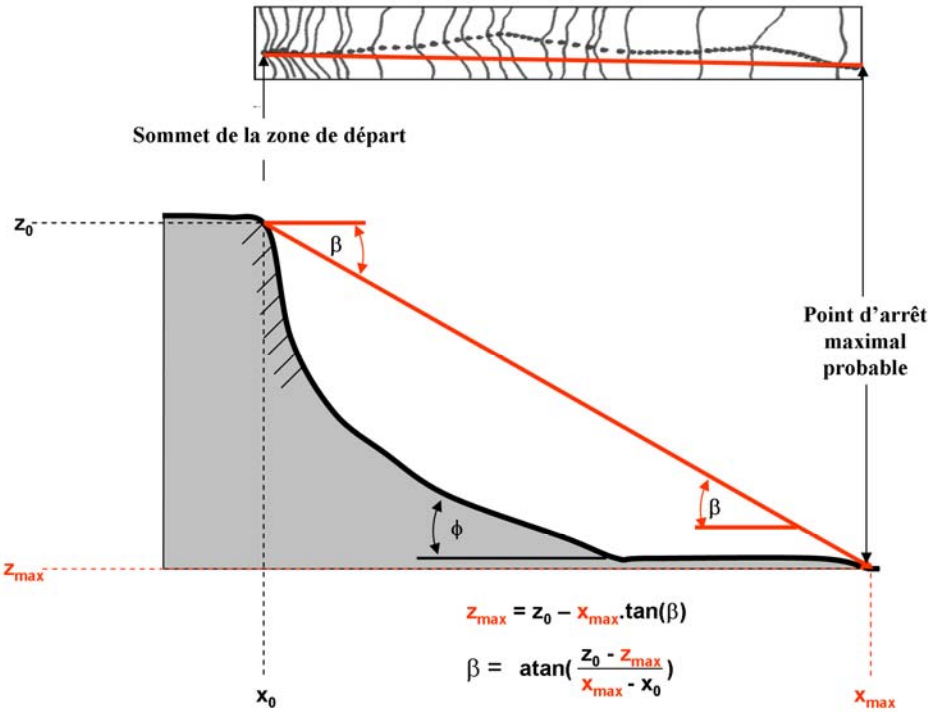


Figure 14 : Représentation schématique du principe de la ligne d'énergie et de la formule pour déterminer l'angle β.

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

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

La bibliographie indique des valeurs de β variant de 28 à 38°. Cependant, les études de Gerber (1994) et de Meissl (1986) préconisent de déterminer la valeur de cet angle en tenant compte de la dimension des projectiles et de la rugosité du sol.

Nous utilisons un angle β minimum de 32°. Cette valeur a été choisie d'après les expériences grandeur nature de chutes de blocs du Cemagref sur le site de Vaujany (Isère) (Dorren et al., 2005). Ces expériences ont consistés à des lâchers de blocs sur un site non boisé (dit à terrain nu) et sur un site boisé. Les deux sites ont la même valeur de pente.

La valeur de 32° correspond à celle de l'angle de la ligne d'énergie pour le bloc étant allé le plus, loin sur le site à terrain nu. Pour le site boisé, la valeur de cet angle est de 38°. On obtient donc un intervalle variant de 32° à 38°. Par rétro analyse d'évènements passés et documentés, il ressort qu'à l'échelle d'un versant cette valeur de 38 ° est assimilable à la zone de très forte probabilité de propagation des projectiles rocheux et celle de 32° à la zone de plus faible probabilité (mais non nulle) de propagation. De plus, la valeur de 35° citée par Gerber (1994) correspond quant à elle, et au regard des rétro analyses effectuées, à la zone de probabilité de propagation moyenne.

A partir de ces résultats, le Cemagref utilise les seuils suivants :

- Zone comprise entre 32 et 35 ° : zone de faible probabilité, mais non nulle, de propagation
- Zone comprise entre 35 et 38° : zone de moyenne probabilité de propagation
- Zone au delà de 38° : zone de forte probabilité de propagation

La figure suivante présente l'expression cartographique de ces seuils.

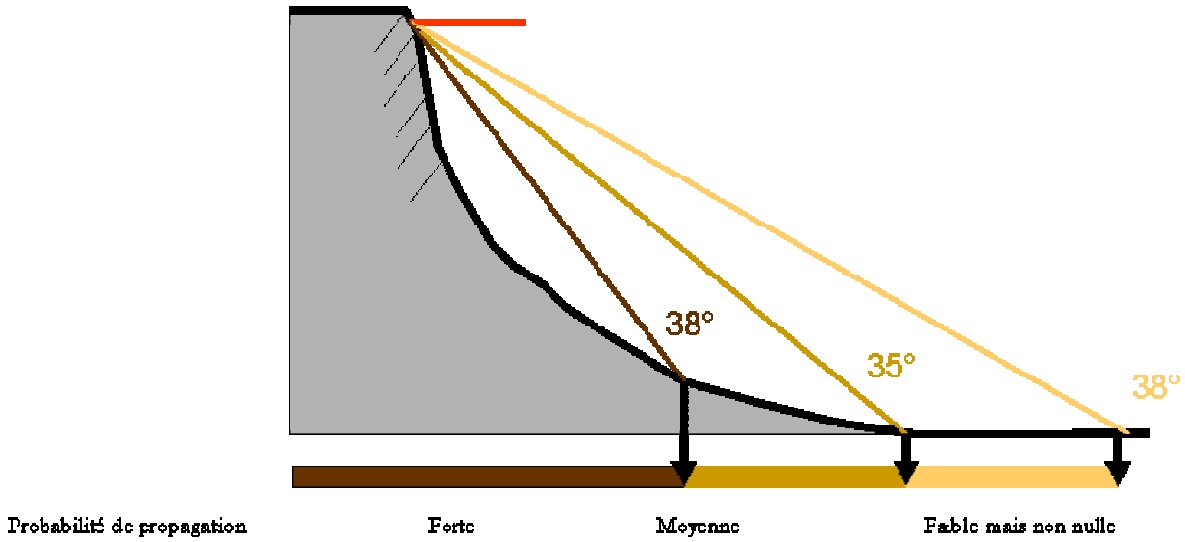


Figure 15 : Expression cartographique des seuils de ligne d'énergie utilisés par le Cemagref.

En ce qui concerne la valeur de l'angle du cône de déviation, celle-ci dépend de la configuration topographique du versant étudié. La valeur la plus communément utilisée est de 30°. Pour notre part, nous avons décidé de ne pas utiliser une valeur d'angle pour le calcul du cône de déviation mais de travailler dans toutes les directions d'azimut situées à l'aval du point de départ.

Nous avons utilisé ce principe de la ligne d'énergie ainsi que les seuils cités précédemment pour développer une application informatique sous environnement SIG : l'utilitaire Rockfor^{LIN}. Rockfor^{LIN} permet d'automatiser la procédure de calcul des points d'arrêt maximal probable et de détermination de l'enveloppe des zones de propagation correspondant à chacun de seuils de probabilité de propagation.

Comme déjà précisé dans le chapitre présentant notre démarche méthodologique, la carte obtenue avec l'utilitaire Rockfor^{LIN} est une carte informative globale, n'ayant qu'une valeur qualitative et ne permettant à l'expert et aux opérateurs que de se faire une première idée de l'extension maximale théorique des zones de propagation potentielle. Elle ne permet, en relation avec la définition de l'aléa de référence centennal, que de prédéterminer le découpage du territoire d'étude en futurs sous secteurs d'analyse.

Le modèle de simulation trajectographique en 3dimension : Rockyfor3D

Le modèle de simulation numérique de trajectographie qui utilisé pour cette mission d'expertise est le modèle Rockyfor3D développé par Dorren et al. (2004 et 2006). Ce modèle est de type « probabilistic process based » et distribué spatialement ce qui lui permet de modéliser en 3 dimensions le déplacement d'un bloc rocheux sur une pente. Ce modèle couple des algorithmes mathématiques déterministes lui permettant de simuler le vol parabolique d'un bloc et les rebonds sur le sol avec une approche stochastique dans le choix des paramètres régissant les calculs des rebonds et d'impact avec des obstacles. Il utilise une représentation en 3 dimensions du terrain sous la forme d'un modèle numérique de terrain (MNT) de type raster (représentation du terrain sous la forme d'un maillage carré). Le choix du pas du MNT est laissé à l'initiative de l'opérateur en fonction des données topographiques disponibles La déperdition d'énergie lors des rebonds au sol est déterminée par l'élasticité du sol, exprimée par un coefficient de restitution normal (r_n), et par la rugosité du sol, exprimée par un coefficient de restitution tangentiel (r_t). Le paramètre le plus important pour le calcul de la variation de vitesse est le coefficient de restitution tangentiel. Ce coefficient est déterminé par la taille des matériaux recouvrant la pente (rugosité) et par le diamètre du projectile (Kirkby et Statham 1975, Dorren et al. 2006). La rugosité du sol combine à la fois la hauteur des matériaux couvrant la pente et la probabilité d'impact par un projectile. Ainsi trois classes de rugosité sont utilisées : Rg10, Rg20 et Rg70%. Ces trois classes correspondent à la répartition de la hauteur moyenne des matériaux couvrant le sol pour une surface de référence. Ainsi la classe Rg70% représente la hauteur moyenne des matériaux présents sur 70% de la surface de référence, la classe Rg20% la hauteur moyenne des obstacles présents sur seulement 20% de la surface de référence et celle Rg10% la hauteur moyenne des obstacles présents sur seulement 10% de la surface de référence.

L'approche utilisée est de type probabiliste. Pour chacun des points de départ identifiés sur le terrain, et en fonction de la résolution du MNT de 100 à 10000 simulations sont réalisées en faisant varier aléatoirement (dans l'intervalle de valeurs déterminé lors de la phase de terrain) les paramètres de calculs lors des rebonds. Le projectile est assimilé à un point mathématique (méthode de la masse concentrée) auquel est associée une information sur son volume. Le projectile utilisé lors des simulations est celui correspondant à l'aléa de départ de référence déterminé par l'opérateur. Le volume de cet aléa de référence est en fait la valeur du volume moyen des projectiles pouvant se propager sur le site d'étude. Afin de rendre compte de la variabilité qui existe autour de ce volume moyen, Rockyfor utilise une gamme de volume centrée sur le volume moyen de l'aléa de départ de référence et comprise dans l'intervalle [0,7* Volume moyen de référence, 1,3* Volume moyen de référence].

Ainsi, si 500 simulations sont réalisées pour chacune des zones de départ, Rockyfor procèdera 500 fois au choix aléatoire d'un volume de départ compris dans cet intervalle.

A partir des travaux de Jahn (1988), Gsteiger (1993), Berger et al (2004), un algorithme a été développé pour prendre en compte la présence d'arbres sur le terrain en temps qu'obstacles potentiels (Cf. Fig. 16).

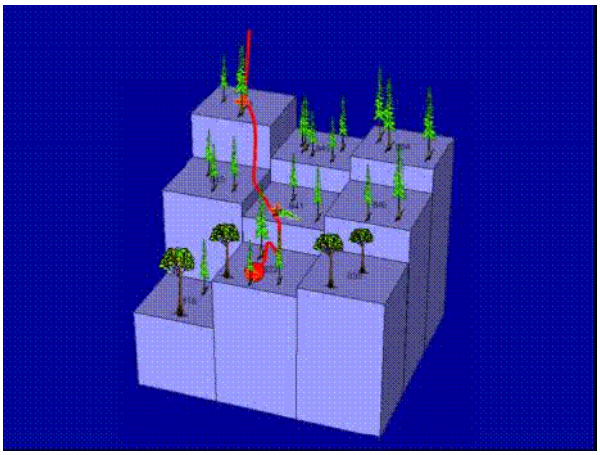


Figure 16 : représentation schématique du modèle Rockyfor 3D.

Le calcul de la dissipation d'énergie occasionnée par l'impact sur un arbre nécessite de connaître la position du projectile avant l'impact, son énergie cinétique, la position de l'arbre, son diamètre et son essence. Les arbres peuvent être parfaitement positionnés si on connaît leurs positions exprimées en XY, et dans le cas contraire randomisé pour chaque maille de calcul à partir du nombre moyen d'arbre par hectare et de la distribution observée des diamètres.

Etant donné que la propagation du projectile est modélisée en 3 dimensions, la position exacte de celui-ci est connue pour chacune des mailles de calcul. Si un impact a lieu, la dissipation d'énergie est calculée avec l'algorithme suivant :

$$\Delta E = -0.046 + \frac{0.98 + 0.046}{1 + 10^{(0.58 - ((Pi - Ct) / 0.5 * DBH)) * -8}}$$

avec ΔE = le pourcentage de l'énergie maximale que peut dissiper un arbre (%)
Pi-Ct = la distance horizontale entre le centre du point d'impact et centre de l'arbre (m)
DHP = le diamètre de l'arbre à hauteur de poitrine (mesurée à 1,30 m) (m)

L'énergie maximale que peut dissiper un arbre (*max. E. diss)* est déterminée par son diamètre et son essence. Pour le sapin l'algorithme est :

$$\text{max. E. diss.} = 38.7 * \text{DHP}^{2.31}$$

Le modèle Rockyfor utilise le sapin comme essence de référence pour calculer la capacité de dissipation d'énergie de 10 autres essences.

La déviation latérale est quant à elle déterminée en utilisant les matrices de déviation observées le site expérimental du Cemagref situé sur la commune de Vaujany (38). Il existe trois grands types d'impacts :

1. impact frontal (si le bloc percute l'arbre dans une zone de 1/6 de part et d'autre de son centre),
2. impact latéral (si le bloc percute l'arbre dans une zone de 1/6 de part et d'autre de la zone centrale),
3. impact frôlé (si le bloc percute l'arbre dans une zone de 1/6 de part et d'autre de la zone latérale).

Pour chacun de ces types d'impacts nous disposons des matrices de fréquences des déviations observées. Le modèle déterminant la position de l'impact sur le diamètre, il affecte à cet impact une valeur de déviation par tirage au sort dans la matrice de déviation correspondant au type d'impact.

Ces algorithmes ont été développés par Dorren et Berger (publiés en 2006) et sont entre autre basés sur l'utilisation de données obtenues lors d'expérimentations grandeurs nature réalisées dans les Alpes du Nord Françaises (Dorren *et al*. 2005).

L'objectif de ce modèle est de cartographier les zones parcourues par les chutes de pierres simulées. A chacune des mailles du modèle numérique de terrain est associée des informations concernant le nombre de projectiles atteignant une cellule, le nombre de projectiles s'arrêtant dans une cellule, le volume des dépôts, la hauteur maximale et moyenne des rebonds [m] (calculée selon la composante normale à la pente), les vitesse maximales et moyenne de translation et de rotation, l'énergie maximale et moyenne des projectiles (en kJ). Ces informations sont utilisées pour produire les cartes associées à chacun des paramètres calculés.

En dehors du MNT, les données nécessaires à l'utilisation de ce modèle sont obtenues par une phase de relevés de terrain. Ces relevés doivent permettre, sur la totalité de la zone d'étude, de définir et décrire des unités géomorphologiques homogènes tant d'un point de vue type de sol que peuplement forestier. Les paramètres relevés sont :

- Pour les peuplements forestiers :
  - la composition en essences,
  - la répartition des diamètres,
  - la densité (nombre d'arbres à l'hectare)
  - la hauteur des blessures sur les arbres
- Pour les sols :
  - la rugosité est caractérisée à partir de la dimension des éléments présents au sol et de leur répartition spatiale.
  - L'élasticité du sol est quant à elle estimée à partir de la profondeur du sol, de la description de la litière et des horizons humifères.
  - Le dimensionnement des anciens projectiles présents sur la placette de relevé

En plus de ces données, des informations relatives à la topographie de la placette de relevé sont aussi collectées.
Afin d'optimiser la phase de relevé de terrain, nous utilisons une fiche de relevé regroupant l'ensemble de ces paramètres. La figure 17 présente la fiche de terrain utilisée. La figure 18 quant à elle présente l'aide annexé à cette fiche de relevé pour la détermination des classes Rg10,20 et 70%.

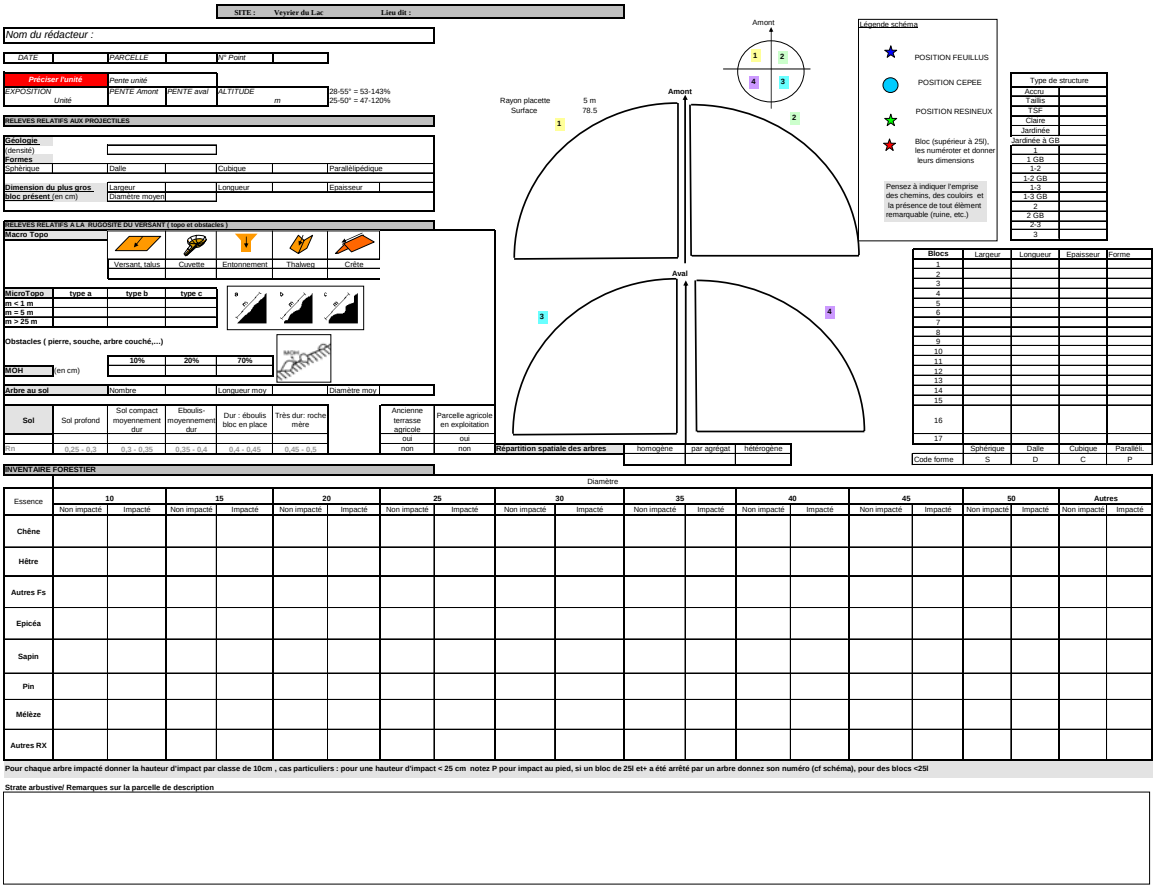


Figure 17 : Fiche de relevé de terrain pour l'utilisation de Rockyfor 3D.

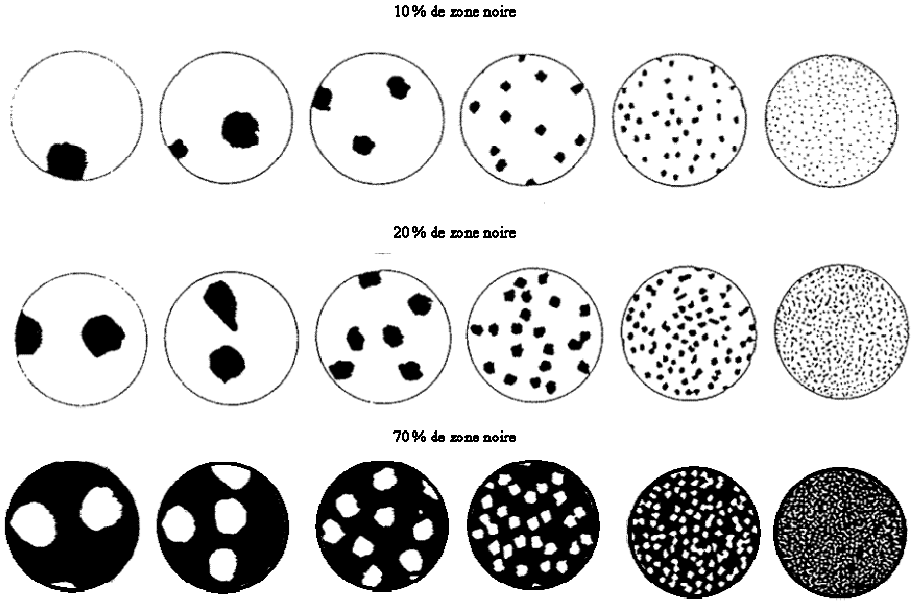


Figure 18 : utilitaire visuel pour l'aide à la détermination des classe Rg10, 20 et 70%.

L'intérêt de cette fiche de relevé est double : le premier est que deux opérateurs différents vont décrire le même objet de la même manière et le deuxième est la traçabilité des données utilisées.

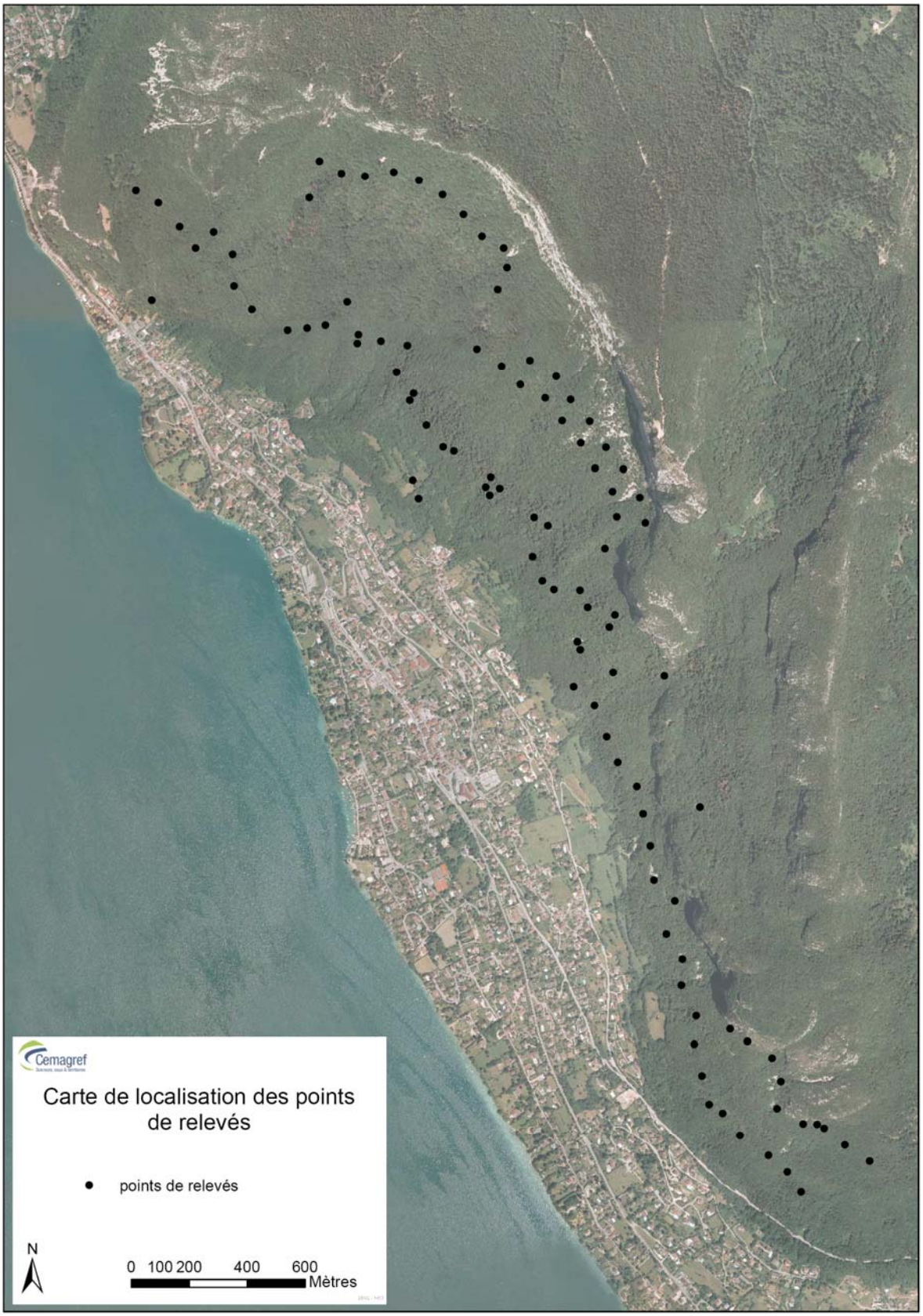
Au final, le modèle Rockyfor3D a été testé et validé avec des données provenant de phénomènes passés parfaitement documentés ainsi qu'avec les données provenant des expériences grandeur nature réalisées par le Cemagref de Grenoble. A ce jour, ce modèle a été utilisé pour des expertises en France, Suisse et Autriche ce qui correspond à plus de 600 couloirs. Il a fait l'objet en 2006 d'un développement de l'ergonomie de son interface graphique. La version utilisée pour cette expertise est la version 1.0.

Résultats des inventaires de terrain

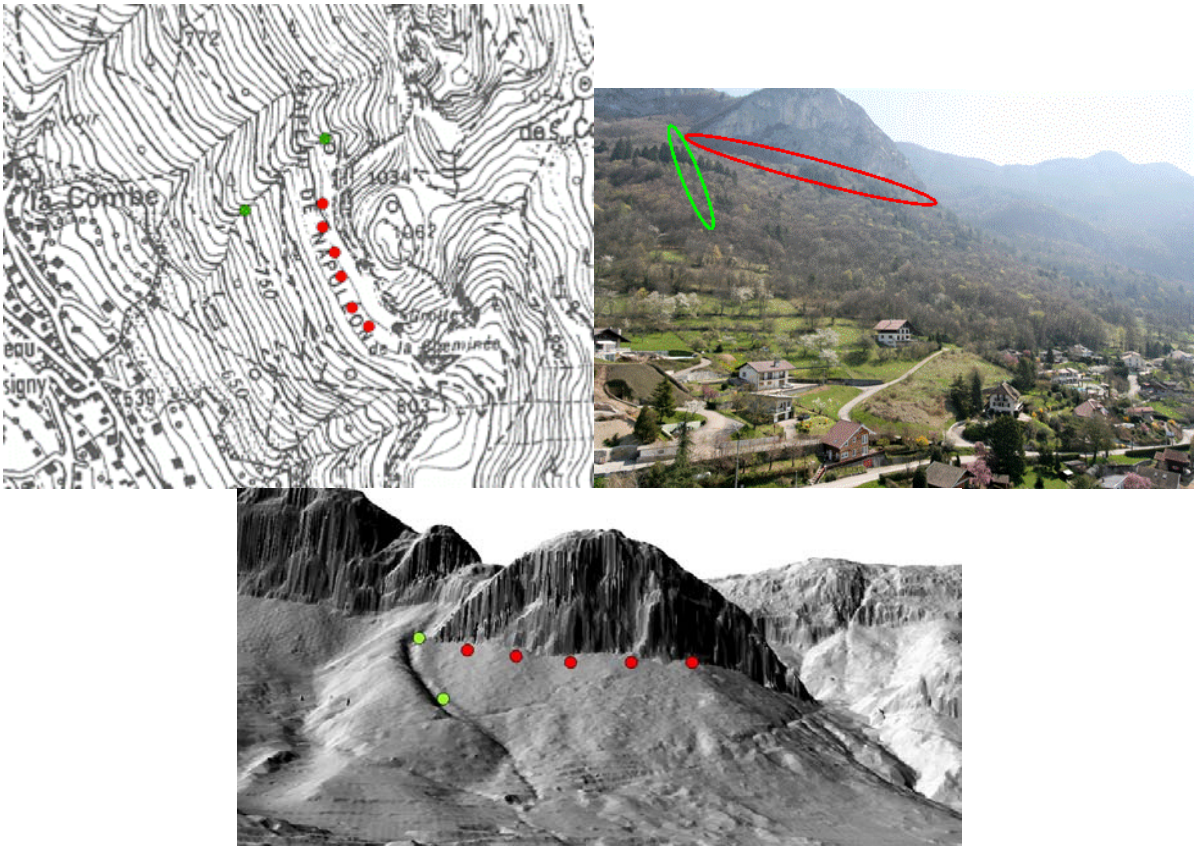
Au total 104 placettes de relevés de terrain, d'une surface unitaire de 78,5m^2 ont été implantées sur la totalité du versant. Toutes ces placettes ont fait l'objet d'un relevé formalisé au sein de la fiche présentée en figure 17. La carte 1 présente l'implantation de ces points de relevés.

Note au lecteur : L'ensemble des documents cartographiques réalisés par le Cemagref (données nécessaires aux simulations, résultats de simulation) dans ce rapport a été annexé à celui-ci dans un « atlas cartographique » au format A3.

En plus de ces placettes d'inventaire, 8 placettes d'analyse dendrogéomorphologique ont été implantées en pied de la falaise du Chapeau de Napoléon et dans un couloir situé à son aval. La carte 2 présente l'implantation de ces placettes. Compte tenu du temps imparti à la réalisation de cette expertise, il ne nous a pas été possible d'implanter ce type de placette sur la totalité du territoire communal. Nous avons donc décidé de ne réaliser l'étude dendrogéomorphologique que sur un secteur a priori représentatif de l'ensemble du territoire et offrant des conditions d'accès garantissant au mieux la sécurité des personnels.



Carte 1 : Carte de localisation des placettes d'inventaire.



Carte 2 : Carte, photo et vue lidar 3D de localisation des placettes d'analyse dendrogéomorphologique (en rouge les placettes situées en pied de falaise et en vert les deux placettes situées dans le couloir).

En parallèle à cette phase de terrain nous avons commandé à la société SINTEGRA l'acquisition (réalisation du vol et des prétraitements des données) des données Lidar sur la totalité du territoire communal.

Les objectifs de cette phase de terrain ont été de relever les données nécessaires à la réalisation des cartes des paramètres d'entrés pour le logiciel Rockyfor3D et valider la qualité des données Lidar.

La validation des données Lidar a été réalisée par comparaison des données altimétriques au niveau des points géodésiques de l'IGN et par comparaison des courbes de niveaux obtenues par interpolation du MNT lidar avec celle de la carte au 1/25000 de l'IGN.

Au niveau des points géodésique de l'IGN l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sur l'attitude des points Lidar est de 24 cm. Celle calculée pour le MNT commercial de l'IGN au pas de 50*50 m est de 10,05 m. Ces différences de valeur confirment la haute résolution et la qualité des données Lidar par rapport au MNT disponible auprès de l'IGN. Le MNT de l'IGN au pas de 50*50 m lisse fortement la topographie ce qui n'est pas le cas du MNT Lidar au pas de 1m dont nous disposons. Les figures 18 et 19 présentent cet effet de lissage sur des vue 3D. De plus, seul le MNT Lidar permet de reconstruire correctement les courbes de niveaux de la carte au 1/25000 de l'IGN (cf. cartes 3, 4, 5). En conclusion seules les données Lidar sont en mesure de rendre compte de la complexité de la topographie présente sur la commune de Veyrier-du-Lac.

Par conséquent, elles ont été utilisées comme données altimétriques dans notre logiciel de simulation Rockyfor3D. Afin d'optimiser les temps de calcul et la résolution des résultats, nous avons construit à partir du MNT Lidar au pas de 1*1m un MNT au pas de 5*5m.

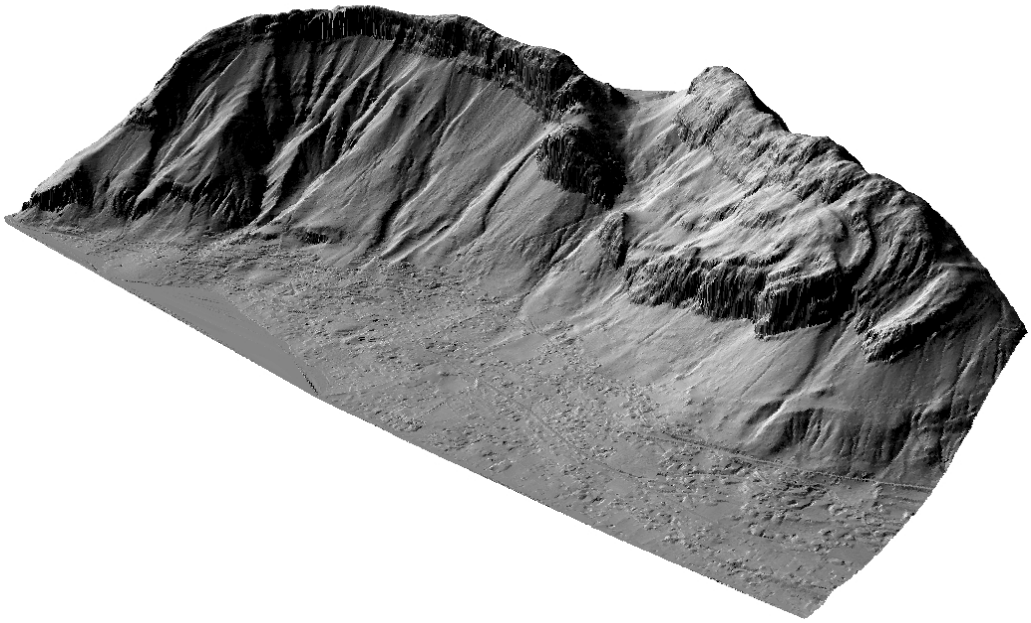


Figure 18 : vue en 3D du territoire de la commune de Veyrier-du-Lac réalisé avec le MNT Lidar au pas de 1m.

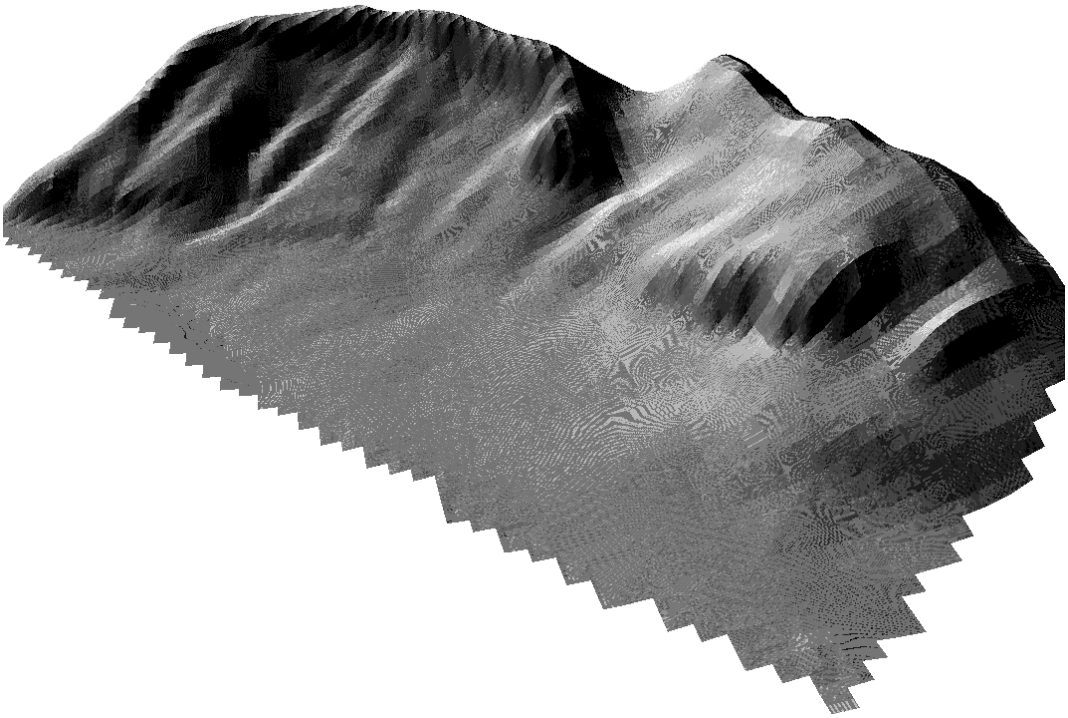
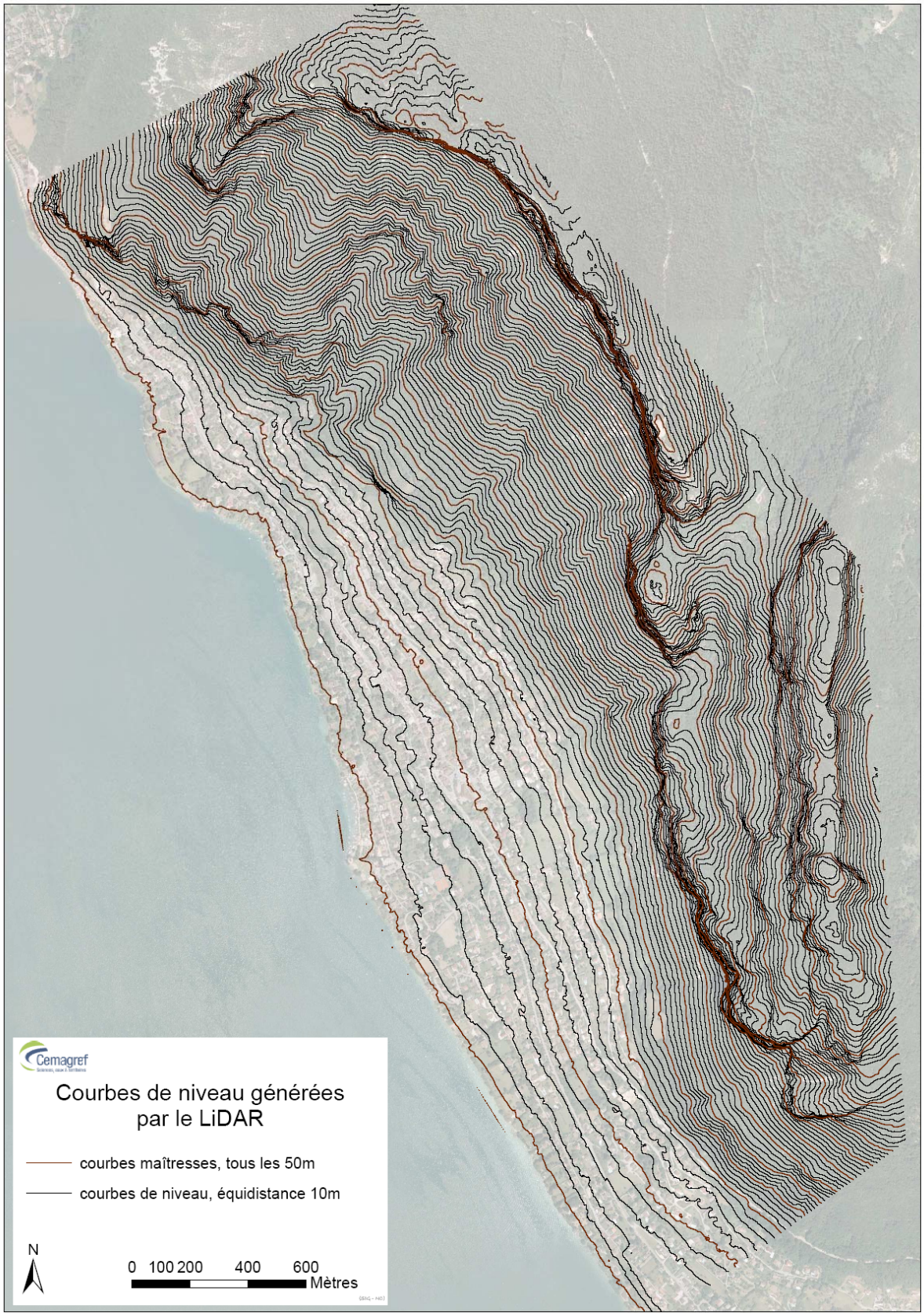
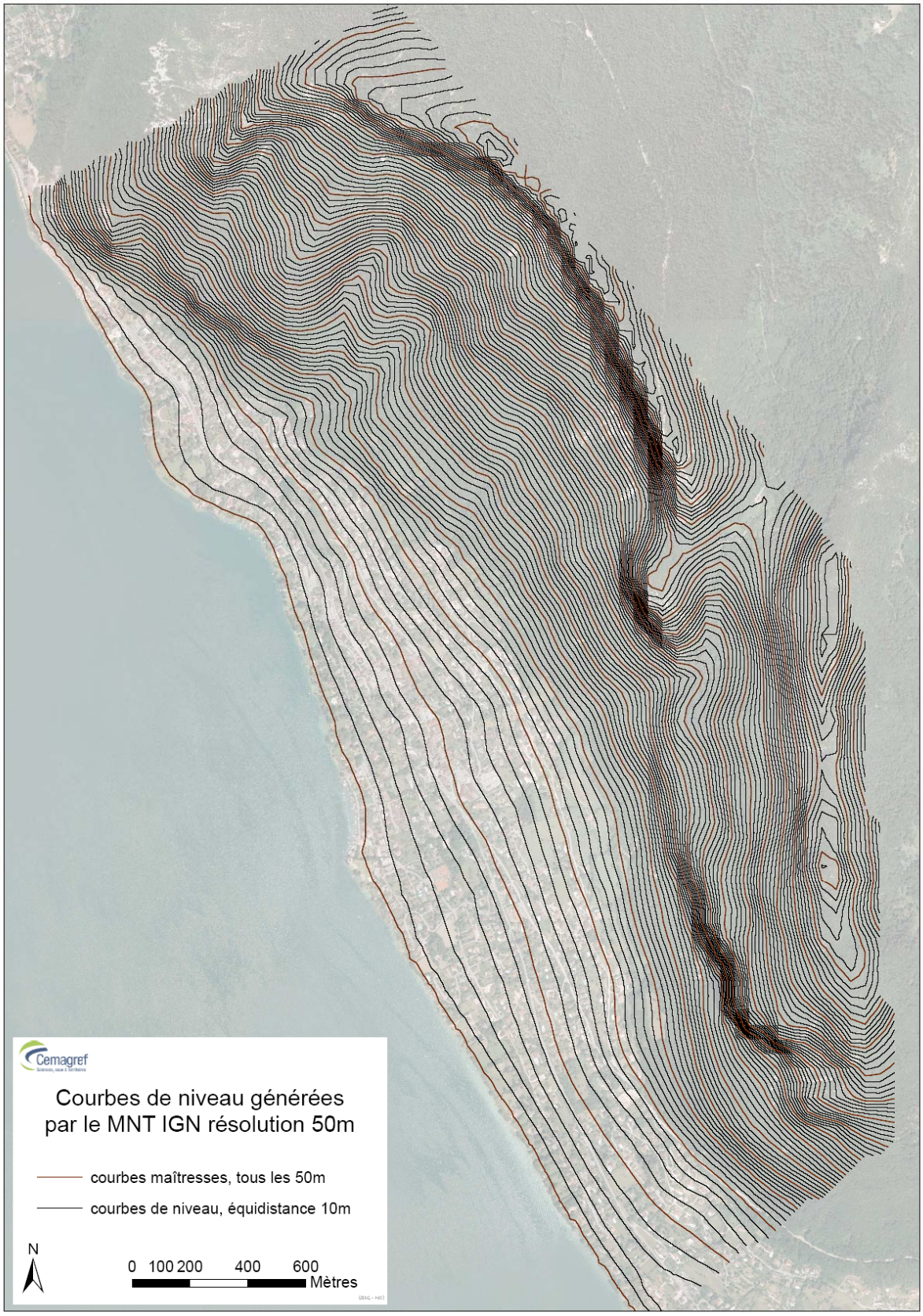


Figure 19 : vue en 3D du territoire de la commune de Veyrier-du-Lac réalisé avec le MNT ce l'IGN au pas de 50m.

Carte 3 : Courbes de niveau de la carte au 1/25000 de l'IGN.



Carte 4 : Courbes de niveau obtenues par interpolation du MNT Lidar au pas de 1*1m.



Carte 5 : Courbes de niveau obtenues par interpolation du MNT de l'IGN au pas de 50*50m.

En plus d'avoir testé et validé le MNT Lidar, nous avons aussi testé et validé la qualité du MNE. Cette validation a été réalisée en comparant les données altimétriques au toit de certains obstacles ; arbres et bâtiment. Compte tenu des erreurs de mesure terrain, liées aux instruments de mesure, on obtient une erreur quadratique moyenne de 48 cm sur la hauteur de ceux-ci. La figure 20 présente la qualité de la résolution des données Lidar pour une maison située la commune.

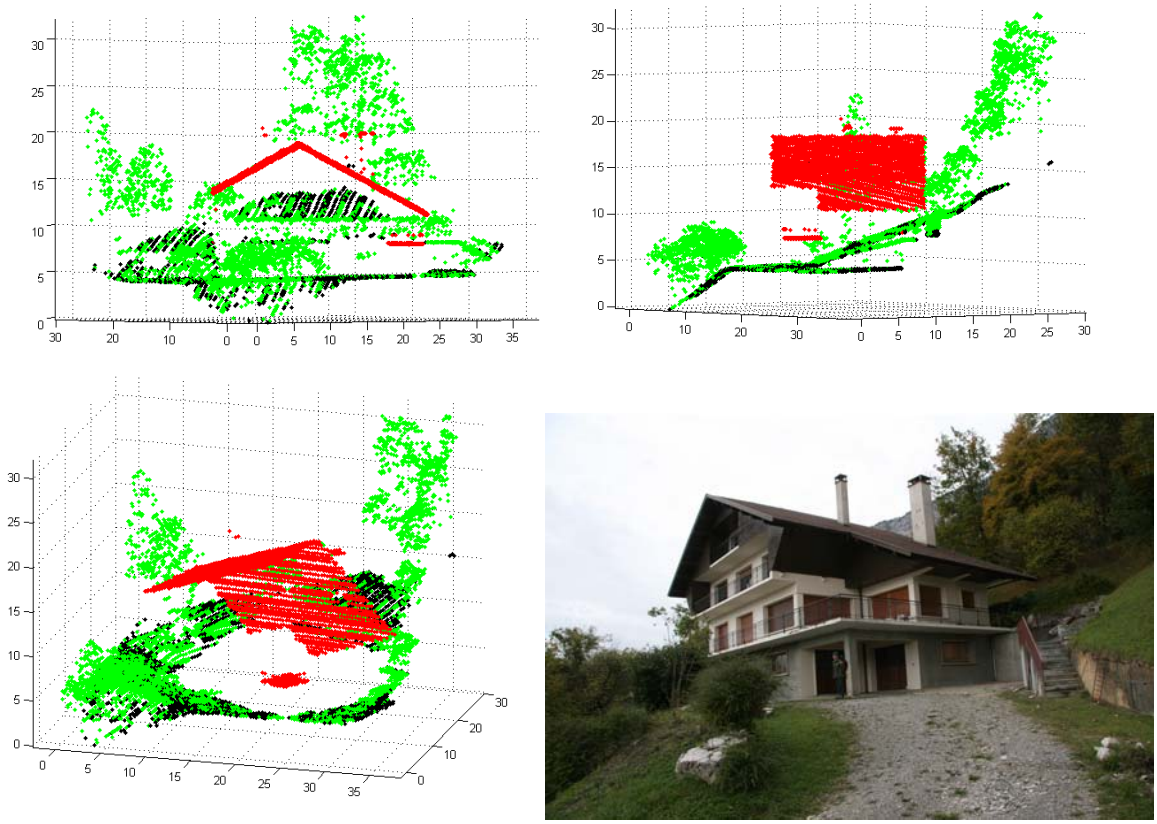
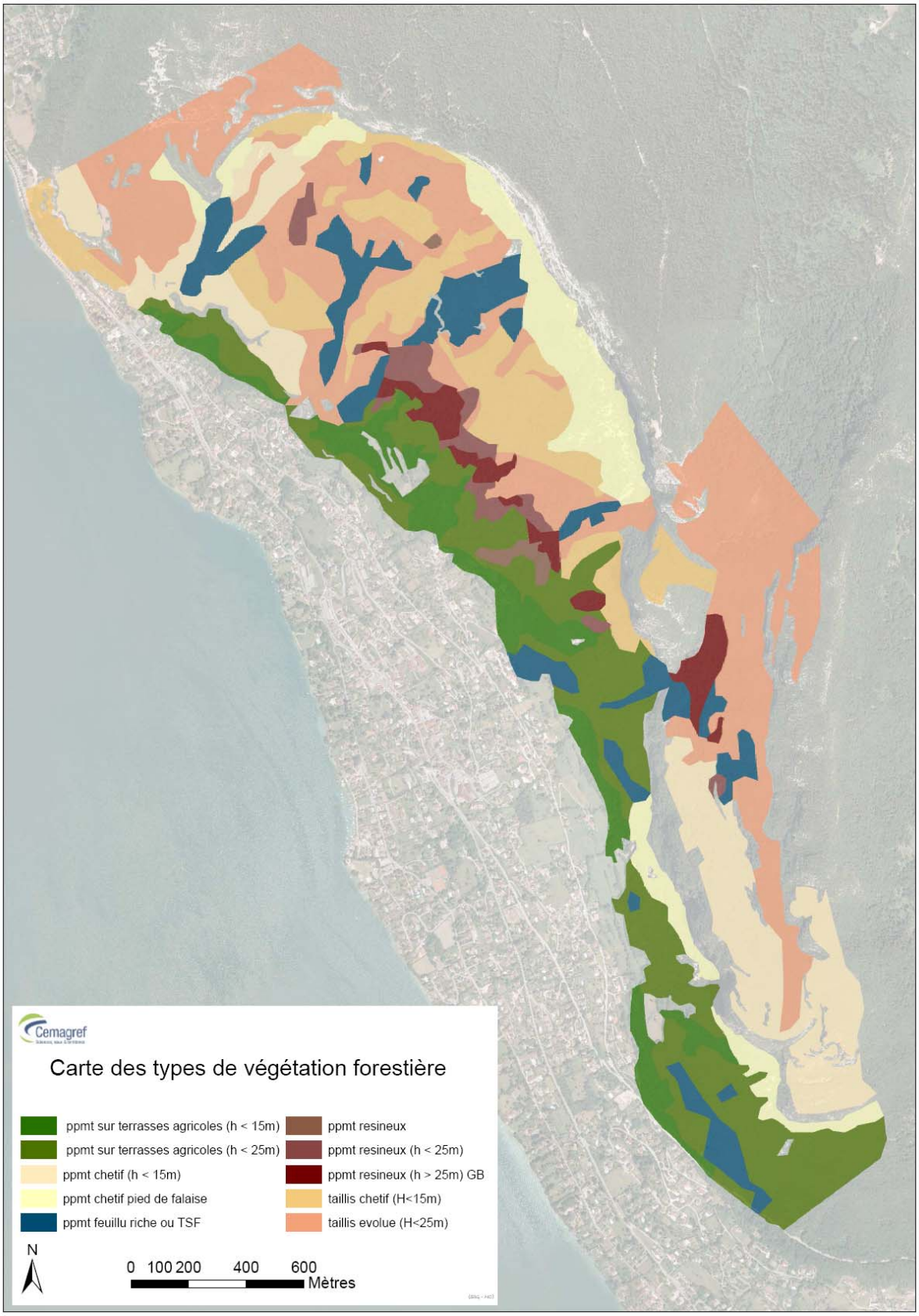


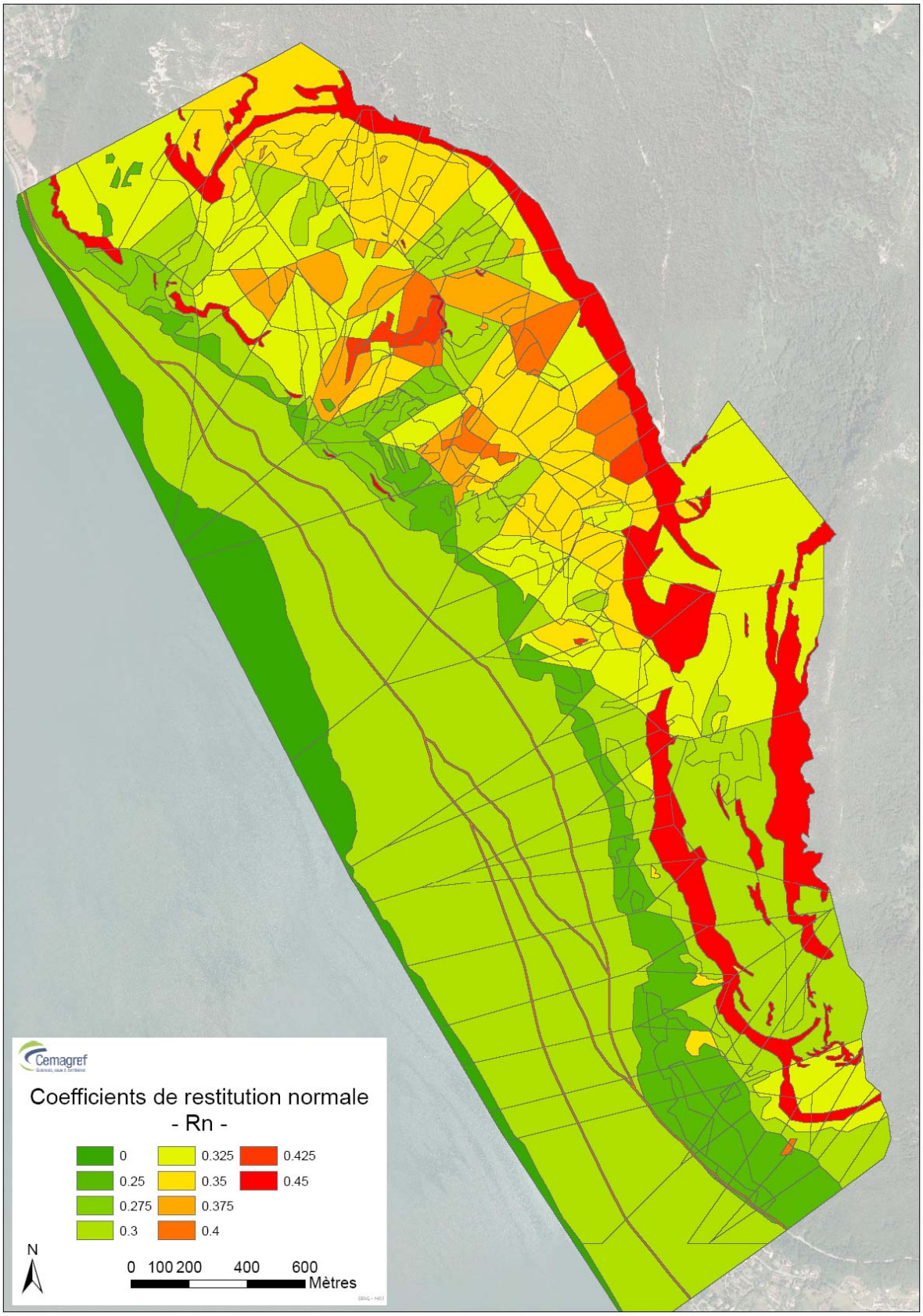
Figure 20 : Visualisations de face, profil et en contreplongée, pour une maison individuelle située dans la commune de Veyrier-du-Lac, des données lidar du MNE et photographie de la maison.

Le MNE Lidar étant valide nous l'avons utilisé pour déterminer des secteurs géographiques homogènes en termes de hauteur des arbres peuplements. Cette information associée aux données collectées sur le terrain a permis de réaliser la carte des types de peuplements forestiers et de construire les couches de données forestières utilisées par la suite pour les travaux de simulations. La carte 6 présente la cartographie des types de végétation forestière que nous avons ainsi obtenue.

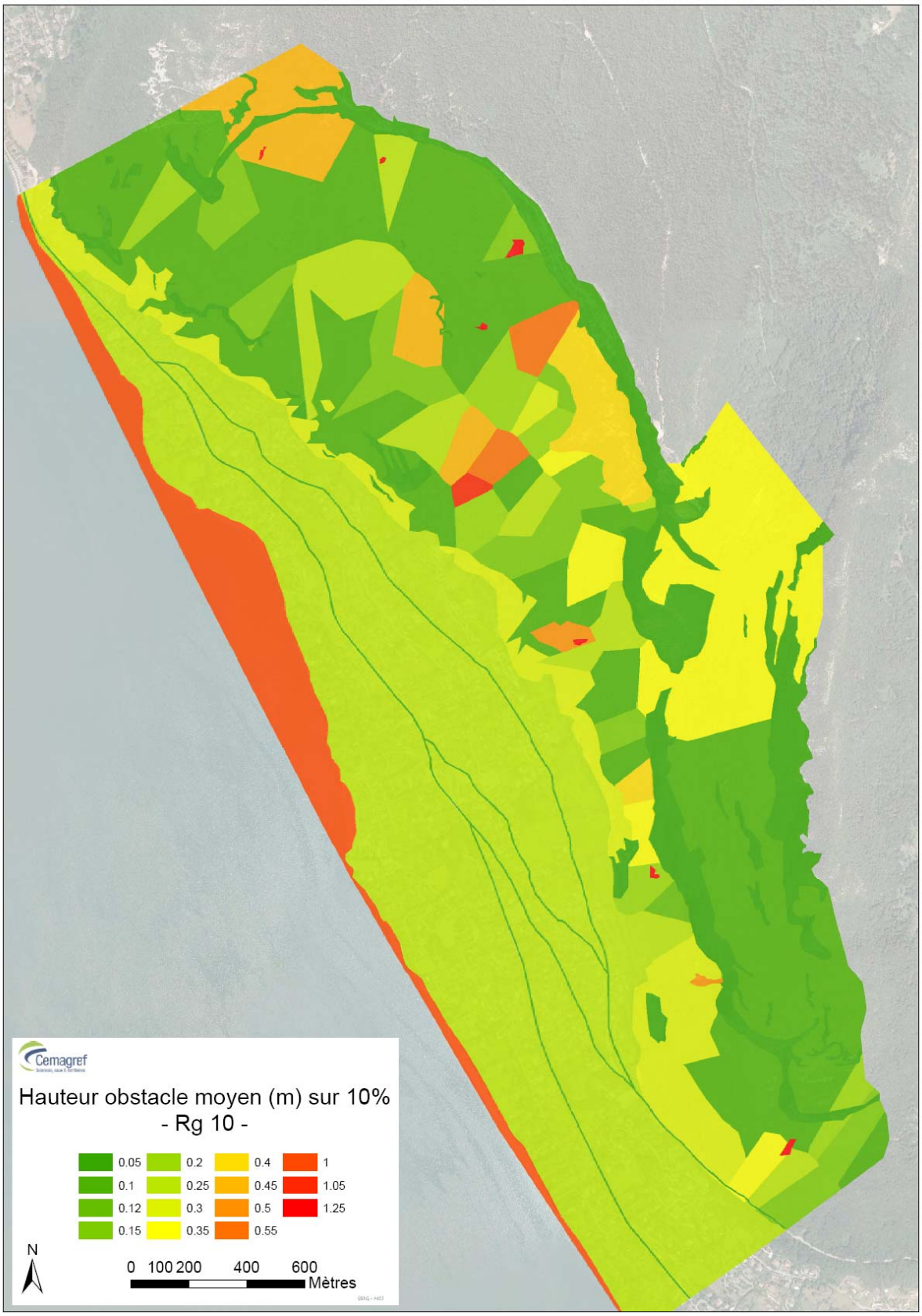
A partir de nos relevés de terrain et de l'analyse du MNE (hauteur de la végétation forestière en partie représentative des conditions édaphiques) et du MNT (carte des pentes et des convexités) nous avons premièrement cartographié des unités géomorphologique et deuxièmement caractérisé celles-ci en termes de coefficient de restitution normale et de rugosité (Rg10, 20 et 70%) des sols. Les cartes 7 à 10 présentent les résultats de ces analyses de terrain.



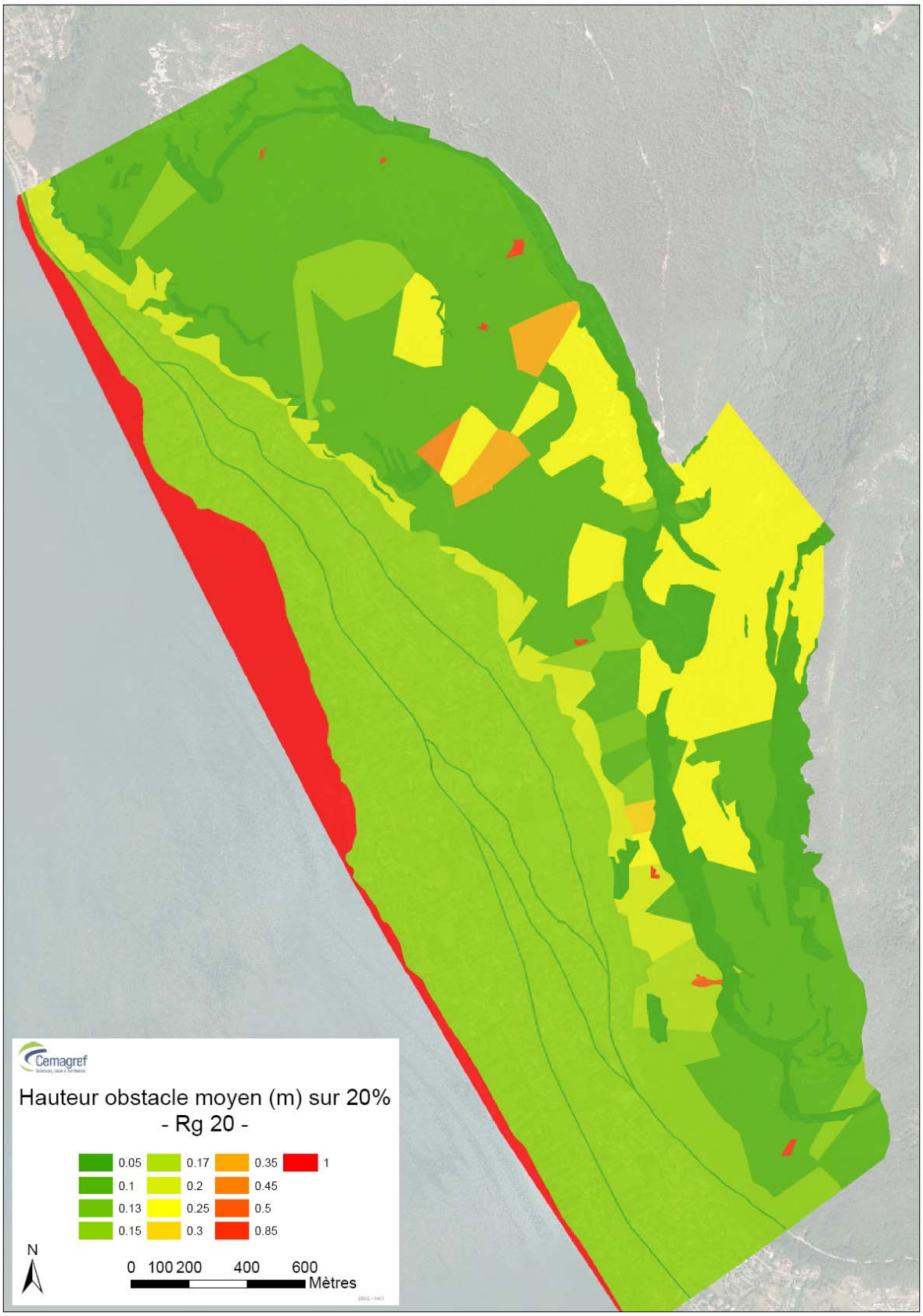
Carte 6 : Carte des types de végétation forestière utilisée pour les travaux de simulations.



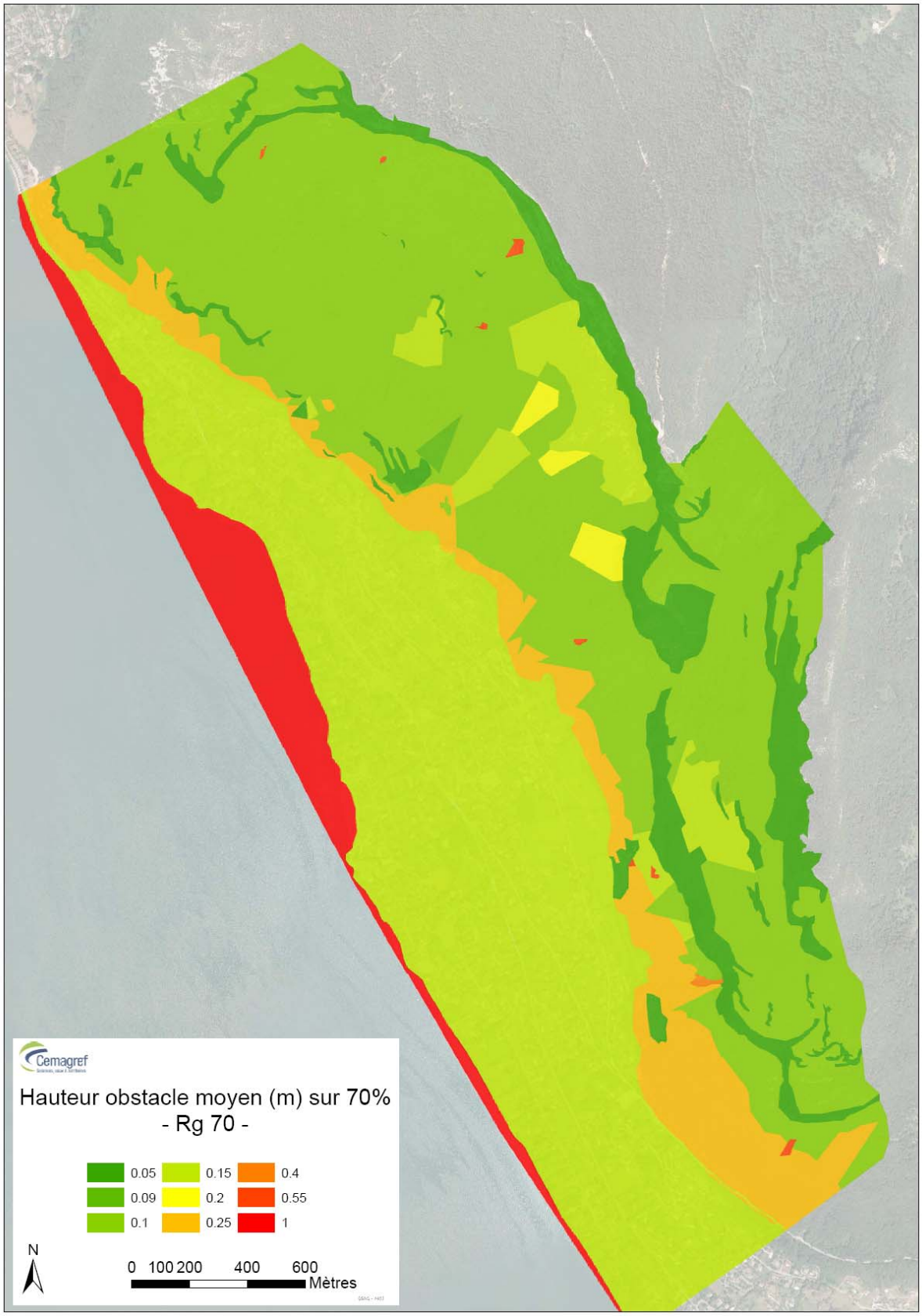
Carte 7 : Carte des coefficients de restitution normale.



Carte 8 : Carte de la rugosité présente sur 10% (Rg10) de la surface des unités géomorphologique, exprimée en hauteur moyenne des matériaux présents sur 10% de la surface de référence.



Carte 9 : Carte de la rugosité présente sur 20% (Rg20) de la surface des unités géomorphologique, exprimée en hauteur moyenne des matériaux présents sur 20% de la surface de référence.



Carte 10 : Carte de la rugosité présente sur 70% (Rg70) de la surface des unités géomorphologique, exprimée en hauteur moyenne des matériaux présents sur 70% de la surface de référence.

Avant de passer à la phase de détermination de l'aléa de référence centennal, nous avons déterminé et validé la localisation des zones de départ pour les travaux de simulation. Cette détermination a été réalisée en utilisant le MNT Lidar au pas de 1*1m afin que cette détermination soit la plus exhaustive possible. Nous avons donc utilisé cette valeur de 1m pour déterminer avec notre modèle mathématique, précédemment présenté, la valeur de la pente correspondante à ces zones dans la carte des pentes issue de ce MNT. Cette valeur est de 55° ($=55°*5^{-0.075}$).Par conséquent toute zone de pente supérieure à 55° dans la carte des pentes, calculées avec le MNT au pas de 1*1m, a été considérée comme une zone de départ pour les travaux de simulations. La carte 10 présente la carte des pentes et la carte 11 la localisation de ces zones avec ce critère de 55° et plus. Il ressort de cette carte que ces zones correspondent à la totalité des falaises et barres rocheuses présentes sur le territoire communal. Cette carte a été présentée et validée par les experts de l'Etat en charge de la révision du PPR de la commune.

Cette carte a été utilisée pour déterminer les secteurs d'étude correspondant au même aléa de référence centennal (cf. carte 12)