



Programme opérationnel Interreg IVA
France-Espagne-Andorre 2007 – 2013



SISPYR

Sistema de Información Sísmica del Pirineo
Systeme d'Information Sismique des Pyrénées
Sistema d'Informació Sísmica dels Pirineus

Prévention du risque sismique Impact des séismes sur les réseaux routiers

Action 4 – Sub Action 4.2



IGC
Institut Geològic
de Catalunya



Recherche pour une Terre durable

brgm



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

Instituto
Geográfico Nacional



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

SISPYR / Interreg IVA

Auteurs : Colas B.⁵

Mots-clés: Séisme, mouvement de terrain

1. IGC, Institut Geològic de Catalunya
2. OMP, Université Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées
3. UPC, Universitat Politècnica de Catalunya
4. IGN, Instituto Geografico Nacional
5. BRGM

© 2012 SISPYR project

A42 – Scenarios de risque sismique / Impact sur réseau routier

Synthèse

Le projet européen SISPYR, financé par le programme POCTEFA 2007–2013 France-Espagne-Andorre est lancé officiellement en juin 2009 pour 3 ans avec l'IGC (Institut Geològic de Catalunya) comme chef de file et comme partenaires : OMP (Observatoire Midi-Pyrénées) et BRGM (en France), IGN (Instituto Geográfico Nacional), UPC (Universitat Politècnica de Catalunya) en Espagne. Ce programme a pour objectifs la mise en commun des systèmes d'acquisition de données sur les phénomènes naturels et une meilleure adéquation des moyens scientifiques à la préparation de la gestion de crise sismique dans l'espace pyrénéen.

Une des actions du programme SISPYR a été d'engager une réflexion sur la prise en compte d'effets induits liés au séisme sur la praticabilité des infrastructures routières. Dans un premier temps, il a été décidé de se cantonner aux phénomènes de mouvements de terrain en terme d'effets induits.

Le principe développé repose sur une évaluation de l'augmentation des aléas mouvement de terrain spécifiquement liés à la sollicitation sismique. L'idée a été de comparer pour un territoire donné que constitue la zone pilote du Val d'Aran Luchonnais, les niveaux d'aléa mouvement de terrain sans et avec prise en compte d'accélération de sol liée au séisme. L'analyse a reposé sur :

- le recensement des mouvements de terrain sur la zone pilote et la représentation de la sensibilité géomorphologique aux mouvements de terrain pour qualifier l'aléa mouvement de terrain hors prise en compte du séisme ;
- une estimation de l'impact du séisme sur la rupture à partir de méthodes globales sur la diminution de coefficient de sécurité à la rupture sous sollicitation dynamique ;
- une analyse comparée de scénarios sismiques pour localiser et hiérarchiser les tronçons routiers sensibles aux phénomènes « mouvement de terrain ».

Au final, cette analyse permet de hiérarchiser les 120 km de réseau routier français et espagnol de la zone pilote en isolant potentiellement des secteurs critiques. Deux scénarios de risque sismique sont traités : scénario probabiliste dit « ISARD » et scénario déterministe correspondant au séisme historique de 1923 dans le Val d'Aran.

Finalement, la hiérarchisation aboutie du risque induit sur la zone d'étude impliquerait des développements en complément :

- D'une part, une cartographie fine de l'aléa mouvement de terrain intégrant l'intensité des phénomènes (intensité, vitesse) ainsi qu'un diagnostic de vulnérabilité physique des nœuds du réseau au risque sismique (ponts et ouvrages d'art) ;
- D'autre part, afin d'avoir une vision objective du risque induit par les séismes sur l'accessibilité aux sites impactés, une évaluation de la vulnérabilité fonctionnelle des réseaux (en englobant les flux de trafic, l'importance stratégique des réseaux et les possibilités de contournement en particulier).

Sommaire

1.	Introduction	7
1.1.	Cadrage général.....	7
1.2.	Principe d'analyse	8
2.	Contexte géographique et géologique	9
2.1.	Zone pilote.....	9
2.2.	Géologie.....	10
3.	Recensement des mouvements de terrain sur la zone pilote	12
3.1.	Glissements de terrain	12
3.2.	Eboulements – Chutes de blocs.....	13
4.	Représentation de la sensibilité géomorphologique aux mouvements de terrain.....	16
4.1.	Sensibilité du critère géologique	16
4.2.	Sensibilité du critère morphologique	18
4.3.	Analyse couplée litho-morphologique	19
5.	Aléa mouvement de terrain (hors prise en compte du séisme).....	22
5.1.	Analyse de la rupture	22
5.2.	Analyse de la propagation.....	23
6.	Aléa mouvement de terrain (prise en compte du séisme).....	25
6.1.	Analyse de la rupture	25
6.2.	Prise en compte de la propagation.....	27
6.3.	Analyse comparée sur scénarios	28
7.	Déclinaison sur le réseau routier.....	31
8.	Conclusion	33
9.	Références	35

Table des illustrations

Figure 1 – Schéma méthodologique	8
Figure 2 – Situation, communes zone pilote et réseau routier © fond Google Earth	9
Figure 3 – Synthèse des formations géologiques représentée (échelle 1 :50 000)	10
Figure 4 – Extraction sur la zone pilote de la carte géologique à 1 :400 000 des Pyrénées	11
Figure 5 – Types de glissement (plan à gauche, rotationnel à droite).....	12
Figure 6 – Eboulement	14
Figure 7 – Eboulement et glissement superficiel (zone pilote).....	15
Figure 8 – Carte des éboulements et glissements recensés (fond géologique 1 :400 000)	16
Figure 9 – Formations géologiques à l'échelle du 1 :50 000 (extrait).....	17
Figure 10 – Distribution des mouvements de terrain en fonction des lithologies principales	17
Figure 11 – Distribution des pentes du terrain naturel sur la zone d'étude (d'après MNT)	18
Figure 12 – Distribution des mouvements de terrain en fonction des pentes (MNT) ...	18
Figure 13 – Distribution des densités de mouvements de terrain par classe de pentes (d'après MNT)	19
Figure 14 – Exemple de définition de valeurs seuils de classe de pente MNT au regard des densités de mouvements observées	20
Figure 15 – Distribution des densités de mouvements de terrain par pentes MNT.....	20
Figure 16 – Valeur d'angle de pente sur MNT et dans la réalité (Cemagref 2008).....	21
Figure 17 – Potentialité de rupture aux mouvements de terrain.....	22
Figure 18 – Principe de fonctionnement du logiciel BORA (BRGM, 2006)	23
Figure 19 – Potentialité de propagation des mouvements de terrain.....	24
Figure 20 – Carte de l'aléa mouvement de terrain sur la zone d'étude.....	25
Figure 21 – Principe de base de la sécurité au glissement (« statique »).....	26
A42 – Scenarios de risque sismique / Impact sur réseau routier	5

Figure 22 – Aléa de rupture « dynamique » (ISARD)	27
Figure 23 – Aléa résultant « dynamique » (ISARD).....	28
Figure 24 – Comparaison des aléas résultant (ISARD).....	29
Figure 25 – Comparaison des aléas résultant (1923, M 5.5).....	30
Figure 26 – Restitution des résultats sur le réseau routier	31
Figure 27 – Exemple de restitution finale (scénario probabiliste ISARD)	32
Figure 28 – Synthèse des linéaires exposés	33

Annexe

Annexe 1 Carte géologique harmonisée à l'échelle 1 :50 000 de la zone pilote Val Aran-Luchonnais

Annexe 2 Formations géologiques de la zone pilote Val Aran-Luchonnais

1. Introduction

1.1. *Cadrage général*

Le projet européen SISPyR, financé par le programme POCTEFA 2007–2013 France-Espagne-Andorre est lancé officiellement en juin 2009 pour 3 ans avec l'IGC (Institut Geològic de Catalunya) comme chef de file et comme partenaires : OMP (Observatoire Midi-Pyrénées) et BRGM (en France), IGN (Instituto Geográfico Nacional), UPC (Universitat Politècnica de Catalunya) en Espagne.

Le programme a pour objectifs la mise en commun des systèmes d'acquisition de données sur les phénomènes naturels et une meilleure adéquation des moyens scientifiques à la préparation de la gestion de crise sismique dans l'espace pyrénéen. Le programme s'articule autour de 4 axes de réflexion et intéresse l'ensemble de la chaîne des Pyrénées :

- Observation sismique et partage des données par les opérateurs des réseaux pyrénéens : la mise en commun des données issues des réseaux d'observations sismiques français et espagnols, leur partage en temps réel et l'archivage commun de l'ensemble des données issues des réseaux constitue un point fort du projet qui au travers d'une plate-forme d'interopérabilité pérennise le suivi de la sismicité des Pyrénées.
- Connaissance des aléas sismiques en zone Pyrénées : la valorisation des données d'observation ouvre des perspectives de recherche scientifique sur les mécanismes à la source et les modèles d'atténuation du mouvement sismique. En outre, le développement, à partir des données d'observation, de calcul automatique de tenseurs de moment est réalisé pour les séismes de la zone de projet.
- Gestion du risque sismique : afin d'apporter une aide aux acteurs de la gestion de crise :
 - o la génération de cartes de mouvements du sol dans les minutes qui suivent un tremblement de terre : « shake-maps » est développée. Dans la même optique, l'étude de faisabilité d'un système d'alerte sismique précoce valorisant le réseau de surveillance (EWS : Early Warning System) est étudiée au sein du programme. Ce système doit permettre, le cas échéant, de mettre en œuvre des procédures permettant de minimiser les dommages en cas de séisme dans la région.
 - o Enfin différents scénarios de risque sismiques sont envisagés depuis l'analyse de dommage, appréhendée de façon statistique à l'échelle communale jusqu'à la modélisation du comportement d'un bâtiment isolé. Les sites pilotes du projet sont notamment le Val d'Aran et le Luchonnais.

Le présent rapport s'inscrit dans cette dernière action « scénario de risque sismique » et s'attache à présenter les conclusions des travaux relatifs à la prise en compte des effets induits par les séismes sur la praticabilité des infrastructures routières. Les effets induits considérés sont exclusivement les phénomènes de mouvements de terrain.

2. Contexte géographique et géologique

2.1. Zone pilote

La zone d'étude est représentée par le secteur du Val d'Aran-Luchonnais objet des scénarios de dommages sismiques de l'action 4.2 du programme SISPYR.

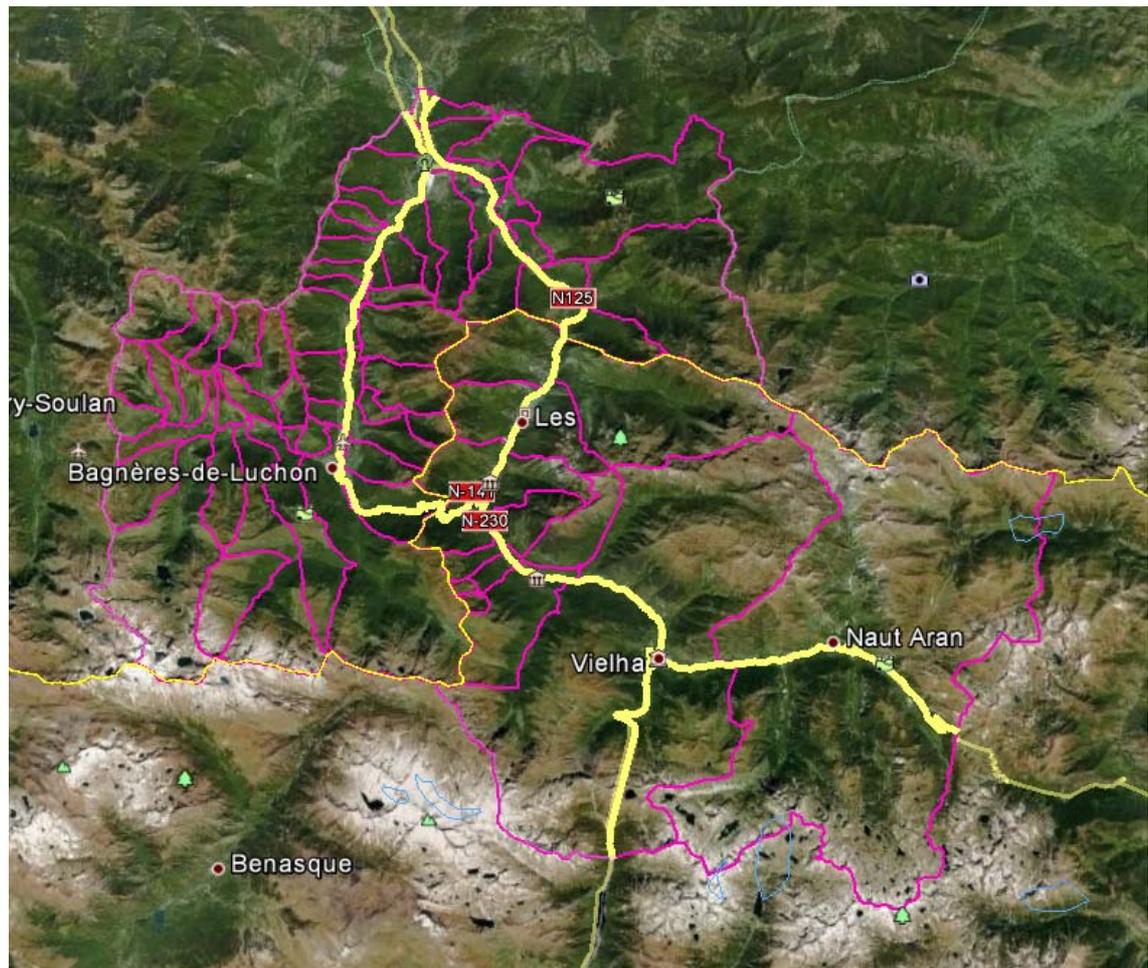


Figure 2 – Situation, communes zone pilote et réseau routier © fond Google Earth

Le réseau considéré pour l'analyse de l'impact potentiel de séismes sur les réseaux est marqué par les routes principales uniquement, mais l'analyse pourrait tout à fait se décliner aux voies secondaires :

- en France : D33S, D818, D625, D125, D825A, N125, D618A
- en Espagne : N141, N230, C28

2.2. Géologie

La donnée géologique est constituée par les cartes géologiques existantes et partagées entre BRGM et IGC dans le cadre du projet :

- carte des Pyrénées à l'échelle des Pyrénées (échelle 1 :400 000) ;
- cartes géologiques à l'échelle 1 :50 000 existant des deux côtés de la frontière.

Un des premiers travaux engagés par le projet a été l'harmonisation géologique au niveau transfrontalier à l'échelle du 1 :50 000. Cette cartographie a été valorisée pour la présente action mais également dans le cadre de la réalisation de scénarios sismiques de dommages au bâti dans le Luchonnais-Val d'Aran. Le résultat de ce travail est présenté en annexe 1. La synthèse des formations selon l'échelle de travail diffère fortement :

- 24 formations distinguées au 1:400 000 ;
- 131 formations distinguées au 1 :50 000.

La valorisation des données géologiques s'est concentrée sur les cartes à l'échelle 1 :50 000 plus précises et adaptées aux objets considérées :

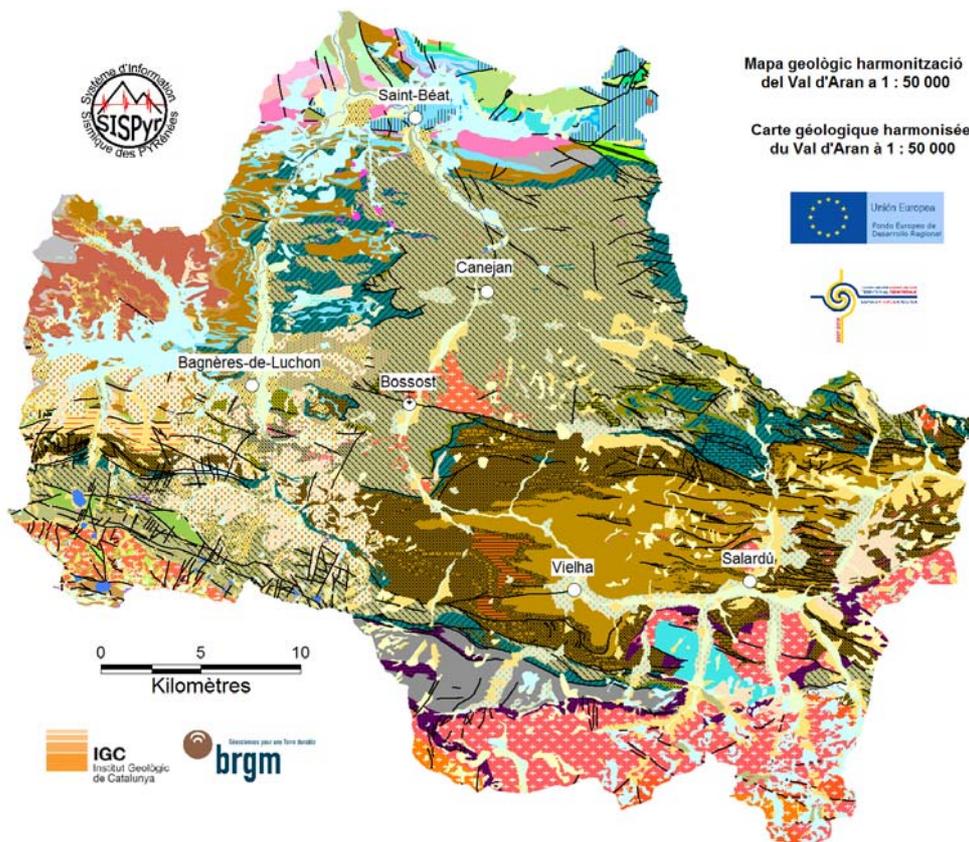
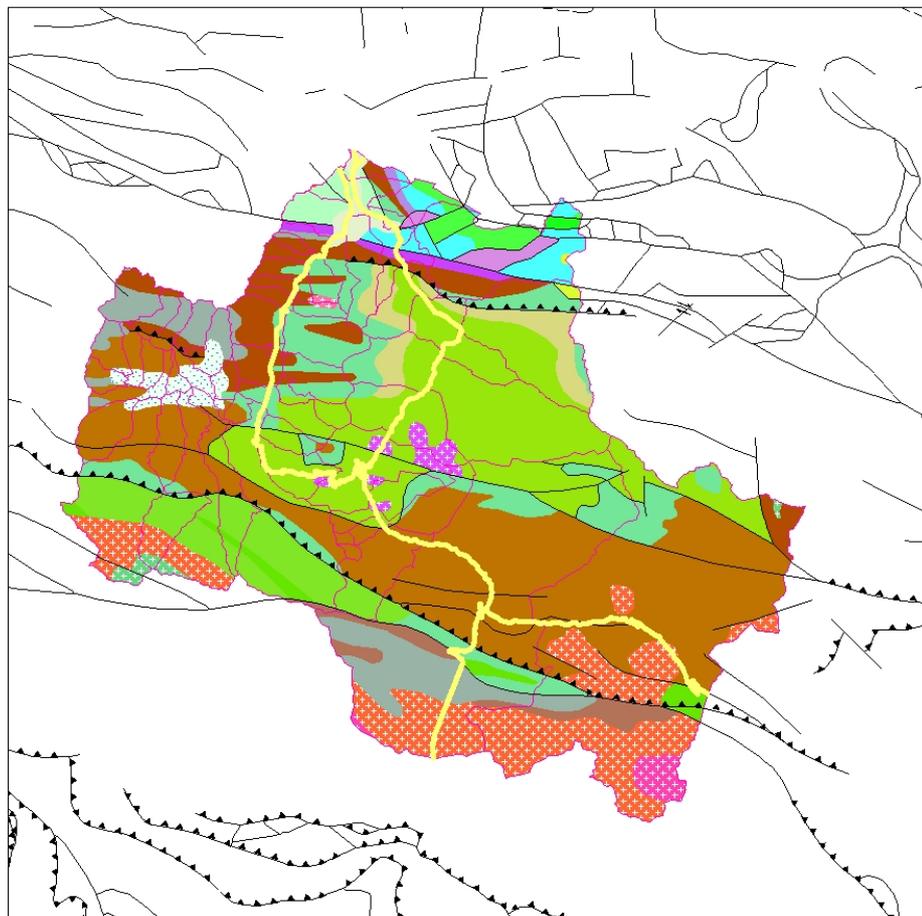


Figure 3 – Synthèse des formations géologiques représentée (échelle 1 :50 000)



Légende

- q3a : Dépôts actuels des fleuves : sables, argiles, graviers, galets (1)
- q2b : Moraines (23)
- cF : Flysch : calcschistes, marnes, schistes, conglomérats (624)
- n : Marnes, grès, calcaires (701)
- ub : Ultrabasites, lherzolithes, serpentinites exhumées au Crétacé inférieur (2381)
- j : Calcaires, marnes, dolomies, conglomérats (921)
- tV : Ophites, dolérites (1021)
- t2 : Grès conglomérats, schistes (1041)
- r-1 : Grès conglomérats, pélites (1121)
- h2-5Gi : Granitoïdes indifférenciés (1341)
- h2-5Ga : Gabbros, diorites, tonalites (1344)
- h2-5Lg : Leucogranites alumineux (1345)
- h2-5G : Monzogranites, granodiorites, charnockites (1346)
- h2-5Mg : Monzogranites, granodiorites calco-alcalins (1348)
- h1-4 : Séries condensées (carbonates et silexites), calcaires de plateforme et turbidites de faciès fin avec coulées de débris olistostromes de carbonates intercalés (1401)
- dF : Séries marines mixtes détritico-carbonatées (domaine de Sallent, Montagne Noire, Baliera et Ferrières) (512)
- dC : Séries marines avec prédominance détritico (domaine central) (515)
- dS : Série marines avec prédominance de carbonates, comprenant des séries condensées du Dévonien moyen et supérieur (domaines de Compte, oriental et septentrional) (516)
- s : Schistes ampéliteux avec intercalations gréseuses et niveaux de calcaires noires dans la partie supérieure (1621)
- o5-6 : Grès, conglomérats, schistes, calcaires, volcanites (1661)
- KEI : Pélites, grès fins, calcaires (Formation d'Evol, membre inférieur) (5100)
- KEs : Pélites, grès fins, calcaires (Formation d'Evol, membre supérieur) (5200)
- KE : Formation d'Evol indifférenciée (avec Formation de Jujols dans les chaînes côtières Catalanes) (5300)
- b : Schistes pélitiques, calcaires et dolomies, volcano-sédiments (2221)

Figure 4 – Extraction sur la zone pilote de la carte géologique à 1 :400 000 des Pyrénées

3. Recensement des mouvements de terrain sur la zone pilote

Le recensement des mouvements de terrain, base d'information pour qualifier l'état de l'aléa associé, est réalisé sur la base de :

- exploitation de base de données existantes (base de données nationale des mouvements de terrain – www.bdmvt.net, www.bd-rtm.fr ;
- recensement sur le terrain au cours d'une mission spécifique engagée dans le cadre du projet majoritairement le long des réseaux routiers objet des travaux.

Ces travaux ont permis le recensement de 58 cas de glissement de terrain et de 153 cas de chutes de blocs. Au final ce sont 211 évènements recensés dont uniquement 164 ont pu être exploités (la précision insuffisante des coordonnées étant jugée parfois discriminante du point de vue de la valorisation).

3.1. Glissements de terrain

Un glissement de terrain correspond à un déplacement généralement lent (de quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) sur une pente, le long d'une surface de rupture dite surface de cisaillement, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variables : quelques mètres cubes dans le cas du simple glissement de talus ponctuel à quelques millions de mètres cubes dans le cas d'un mouvement de grande ampleur pouvant concerner l'ensemble d'un versant.

Trois types de glissement sont distingués en fonction de la géométrie de la surface de rupture :

- glissement plan ou translationnel, le long d'une surface plane ;
- glissement circulaire ou rotationnel, le long d'une surface convexe ;
- glissement quelconque ou composite lorsque la surface de rupture est un mélange des deux types.

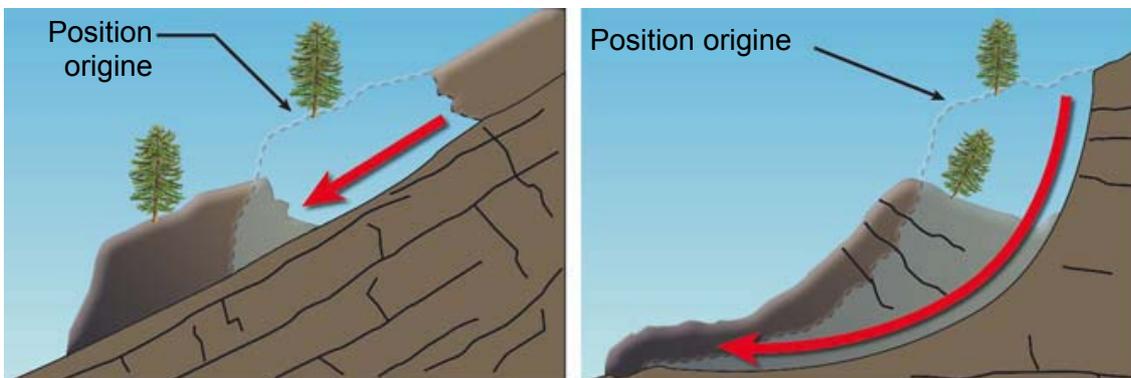


Figure 5 – Types de glissement (plan à gauche, rotationnel à droite)

Les principaux facteurs d'instabilités sont décrits ci-après :

Facteurs permanents (= de prédisposition, de susceptibilité)

La pesanteur est le moteur du glissement ;
 La pente régit directement l'équilibre des efforts mécaniques ;
 L'eau diminue la résistance au frottement, modifie les caractéristiques de certains matériaux et augmente le poids des terrains ;
 La nature des terrains (lithologie) conditionne directement leur sensibilité au glissement (marnes, argiles, substratum schisteux, alternance matériaux tendres et rocheux) ;
 La structure des terrains, c'est-à-dire l'empilement des couches géologiques (stratigraphie) et les discontinuités (fracturation, failles, joints de stratification), est déterminante pour l'apparition d'une surface de rupture.

Facteurs variables dans le temps (= déclenchant, aggravant)

Les précipitations et la fonte des neiges agissent sur le facteur permanent qu'est l'eau dans le sol en augmentant les pressions interstitielles et la mise en charge des terrains ;
 Les cours d'eau qui lorsqu'ils entrent en crue et affouillent un pied de glissement, entraînent son activation ;
 Les séismes provoquent des vibrations qui peuvent être responsables du déclenchement de glissements ;
 De nombreux glissements ont pour origine les actions humaines (terrassements, rejets, fuites ou pompages d'eau, les surcharges, etc.).

3.2. **Eboulements – Chutes de blocs**

Ce sont des mouvements rapides discontinus et brutaux résultant de l'action de la pesanteur et affectant des matériaux rigides et fracturés tels que calcaires, grès, roches cristallines, etc. Ces chutes sont caractérisées par une zone de départ une zone de propagation et une zone d'épandage.

Les blocs décrochés suivent généralement la ligne de plus grande pente. Les distances parcourues sont fonction de la position de la zone de départ dans le versant, de la pente du versant, de la taille, de la forme et du volume des blocs éboulés, de la nature de la couverture superficielle, de la végétation...

En fonction du volume des éléments mobilisés, on distingue : les pierres (inférieur au dm³), les blocs (entre 1 dm³ et 1 m³) et les gros blocs (supérieur au m³).

En fonction du volume total éboulé, les phénomènes sont distingués en :

- chutes de pierres ou de blocs (quelques dizaines à quelques centaines de m³) ;
- éboulement en masse (de quelques centaines à quelques centaines de milliers de m³) ;
- éboulements (écroulement) en grande masse (supérieur au million de m³).

L'intensité est décrite en fonction :

- du volume total, de la taille des éléments unitaires ;
- de la parade à mettre en œuvre pour les contrer : faible (purge de blocs instables)/moyenne (drainage)/forte (pose de protection de type filet)/majeure (pas de parade technique) ;
- de l'importance des pertes humaines ; moyenne (accident isolé)/forte (quelques victimes)/majeure (quelques dizaines de victimes)

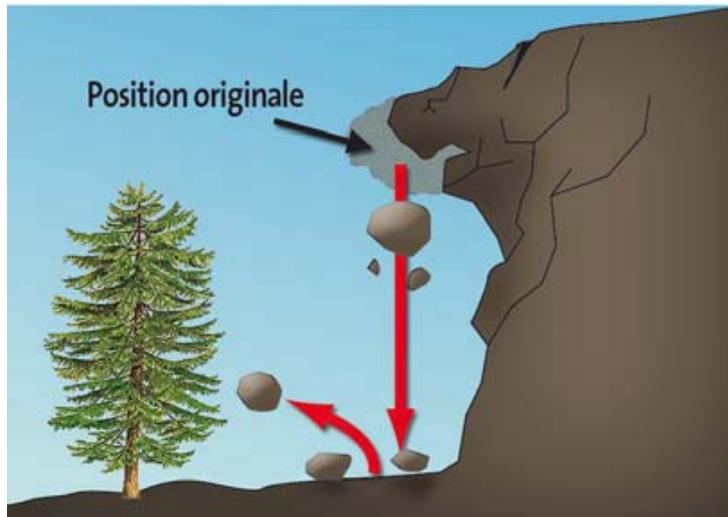


Figure 6 – Eboulement

Les principaux facteurs d’instabilités sont décrits ci-après :

**Facteurs permanents
(= de prédisposition, de susceptibilité)**

La **pesanteur** est le moteur des chutes ;
 La **morphologie** notamment la présence d’escarpements rocheux et leur géométrie, est déterminante ;
 L’**eau** diminue la résistance au frottement au niveau des discontinuités, altère les matériaux ;
 La **nature des terrains** (lithologie) conditionne directement leur sensibilité aux instabilités rocheuses ;
 La **structure des terrains**, c’est-à-dire l’empilement des couches géologiques (stratigraphie) et les discontinuités (fracturation, failles, joints de stratification), détermine les surfaces de rupture.

**Facteurs variables dans le temps
(= déclenchant, aggravant)**

Les **précipitations et la fonte des neiges** augmentent les pressions interstitielles et diminuent les frottements dans les discontinuités ;
 Les **épisodes de gel-dégel** ont pour effet d’élargir les discontinuités ;
 Les **séismes** provoquent des vibrations qui peuvent déstabiliser des masses rocheuses ;
 Les **racines des végétaux** s’introduisent dans les discontinuités et les agrandissent ;
 Les **actions humaines** (terrassements, vibrations : explosion, rejets, fuites ou pompages d’eau, etc.) peuvent déclencher des chutes de masses rocheuses ;
 Le **couvert végétal** : plus il sera dense plus il réduira significativement la surface de la zone de réception en freinant les blocs.



Figure 7 – Eboulement et glissement superficiel (zone pilote)

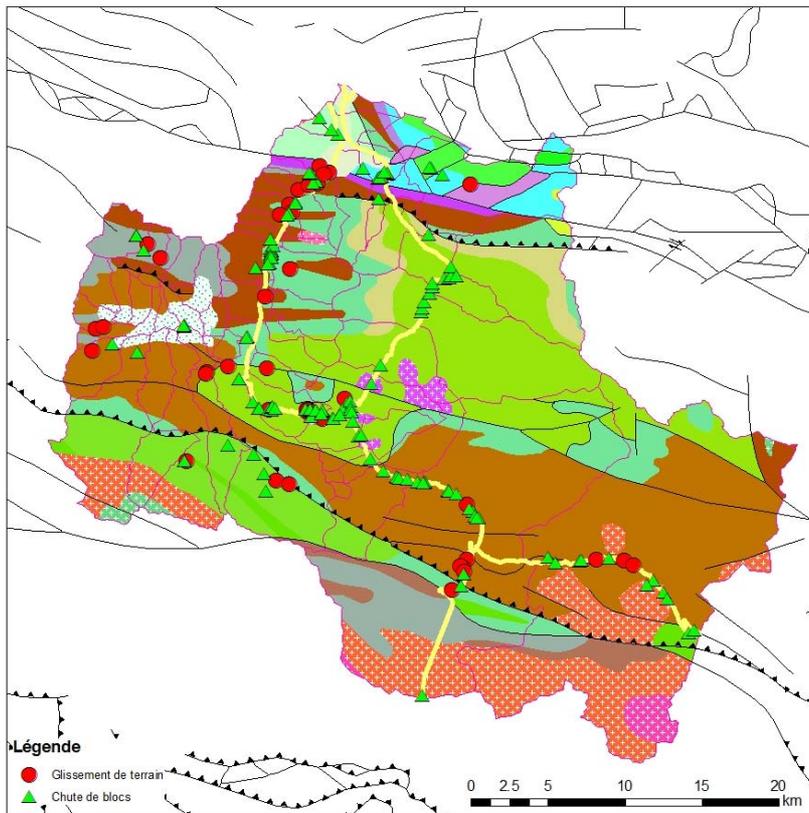


Figure 8 – Carte des éboulements et glissements recensés (fond géologique 1 :400 000)

4. Représentation de la sensibilité géomorphologique aux mouvements de terrain

Comme évoqué les facteurs principaux de prédisposition aux mouvements de terrain sont la morphologie et la nature des terrains. L'analyse de sensibilité de ces 2 paramètres est donc réalisée afin d'estimer, au regard des évènements passés, la susceptibilité spatiale aux mouvements de terrain du secteur étudié.

La démarche déployée est méthodologique et ne peut être considérée comme pleinement opérationnelle en raison notamment de l'échantillonnage de mouvement de terrain jugé insuffisant à l'échelle du bassin de travail.

4.1. Sensibilité du critère géologique

La synthèse des formations géologiques représentées et leur sensibilité relative aux mouvements de terrain en distinguant glissement de terrain et chute de bloc est reportée en annexe 2. Un exemple est donné ci-dessous :

Lithologie principale	Notation	Description (Fr)	Sensibilité aux...	
			glissement	chutes de blocs
Alluvions	Fy	Terrasse post-glaciaire; Basse terrasse tardi-glaciaire non inondable; Dépôts morainiques	1	
	Fz	Plaine alluviale moderne ou fluvio-lacustre; basses terrasses; dépôts alluviaux indifférenciés; colluvions et dépôts de pente indifférenciés	1	
Altérites	i	Couverture d'altération sur terrains paléozoïques (en général schisteux)	1	1
	jd	Manteau d'altération de moyenne montagne sur Dévonien	1	1
	jh	Manteau d'altération de moyenne montagne sur Carbonifère	1	1
	jo	Manteau d'altération de moyenne montagne sur Ordovicien	1	1
	jo-d	Manteau d'altération de moyenne montagne sur Ordovicien-Dévonien	1	1
	is	Manteau d'altération de moyenne montagne sur Silurien	1	1
Argile	t5-7	Argilites versicolores, gypses, calcaires chamois, cargneules	1	1
Brèche	mBrl	Brèche mylonitisée à éléments paléozoïques		1
Calcaires	d1-5	Calcaires noduleux rouges, formation Manyanet		1
	d1-5C	Calcaires, calcschistes; Pérites noires à rares intercalations de calcschistes		1

Figure 9 – Formations géologiques à l'échelle du 1 :50 000 (extrait)

L'harmonisation des lithologies conduit à la création de 8 classes principales de lithologique sensibles aux mouvements de terrain :

Ensemble de formations	Lithologie dominante	Nb mvt	Surface (km ²)	densité (/100 km ²)
Dépôts alluviaux	Alluvions	13	50.8	
Total Dépôts alluviaux		13	50.8	25.6
Dépôts de pente	Colluvions	15	75.9	
	Eboulis	2	78.0	
Total Dépôts de pente		17	153.9	11.0
Dépôts glaciaires	Dépôts glaciaires	13	73.0	
Total Dépôts glaciaires		13	73.0	17.8
Roches et sols argileux	Altérites	24	55.2	
	Argile	0	0.0	
Total Roches et sols argileux		24	55.2	43.5
Roches carbonatées	Calcaires	16	83.1	
	Marbre	0	0.6	
Total Roches carbonatées		16	83.8	19.1
Roches siliceuses sédimentaires ou métamorphiques	Brèche	0	0.4	
	Conglomérats	1	6.4	
	Quartz	0	0.0	
	Quartzite	0	9.2	
	Schistes quartzeux	11	172.7	
Total Roches siliceuses sédimentaires ou métamorphiques		12	188.8	6.4
Schistes et micashistes	Calcschistes	16	153.7	
	Micaschistes	9	16.5	
	Pérites	0	0.1	
	Schistes argileux	37	270.0	
Total Schistes et micashistes		62	440.2	14.1
Roches plutoniques et magmatiques	Gabbros	0	8.8	
	Gneiss	1	2.4	
	Granite	6	102.6	
	Péridotite	0	0.6	
Total Roches plutoniques et magmatiques		7	114.4	6.1
Total général		164	1160.1	14.1

Figure 10 – Distribution des mouvements de terrain en fonction des lithologies principales

4.2. Sensibilité du critère morphologique

L'étude de la distribution des mouvements de terrain en fonction de la morphologie est basée sur les pentes du MNT sur la zone d'étude. Au final, indépendamment de la lithologie et de la nature des formations géologiques impliquées, on note que la distribution des mouvements constatés suit une distribution régulière avec :

- nombre faible de mouvements pour pentes faibles ;
- pic de mouvements répertoriés pour des pentes moyennes ;
- nombre faible de mouvements pour des pentes fortes.

Ce constat est à pondérer des surfaces exposées par classe de pente. L'analyse des distributions des pentes, indépendamment des lithologies, montre la forme suivante :

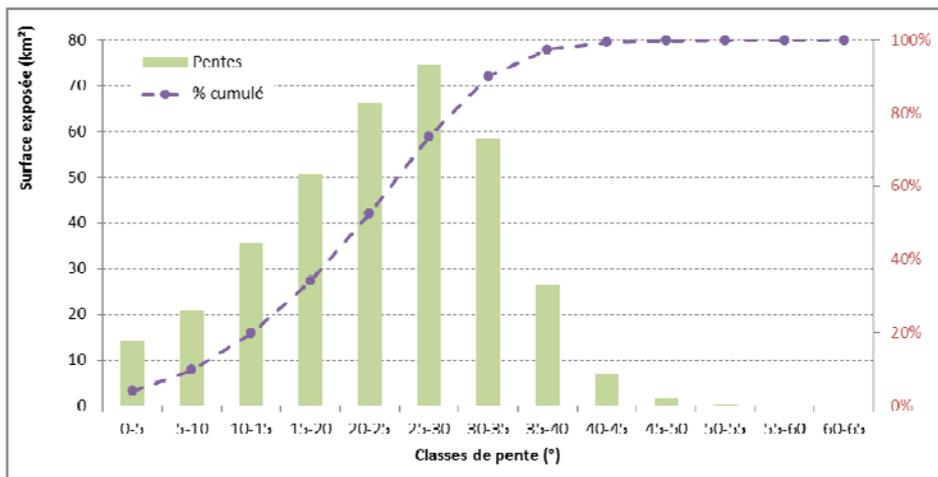


Figure 11 – Distribution des pentes du terrain naturel sur la zone d'étude (d'après MNT)

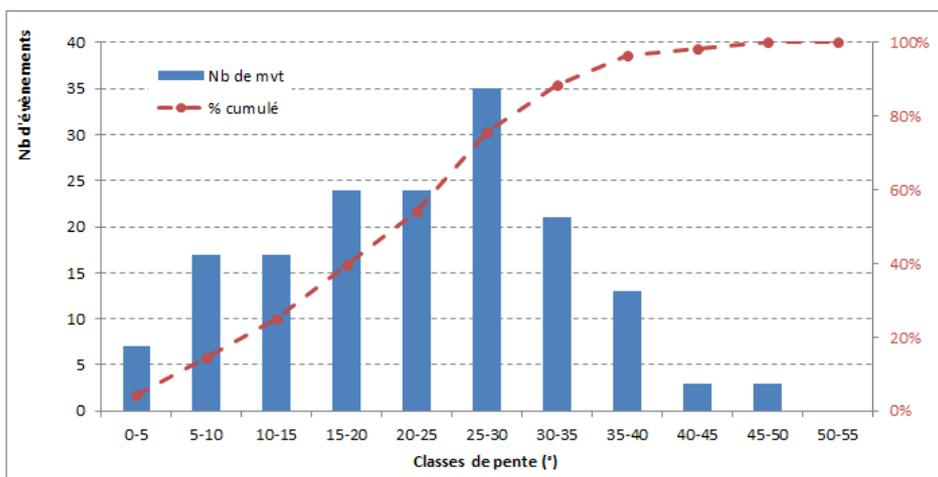


Figure 12 – Distribution des mouvements de terrain en fonction des pentes (MNT)

4.3. Analyse couplée litho-morphologique

L'analyse brute de distribution lithologie / pente ne montre pas de discrimination selon la morphologie quant à la densité de mouvements au km² (probabilité d'occurrence) :

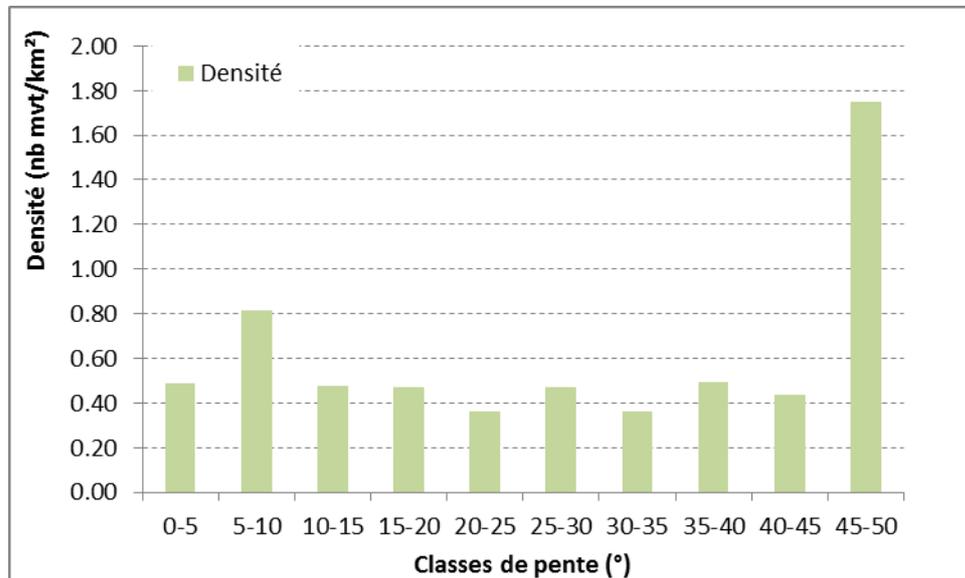


Figure 13 – Distribution des densités de mouvements de terrain par classe de pentes (d'après MNT)

Ce constat a incité à découpler l'analyse en fonction des lithologies représentatives (Figure 10). L'approche finalement retenue est la distribution des mouvements sur une base pseudo statistique, basée sur la définition de seuils types décrivant la distribution des mouvements de terrain par faciès. En effet, une approche purement statistique imposerait un échantillonnage plus complet des mouvements de terrain sur le secteur et ce, sur l'ensemble du territoire. Finalement, 3 à 4 seuils de pente sont retenus pour chaque formation pour caractériser l'aléa de rupture :

- seuil de pente inférieur : correspondant à l'absence probable de mouvement de terrain ;
- seuil de pente supérieur : correspondant à une probabilité de rupture avérée (maximale pour les éboulements et chutes de blocs), mais non nécessairement la plus élevée (pour les glissements), basée sur la résolution du MNT ;
- seuils de pentes intermédiaires (1 ou 2) caractérisant la distribution des mouvements selon la pente et selon chaque lithologie dans lesquels on peut être amené à mettre en évidence les potentialités de ruptures les plus importantes (cas des glissements notamment).

Cette analyse peut se schématiser sommairement sur le graphique de la Figure 14.

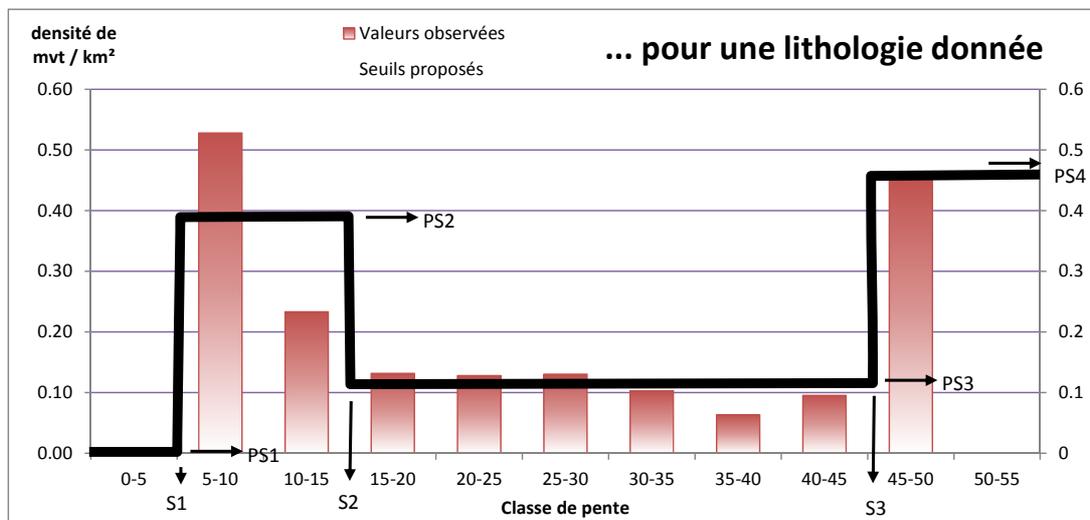


Figure 14 – Exemple de définition de valeurs seuils de classe de pente MNT au regard des densités de mouvements observées

La synthèse appliquée aux formations identifiées sur la zone pilote est illustrée sur la Figure 15.

CODE Formation	LITHO	CB	GL	NBMVT	SURF	DENSITE	SEUILS PENTE				DENSITE OBSERVEE			
							S1	S2	S3	S4	PS1	PS2	PS3	PS4
22	Argile	x	x	0	0.0	0.0	5	15	38	90	0	1.34	0.44	1.1
15	Brèche	x		0	0.4	0.0	3	10	38	90	0	0.41	0.15	0.25
14	Marbre	x		0	0.6	0.0	10	38	90	90	0	0.14	1.1	1.1
20	Pérites	x		0	0.1	0.0	0	15	38	90	0	0.33	0.12	0.4
13	Péridotite	x		0	0.6	0.0	3	10	38	90	0	0.41	0.15	0.25
19	Quartz	x		0	0.0	0.0	3	10	38	90	0	0.41	0.15	0.25
18	Quartzite	x		0	9.2	0.0	3	10	38	90	0	0.41	0.15	0.25
8	Gabbros	x		0	8.8	0.0	3	10	38	90	0	0.41	0.15	0.25
5	Eboulis	x	x	2	78.0	2.6	3	10	20	38	0	0.26	0.09	0.27
1	Granite	x		6	102.6	5.8	3	10	38	90	0	0.41	0.15	0.25
4	Schistes quartzeux	x		11	172.7	6.4	3	10	38	90	0	0.41	0.15	0.25
16	Calcschistes	x		16	153.7	10.4	0	15	38	90	0	0.33	0.12	0.4
10	Schistes argileux	x	x	37	270.0	13.7	0	15	38	90	0	0.33	0.12	0.4
12	Conglomérats	x		1	6.4	15.6	3	10	38	90	0	0.41	0.15	0.25
7	Dépôts glaciaires	x	x	13	73.0	17.8	10	20	38	90	0	0.07	0.33	0.57
3	Calcaires	x		16	83.1	19.2	10	38	90	90	0	0.14	1.1	1.1
2	Colluvions		x	15	75.9	19.8	3	10	20	38	0	0.26	0.09	0.27
6	Alluvions		x	13	50.8	25.6	3	10	30	38	0	0.11	0.34	1.2
9	Gneiss	x		1	2.4	41.9	3	10	38	90	0	0.41	0.15	0.25
21	Altérites	x	x	24	55.2	43.5	5	15	38	90	0	1.34	0.44	1.1
17	Micaschistes	x	x	9	16.5	54.6	0	15	38	90	0	0.33	0.12	0.4

Figure 15 – Distribution des densités de mouvements de terrain par pentes MNT

La valeur seuil de pente « haut » (S3 ou S4 voire S2 très ponctuellement) considérée comme seuil pour la classe d'aléa la plus élevée est définie dans le projet européen Proviapl (Cemagref and Arpa, 2008) et dépend de la résolution du 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 photointerprétation 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 falaise et barre rocheuse. 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 16) :

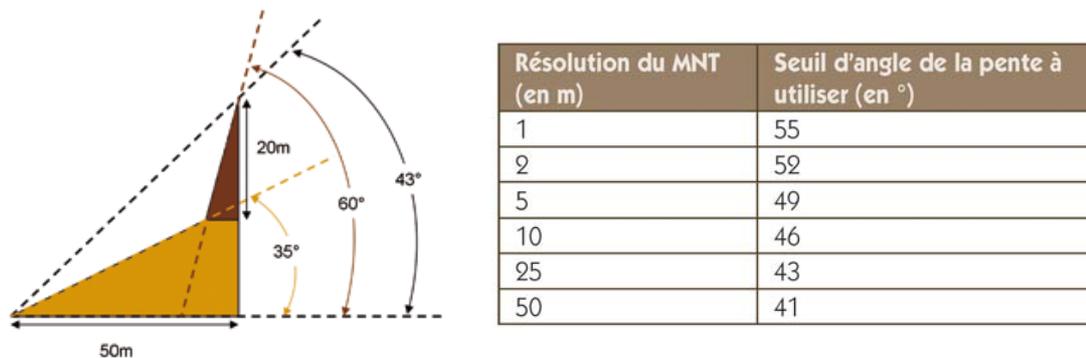


Figure 16 – Valeur d'angle de pente sur MNT et dans la réalité (Cemagref 2008)

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. De cette analyse, le seuil de pente MNT est évalué à partir du tableau de la Figure 16 ou le cas échéant déduit de la formule suivante :

$$\alpha = 55^\circ \times \text{RES}^{-0.075}$$

avec α : pente critique pour la présence de zone de départ de chutes de bloc rocheux (présence potentielle d'escarpement)

RES : résolution du MNT

Le calcul montre un résultat de 41°. La comparaison de cette valeur à la distribution des mouvements répertoriés et à la typologie globalisante utilisée conduit à abaisser ce seuil à 38°.

5. Aléa mouvement de terrain (hors prise en compte du séisme)

L'aléa mouvement de terrain induit 2 composantes : la rupture et la propagation en versant. La combinaison de ces 2 notions conduit à l'évaluation de l'aléa.

5.1. Analyse de la rupture

La rupture est appréhendée sur la base du retour d'expérience telle que figurée ci-avant (Figure 15). Une analyse SIG permet la cartographie de la susceptibilité de rupture (aux mouvements de terrain au sens large) pour les formations identifiées sur la zone d'étude.

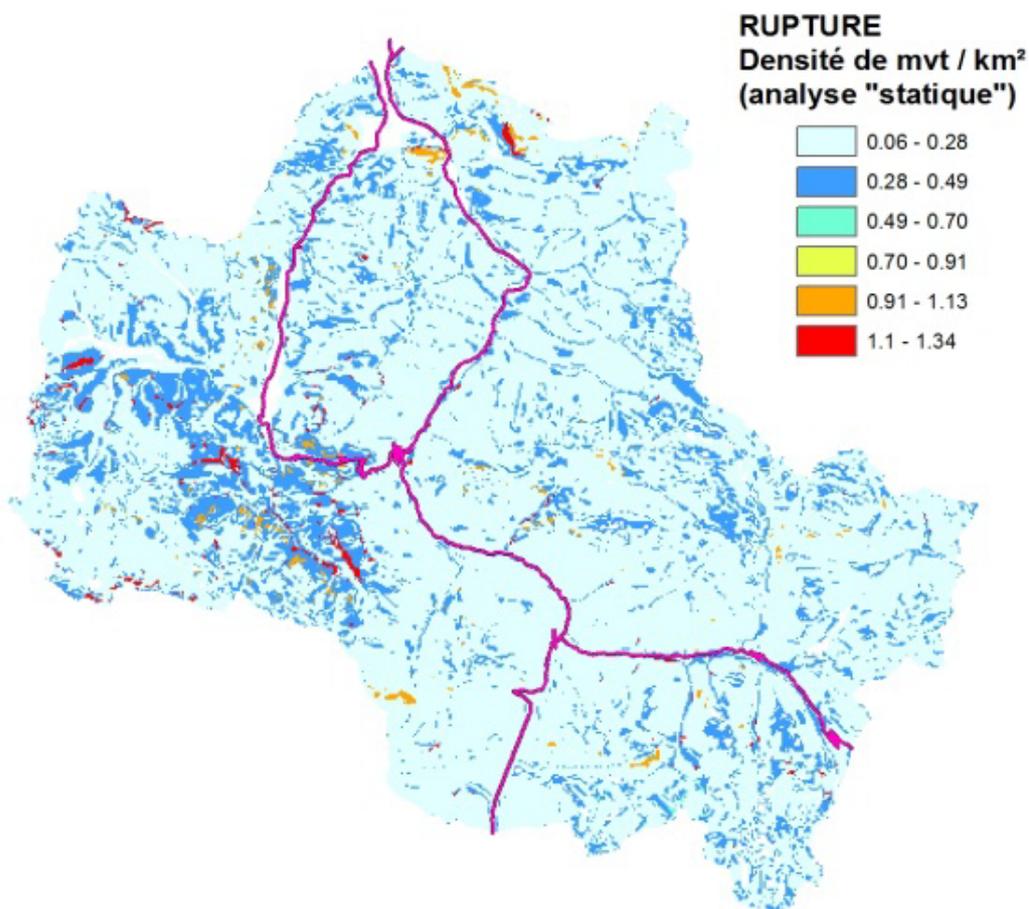


Figure 17 – Potentialité de rupture aux mouvements de terrain

La comparaison de cette cartographie de la rupture avec la carte de la Figure 8 met en évidence une vraie cohérence au niveau de versant naturel. Dans les zones de talus routier en revanche (majeure partie des observations), la densité attendue est relativement faible ce qui traduit la hiérarchisation des aléas entre zone de talus routier et de versant.

A ce titre, et implicitement, cette approche intègre une notion d'intensité des phénomènes (une pente faible induisant une hauteur de talus routier faible et par conséquent une intensité a priori limitée de phénomène associé). Dans l'absolu, une analyse découplée des phénomènes de versant et de talus routier (intégrant le cas échéant les parades existantes) serait à développer.

5.2. Analyse de la propagation

Pour un même évènement, les notions de rupture et de propagation sont dépendantes puisqu'au final, la propagation en un point donné dépend en premier lieu de la probabilité de rupture.

En terme de cartographie, cette notion bien qu'intégrée se complète de la possibilité en un point donné d'identifier un aléa de rupture et d'un aléa de propagation indépendant (d'une autre source). Pratiquement la démarche consiste à évaluer une cartographie de l'aléa de rupture (Figure 17), d'une cartographie d'aléa de propagation dépendante, puis de combiner ces deux analyses.

L'aléa de propagation est évalué par approche numérique à partir du logiciel BORA. Il s'agit d'un logiciel développé par le BRGM (Sedan et al. 2006). Utilitaire d'aide à la cartographie des aléas mouvements de terrain, il permet de représenter, en aval des zones de départ, les zones de propagation et d'arrivée les plus probables des masses instables. BORA s'appuie sur quelques règles simples :

- une masse quelconque se déplace a priori sur la ligne de plus forte pente ;
- le gain ou la perte d'énergie de la masse en mouvement est principalement fonction de la valeur de la pente ;
- l'énergie de la masse est plafonnée ;
- il peut exister une certaine probabilité que la masse s'écarte de la ligne de plus grande pente ;
- cet écart peut, éventuellement, consommer de l'énergie.

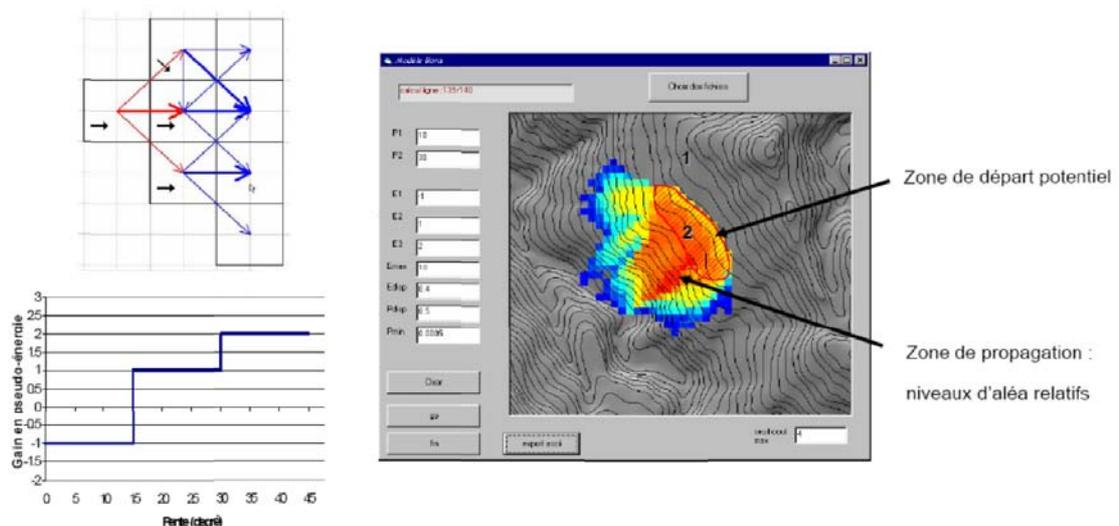


Figure 18 – Principe de fonctionnement du logiciel BORA (BRGM, 2006)

Les paramètres de calcul de l'aléa :

- La propagation d'un phénomène est déterminée par le calcul d'une « pseudo-énergie », notée E. Par simplification, on considère que E représente « l'intensité » d'un phénomène ;
- La variation de E dépend : de la valeur de la pente et des valeurs de six paramètres P1, P2, E1, E2, E3 et E_{disp} ;
- Les paramètres P1 et P2 sont des seuils de pente (en degré) auxquels correspond un gain ou une perte en « pseudo-énergie » fixés par les valeurs de E1, E2 et E3 ;
- E_{disp} est une probabilité de dispersion latérale de l'énergie ;
- Tant que la valeur de E est positive, le phénomène continue à se propager. Néanmoins, la pseudo-énergie E est bornée par une valeur E_{max} pour éviter que le phénomène possède une trop grande énergie et que la distance de propagation soit de ce fait trop longue.

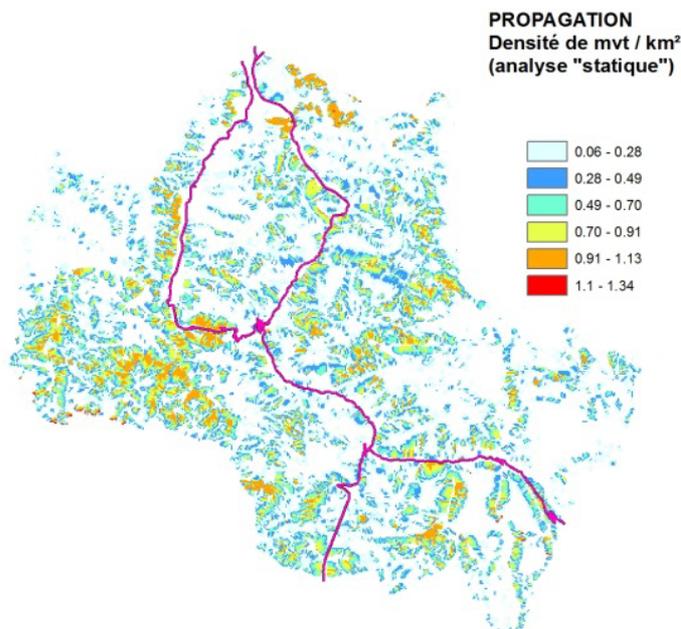


Figure 19 – Potentialité de propagation des mouvements de terrain

Cette combinaison de probabilité indépendantes (au final) en un point donné s'exprime en tout point du territoire comme :

$$P_{mvt} = P_{rupt} + P_{propa} - P_{rupt} \times P_{propa}$$

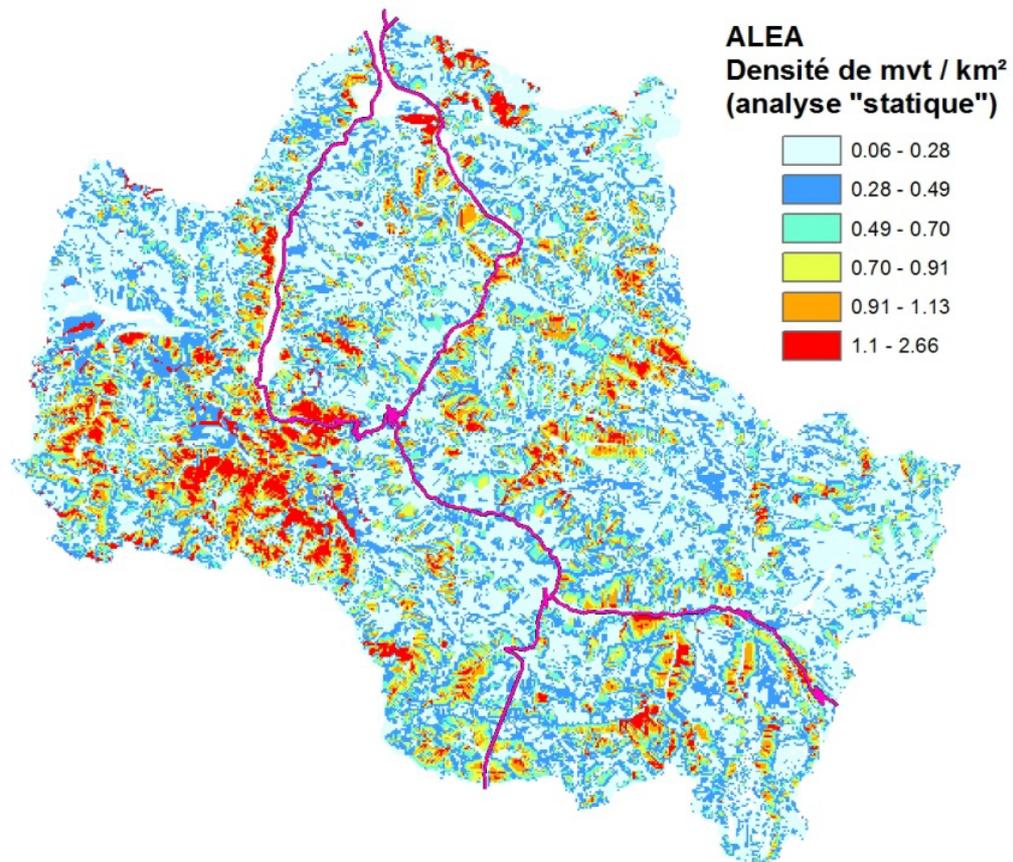


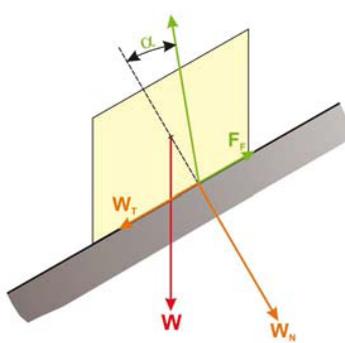
Figure 20 – Carte de l'aléa mouvement de terrain sur la zone d'étude

6. Aléa mouvement de terrain (prise en compte du séisme)

Le séisme, dans la qualification de l'aléa mouvement de terrain, est considéré comme un facteur de déclenchement, au même titre que la variation d'eau dans le sol par exemple (liée aux précipitations). A ce titre, l'approche retenue porte sur l'évaluation de l'impact d'un séisme sur l'aléa de rupture. Cette approche est (un peu) réductrice puisque par exemple, le mouvement du sol peut également avoir un impact sur la propagation d'éboulements rocheux par exemple. Mais à l'échelle de travail et compte tenu des méthodes déployées, cette simplification est très largement acceptable a priori.

6.1. Analyse de la rupture

L'analyse de la rupture sous sollicitation sismique découle des modèles de stabilité mécanique. Une approche mécanique simple pour l'évaluation de la stabilité au glissement est décrite ci-après :



Principe de base (schématique)

Un objet posé sur un plan est soumis :

- à une force motrice W_T (composante parallèle au plan de son poids W) ;
- à une force résistance F_f (composante parallèle au plan du frottement entre l'objet et le plan).

F_f est proportionnelle au produit :

- de la composante perpendiculaire au plan W_N du poids de l'objet ;
- et de la tangente de l'angle de frottement α entre l'objet et le plan.

Lorsque $W_T > F_f$ l'objet glisse sur le plan

Lorsque $W_T < F_f$ l'objet est fixe

Lorsque $W_T = F_f$ l'objet est en équilibre limite

Dans la nature les glissements de terrain peuvent se produire sur des surfaces de rupture : planes, circulaires, complexes.

Figure 21 – Principe de base de la sécurité au glissement (« statique »)

Newmark a montré (1965) que l'accélération critique nécessaire au déplacement le long d'une surface de glissement est une simple fonction du coefficient de sécurité « statique » et de la géométrie du glissement :

$$a_c = (FS-1) g \sin \alpha$$

avec : a_c : accélération critique (g)

FS : coefficient de sécurité

α : angle de glissement assimilable à la pente

Cette approche permet une cartographie de l'accélération critique en tout point de la zone d'étude connaissant l'état vis-à-vis de la stabilité des terrains (FS). L'approche valorisée relève de la démarche inverse en considérant en tout point la rupture sous sollicitation dynamique (FD = 1), ce qui impose au départ en tout point :

$$FS = a_c / g \sin \alpha + 1$$

et $FD / FS = \sin \alpha / (a_c + g \cdot \sin \alpha)$ à la rupture

On ne dispose pas de cartographie de Fs à l'échelle du territoire, cependant, en tout point on dispose d'une densité probable de mouvement de terrain (Figure 17). Qualitativement, la densité de mouvement de terrain représente la « probabilité de rupture » en tout point et par conséquent une probabilité que $FS < 1$.

Mécaniquement parlant, le ratio FD / FS caractérise la stabilité relative sous sollicitation sismique d'une zone géographique. L'hypothèse simplificatrice retenue est de considérer que ce ratio traduit également le ratio des probabilités de rupture :

$$\Delta F = FD / FS = P(FD < 1) / P(FS < 1) = dmvt_d / dmvt_s$$

Avec $dmvt_d$: densité de mouvement de terrain sous sollicitation sismique

$dmvt_s$: densité de mouvement de terrain « statique »

Sur cette base, on évalue $dmvt_d$ supposant l'accélération générée par le scénario comme critique et ce, sur la base des deux scénarios développés dans le cadre du programme (probabiliste ISARD et déterministe 1923) :

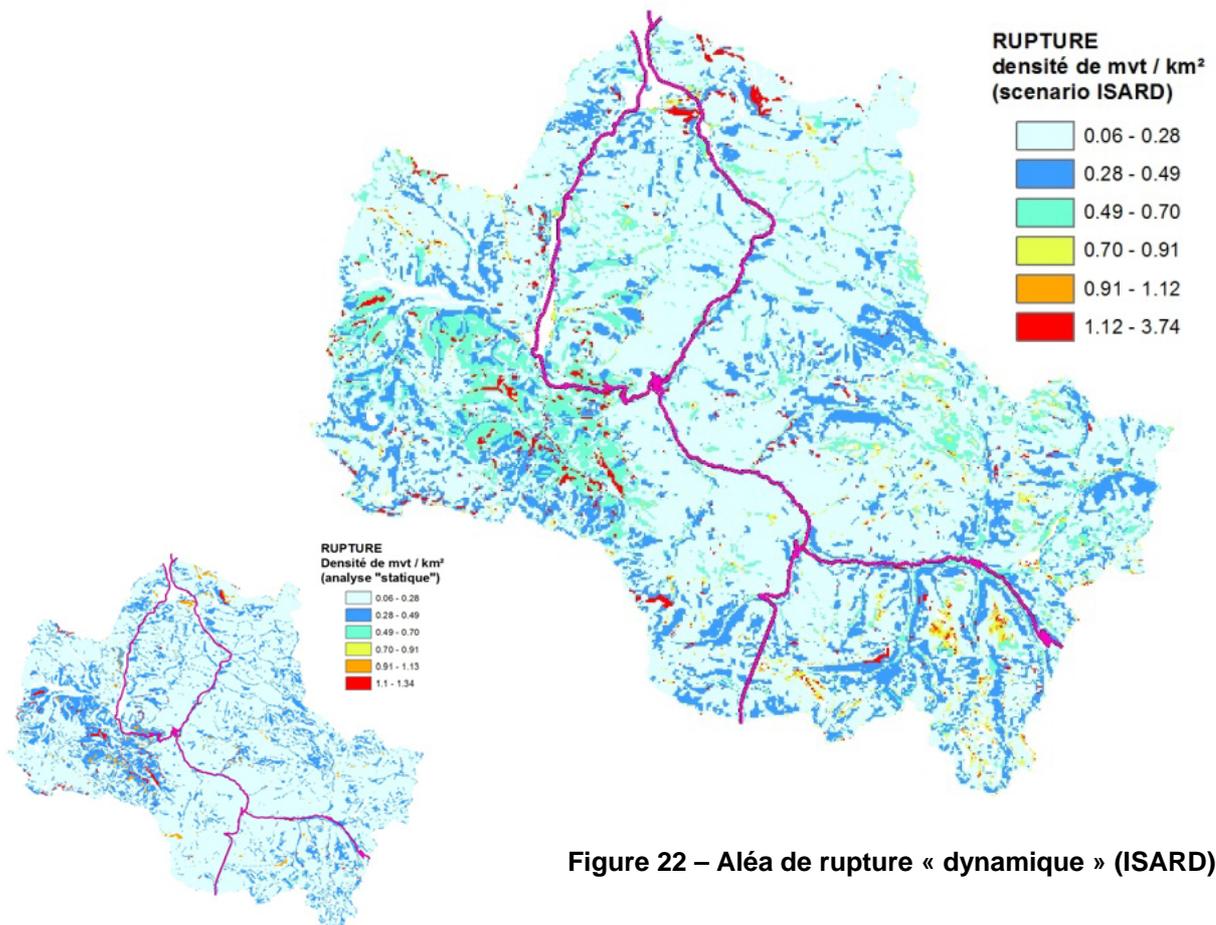


Figure 22 – Aléa de rupture « dynamique » (ISARD)

6.2. *Prise en compte de la propagation*

Le principe est ensuite d'appliquer la propagation liée à la rupture comme réalisé en statique. En effet on ne considère pas d'effet (bien que possible) de la vibration sismique du sol sur la propagation.

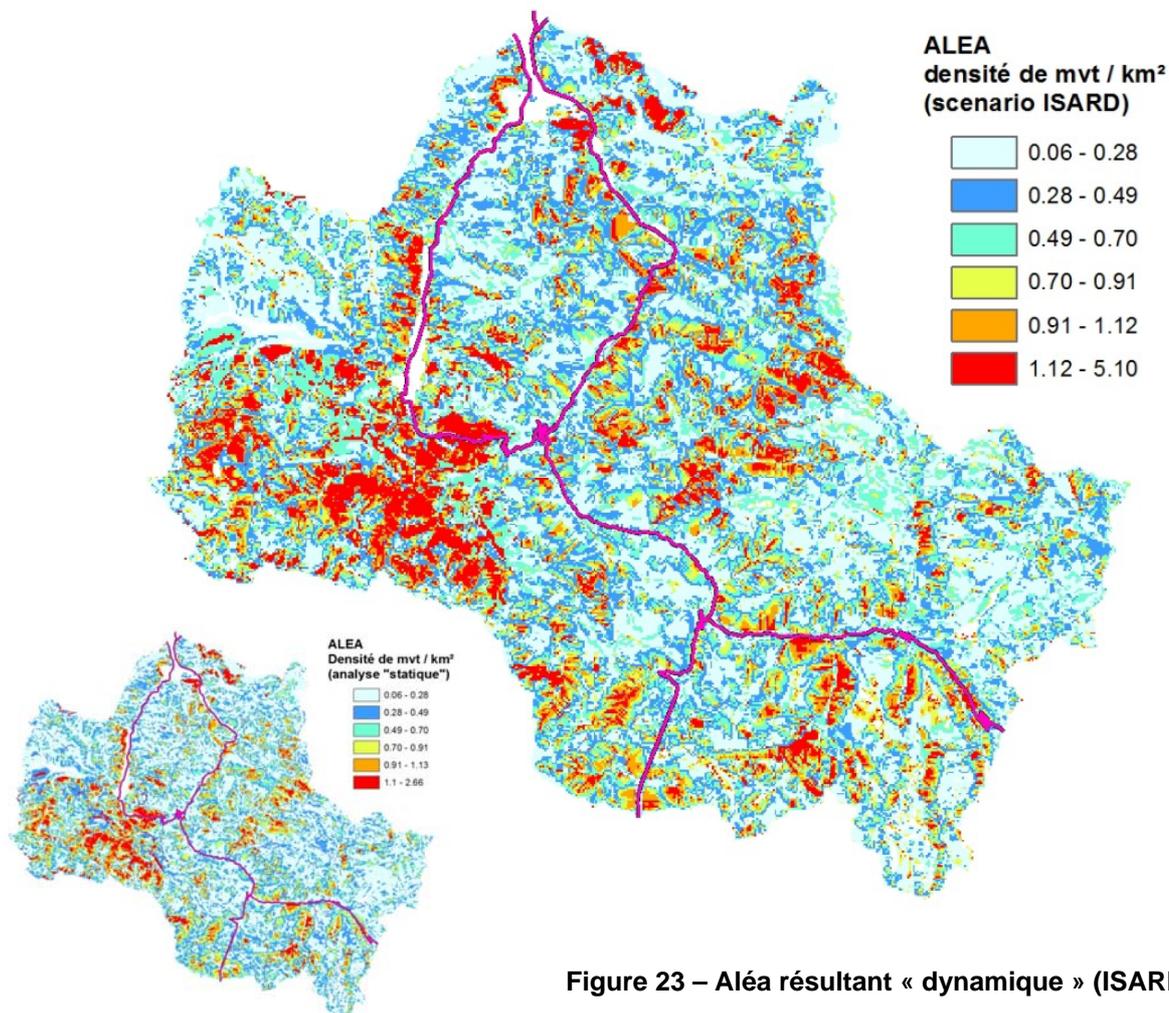


Figure 23 – Aléa résultant « dynamique » (ISARD)

A noter l'augmentation des « probabilités » de rupture systématique en prenant en compte l'accélération sismique.

6.3. Analyse comparée sur scénarios

Afin de synthétiser les résultats, les deux scénarios sont appliqués et les ratios de densités de mouvements de terrain calculés en tout point du territoire :

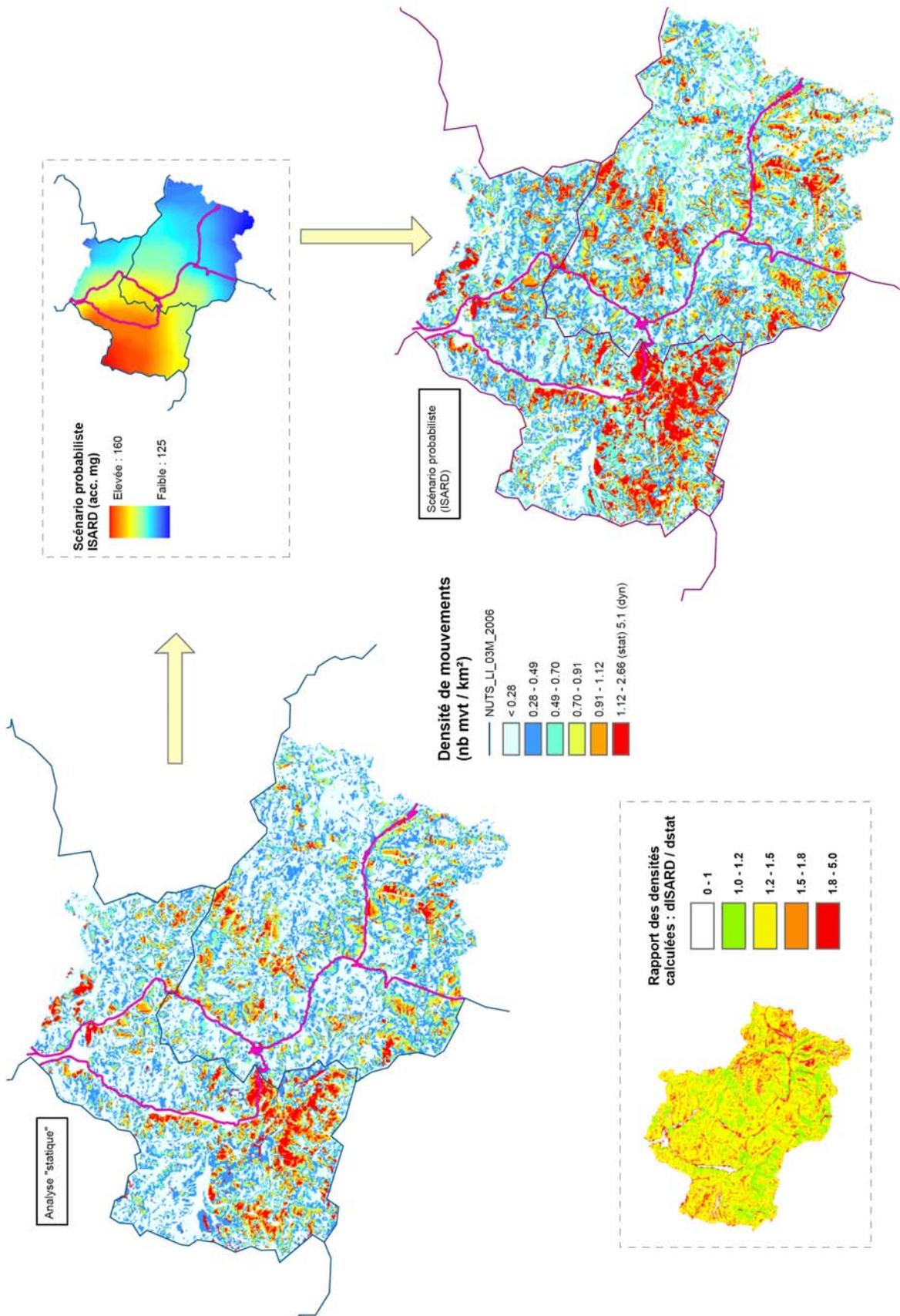


Figure 24 – Comparaison des aléas résultant (ISARD)

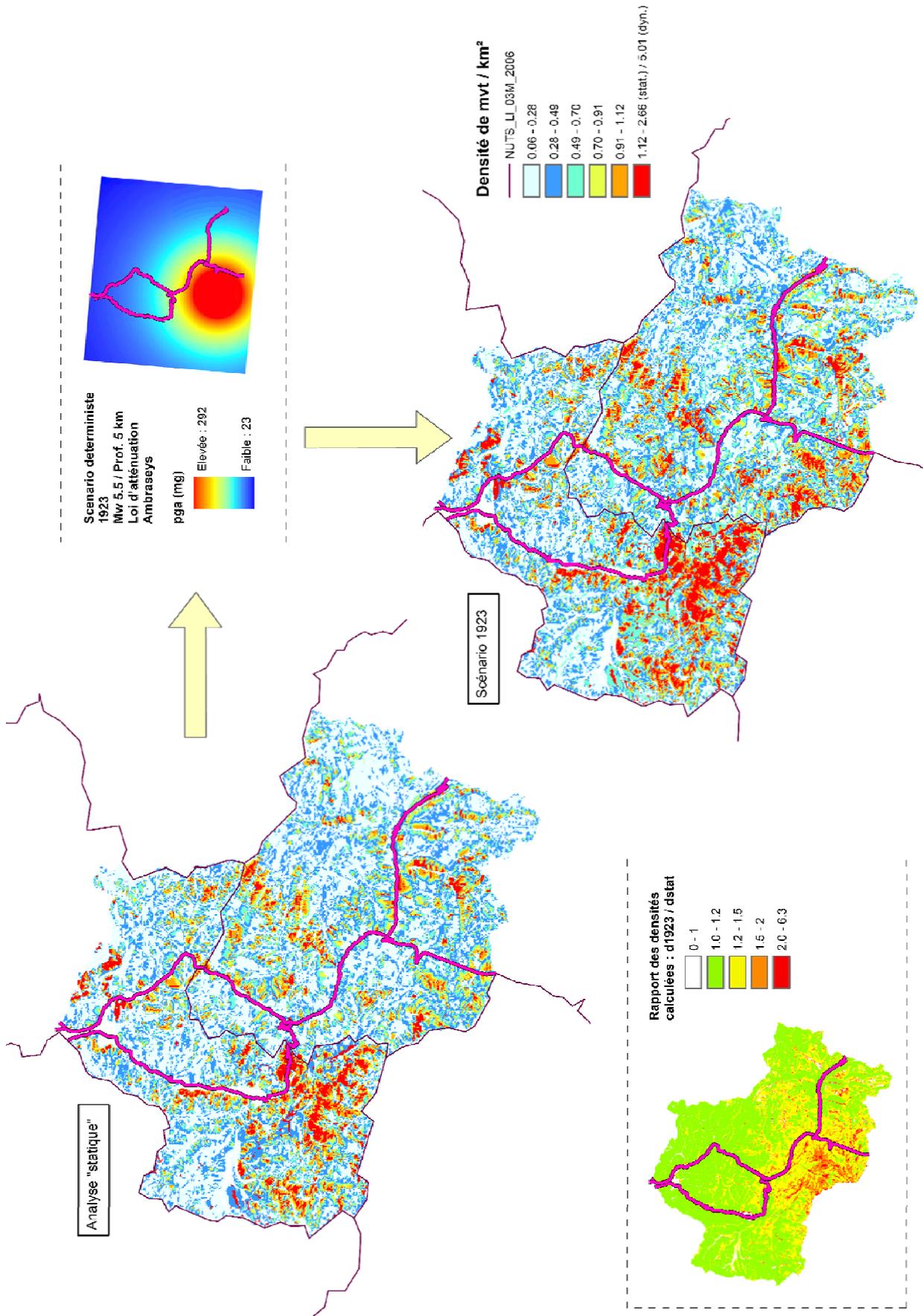


Figure 25 – Comparaison des aléas résultant (1923, M 5.5)

7. Déclinaison sur le réseau routier

La valorisation des résultats sur le réseau routier s'exprime par un traitement de type SIG en intersectant le filaire routier aux cartes d'aléa produites. Le traitement des données repose sur :

1. le lissage des modèles maillés (grille au pas de 50 m) aboutissant à la constitution de polygones classés ;
2. la restitution sur fond topographique (scan 1 : 25 000 affiché au 1 :50 000)
3. l'intersection des données avec le réseau routier objet d'analyse.

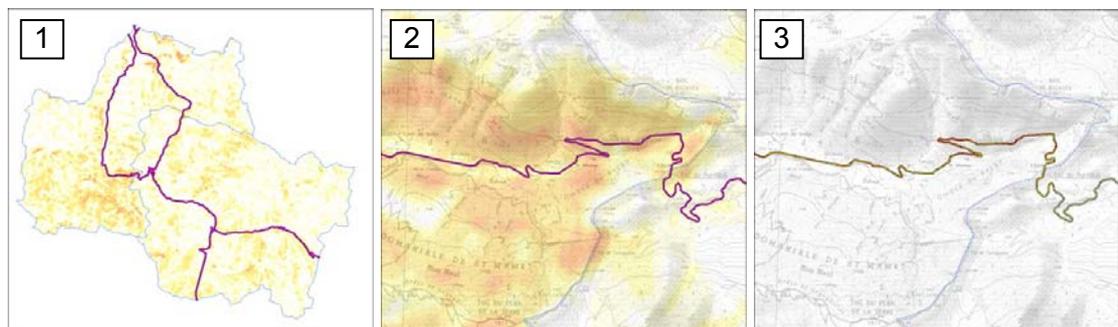


Figure 26 – Restitution des résultats sur le réseau routier

Cette méthode présente l'avantage d'isoler les tronçons routiers concernés par les phénomènes étudiés et de « nettoyer » les artefacts de traitement SIG inévitablement associés à la gestion de grilles utilisées pour les calculs d'aléa.

Un exemple de restitution est formalisé sur la Figure 27. Les zones « critiques » quant à l'apparition d'éboulements / glissements pouvant impacter le réseau routier sont hiérarchisées le long des itinéraires.

L'analyse basée sur le zonage probabiliste présente l'avantage de hiérarchiser de façon homogène les zones potentielles d'éboulement en cas de séisme et ainsi d'apporter des éléments d'aide à la décision pour la planification d'actions préventives sur le réseau. On note par exemple l'existence de deux zones critiques à proximité de la frontière qui pourraient engendrer des dysfonctionnement du réseau sur les 2 axes d'échanges stratégiques que constituent la RD618 et la N125-C230.

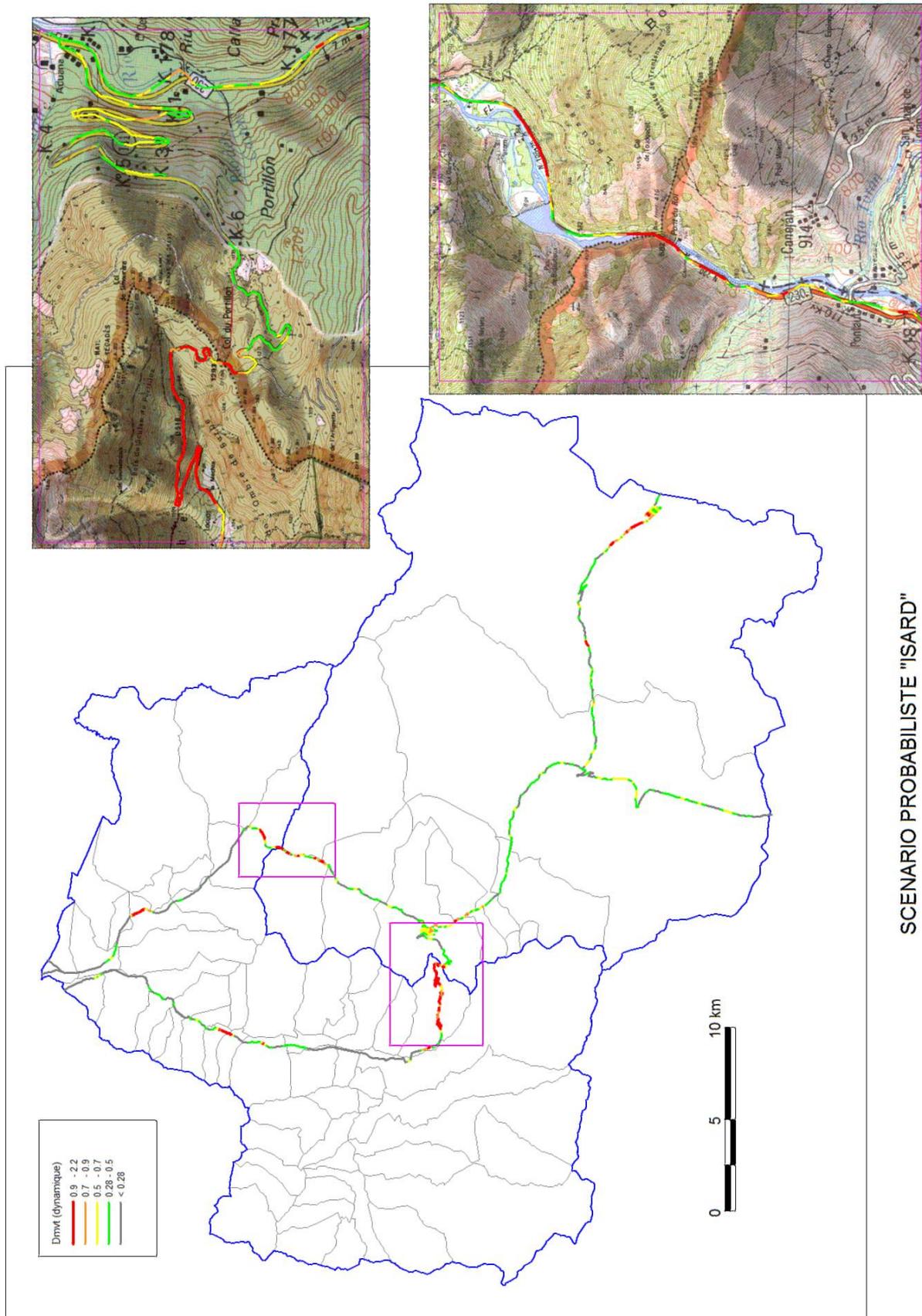


Figure 27 – Exemple de restitution finale (scénario probabiliste ISARD)

8. Conclusion

Les travaux réalisés ont permis de mettre en évidence les zones sensibles aux mouvements de terrain le long du réseau routier de la zone pilote du Val d'Aran Luchonnais en cas de séisme. L'analyse repose sur :

- le recensement des mouvements de terrain sur la zone pilote
- la représentation de la sensibilité géomorphologique aux mouvements de terrain
- une évaluation de l'aléa mouvement de terrain hors prise en compte du séisme
- l'estimation de l'impact du séisme sur la rupture
- l'analyse comparée de scénarios sismiques.

Au final, l'analyse permet de hiérarchiser un peu moins de 10 km de réseau jugé sensible sur les 120 que compte les itinéraires de la zone pilote.

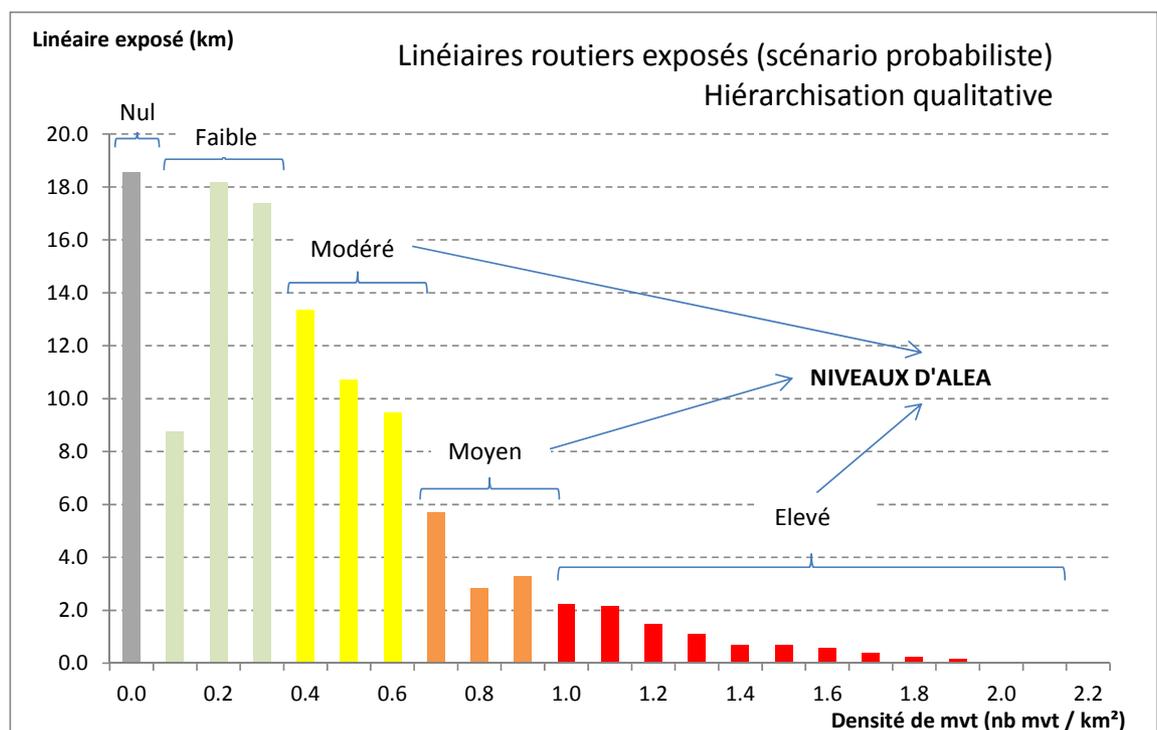


Figure 28 – Synthèse des linéaires exposés

Cette analyse repose sur une cartographie de l'aléa basée majoritairement sur la rétro-analyse des contextes géomorphologiques des événements passés ce qui n'est pas complètement satisfaisant, bien que cohérent du point de vue qualitatif. En effet, une évaluation probabiliste de l'aléa suppose au départ une représentation homogène de la couverture géologique analysée par rapport à l'inventaire des mouvements de terrain. A ce titre, une analyse plus fine de l'aléa « statique » serait nécessaire pour valoriser la méthode.

Enfin, la hiérarchisation aboutie du risque sismique sur la zone d'étude impliquerait des développements en complément :

- d'une part, pour les effets induits par les séismes, une cartographie fine de l'aléa mouvement de terrain intégrant l'intensité des phénomènes (intensité, vitesse) ainsi qu'une évaluation des effets directs à partir d'un diagnostic de vulnérabilité physique des nœuds du réseau au risque sismique (ponts et ouvrages d'art) ;
- d'autre part, afin d'avoir une vision objective du risque lié aux séismes sur l'accessibilité aux sites impactés, une évaluation de la vulnérabilité fonctionnelle des réseaux (en englobant les flux de trafic, l'importance stratégique des réseaux et les possibilités de contournement en particulier).

9. Références

Baudin T., Barnolas A., Gil I., Martinalfageme S. (2008) - Carte géologique des Pyrénées à 1/400 000 (Socle) BRGM - ITGE, Orléans : Editions

Document coédité par le BRGM, la Région et la DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur. Le risque mouvements de terrain en Provence - Alpes - Côte d'Azur (2011). Comité de rédaction : Christian MATHON (BRGM), Florence RIVET (BRGM), Nicolas DRAPERI (BRGM), David DESSANDIER (BRGM), Hervé CHAMPION (Région Provence-Alpes-Côte d'Azur), Nancy SPINOUSA (Région Provence-Alpes-Côte d'Azur), Michel BACOU (DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur), Elisabeth DAUTREY (DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur), Philippe QUEMART (DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur), Philippe BOUVET (RTM).

Newmark, N.M., 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique* 15, 139–160.

Randall W. Jibson *, Edwin L. Harp, John A. Michael (1999). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology* 58 (2000) 271–289

Sedan O., Mirgon C., Bès de Berc (2006) – Cartographie de l'aléa mouvement de terrain – Prise en compte de la propagation – Programme BORA – Rapport final BRGM/RP-54650-FR. 146 p. 165 ill. 6 annexes (volumes séparés)

ANNEXE

Annexe 1

Carte géologique harmonisée à l'échelle 1 :50 000 de la zone pilote Val Aran-Luchonnais

Annexe 2

Descriptif des formations géologique des la zone pilote

Lithologie principale	Notation	Description (Fr)	Sensibilité aux...		
			glissement	chutes de blocs	
Alluvions	Fy	Terrasse post-glaciaire; Basse terrasse tardi-glaciaire non inondable; Dépôts morainiques	1		
	Fz	Plaine alluviale moderne ou fluvio-lacustre; basses terrasses; dépôts alluviaux indifférenciés; colluvions et dépôts de pente indifférenciés	1		
Altérites	i	Couverture d'altération sur terrains paléozoïques (en général schisteux)	1	1	
	jd	Manteau d'altération de moyenne montagne sur Dévonien	1	1	
	jh	Manteau d'altération de moyenne montagne sur Carbonifère	1	1	
	jo	Manteau d'altération de moyenne montagne sur Ordovicien	1	1	
	jo-d	Manteau d'altération de moyenne montagne sur Ordovicien-Dévonien	1	1	
	js	Manteau d'altération de moyenne montagne sur Silurien	1	1	
Argile	t5-7	Argilites versicolores, gypses, calcaires chamois, cargneules	1	1	
Brèche	mBr1	Brèche mylonitisée à éléments paléozoïques		1	
Calcaires	d1-5	Calcaires noduleux rouges, formation Manyanet		1	
	d1-5C	Calcaires, calcschistes; Pérites noires à rares intercalations de calcschistes		1	
	d2-3	Calcaires bleus à entroques		1	
	d4-7	Calcaires; Calcaire de Sant Esteve avec des calcaires coraliens; Calcaire de Montcorbisum; Calcaire d'Auran		1	
	d5-7	Calcaires massifs		1	
	d6-7P(1)	Série des Agudes; Calcaire gris à patine rousse		1	
	d6-h1	Calcaires zoogènes, calcaires "griottes"; Calcaires marmoréens du plan des Etangs (Haut Rio Esera) à Clymenia laevigata		1	
	d7-h3	Calcaires à ammonites		1	
	h2a	Calcaires à zones siliceuses; Lydiennes		1	
	h3C	Calcaires		1	
	j1-5c	Calcaires à oncolithes de l'Aalénien		1	
	j1-5D	Dolomies et calcaires marmoréens; Dolomies noires cristallines à intercalations calcaires. Calcaires clairs à grandes Trocholines de l'Oxfordien sup. Calcaires à oncolites de l'Aalénien		1	
	j1-5D(1)	Dolomies noires fétides		1	
	j1-7	Calcaires et dolomies		1	
	j6	Calcaires noirs à Lituolidés, dolomies noires, brèches à éléments calcaires et dolomitiques		1	
	j7	Dolomies et dolomies bréchiques		1	
	JD(1)	Calcaires oolithiques et graveleux à grandes Trocholines; Dolomies noires cristallines à intercalations calcaires. Calcaires à oncolites; Marnes et lumachelles gryphées; calcaires marneux puis calcaires à Pecten		1	
	j-n	Calcaires marmoréens; Calcaire urgonien, dolomie noire à intercalations calcaires		1	
	k-O(4)	Calcaires massifs blanc à gris; Calcaires de Bentaillou		1	
	l1-2	Calcaires à microrhythmes et calcaires oolithiques ; calcaires et brèches dolomitiques		1	
	l1-2D(1)	Dolomies, calcaires à microrhythmes, calcaires graveleux brèches; Calcaires marmoréens		1	
	n1	"Brèche limite", calcaires à Trocholines et Dasycladacées		1	
	n1-4	Calcaires urgoniens puis calcaires à Annélides du Barrémien, Marnes de Franczal du Valanginien inf. calcaires à Trocholines et Dasycladacées du Beriasien sup., "brèche limite"		1	
	n4-6	Calcaires marmoréens indifférenciés		1	
	n5-6U	Calcaires urgoniens, à Toucasia et Floridées encroûtantes		1	
	n5cU	Calcaires urgoniens (calcaires récifaux à floridées encroûtantes)		1	
	O5	Calcaires à Echinospoerites cf. balticus		1	
	t3-6	Dolomies sombres, calcaires		1	
	Calcschistes	c2-3F	Flysch à Fucoides d'Uchentein (écailles bordières de la Haute chaîne primaire); Calcschiste d'Uchentein		1
		d1-3(2)	Ardoises sombres et calcaires. Formation Fontjanina; Pérites noires, à la partie inférieure schistes et grès noirs avec tufs basiques à intercalations de calcaires rubanés et massifs, sombres; Calcaires gris intercalés avec des lutites riches en chert		1
		d1-5S	Schistes; Calcschistes, calcaires, calcaires dolomitiques; Pérites noires à rares intercalations de calcaires		1
		d7	Ardoises sombres avec des niveaux de calcaires et de grès carbonatés		1
		dm(1)	Calcschistes, calcaires noduleux et calcaires "griottes"		1
		l3-4	Marnes noires à Hildoceras et Lumachelles du Toarcien à Gryphaea sublobata, marnes à Amaltheus du Domérien, calcaires roux du Carixien		1
		n5-6a	Marnes à Deshayesites		1
		n5-6c	Calcschistes du Gargasien et marnes noires à Hypacanthoplites		1
n5cU(2)		Marnes à Deshayesites : calcschistes intermédiaires		1	
n6d-c1F		Flysch noir, ardoisier, de la Ballongue (ZNP interne)		1	
s4-d3		Couches carbonatées à la base et alternance de calcaires gris, calcschistes et ardoises noires au dessus		1	
Colluvions		iR	Altérites remaniées	1	
		C	Colluvions	1	
		Cs	Coulées de solifluxion; Colluvions solifluées; Blocs de lithologies variées	1	

Lithologie principale	Notation	Description (Fr)	Sensibilité aux...	
			glissement	chutes de blocs
Colluvions	ES	Formation complexe de versant comprenant des matériaux éboulés et des matériaux soliflués; Cône de déjection	1	
	Gm	Restes de dépôts morainiques, dépôts glacio-lacutres	1	
	Lg	Loupe de glissement avec cicatrice d'arrachement	1	
Conglomérats	k-O(1)	Conglomérats à miches calcaires		1
	t1-2	Poudingue quartzeux, grès, argilites		1
Dépôts glaciaires	G	Moraines locales des avants-monts nord-pyrénéens; Moraines des 1er et 2ème stade glaciaire; Moraines externes et internes; Dépôts glaciaire et périglaciaire; Arcs et cordons morainiques; Placage indifférenciés	1	1
	GBp	Grèzes litées contemporaines du 1er stade glaciaire; Brèche de pente peu cimenté sur versant réglé	1	1
Eboulis	E	Eboulis indifférenciés; Eboulis actuels ou très récents; Eboulis en cônes ou en talus; blocs et graviers anguleux	1	1
	EF	Eboulis; cône de déjection; Eboulis fixés; Sédiments rocaillieux de glacier	1	1
Gabbros	dī	Dolérites (ophites)		1
	īāg	Gabbro quartzitique; Gabbro quartzitique à amphibole et quartzodiorite		1
	īī	Ophites (diabases, dolérites, microgabbros)		1
	l3-4Ko	"Cornéennes" indifférenciés		1
Gneiss	æ-ā	Massifs de Milhas. Gneiss "écrasés" des écailles nord-pyrénéennes de Cazaunous, du Job, de la fontaine de Plaède, et du col de Mente (Lachein)		1
	M	Migmatites "fondamentales"		1
Granite	mM	Migmatites mylonitisées		1
	ā1-2	Leucogranite en corps filonien et corps pegmatitiques associés		1
	ā1p	Leucogranite (Gourgs-Blanc, Perdiguère)		1
	ā1T	leucogranite de Tramezaygues et corps filoniens associés		1
	ā2	Granite à muscovite		1
	ā3	Granite à biotite-muscovite		1
	ā3Mbm	Granite monzonitique à biotite et muscovite		1
	ā4	Granite à biotite hétérogranulaire		1
	ā5	Granite porphyrique		1
	ā6	Granite porphyroïde à muscovite, biotite et cordiérite		1
	ā7p	Leucogranite et pegmatite du Dôme de Bossos		1
	ē1-2	Diorite quartzite (versant sud), enclave de micaschistes à biotite et sillimanite		1
	Fdq	Filon de porphyre dioritique à quartzodioritique		1
	Fgd	Filon de porphyre graniodioritique		1
	h-rKo	Porphyres, cornéennes, marbres et skarn		1
	ī	Teschénites, monchiquite du Job, camptonite du Paloumère, épiyérites des Parets et de l'Escalettel		1
	ó	Rhyolite, microgranites, Lamprophyres		1
	P	Corps filoniens pegmatitiques dans le Dévonien et le Carbonifère		1
	pā4	Granodiorite porphyroïde		1
	pā4(1)	Leucogranite (Gourgs-Blanc, Perdiguère), enclave de micaschistes (versant nord)		1
pā5	Granodiorite à biotite		1	
pā6	Granodiorite à biotite et amphibole		1	
pā7	Granodiorite à biotite et hornblende		1	
pā8	Quartzodiorite et granodiorite à biotite et amphibole		1	
Ūô	Epiyérite (Eup)		1	
Ūôá	Porphyrite spilitique		1	
Hydro	hydro	Réseau hydrologique		
Marbre	M(C)	Cipolin		1
	mī	Roches sédimentaires. Marbres mésozoïque indifférenciés		1
Micaschistes	Mñb	Migmatites de micaschistes à biotite	1	1
	Mñs	Migmatites de micaschistes à sillimanite	1	1
	ñ1a	Micaschistes à staurotides, andalousite et cordiérite	1	1
	ñ1G	Micaschistes à biotite et muscovite	1	1
	ñ1si	Micaschiste à biotite et sillimanite, faciès fortement cristallin	1	1
	ñ1siG	Micaschistes à cordiérite et sillimanite, leucogranite en corps filoniens et corps pegmatitiques associés	1	1
	ñb	Micaschistes à biotite	1	1
	ñc	Micaschistes à biotite	1	1
Pélites	r	Lutites et grès rouges, formation Peranera		1
	r2	Brèches rouges à gros éléments		1
Péridotite	ò2	Lherzolites		1
Quartz	Q	Massifs de Milhas. Quartz		1
Quartzite	o2a	Quartzites blancs		1
	O5-6(2)	Quartzites, ardoises, microconglomérats et calcaires		1
Schistes argileux	h2b	Argilites versicolores et calcaires à zone siliceuses	1	1
	h3	Shales, calcaires, brèches à éléments calcaires	1	1
	h-r	Argiles sombres, grès, conglomérats, formation Malpàs	1	1
	k-O(2)	Alternance centimétrique de grès et de schistes argileux, formation Jújols	1	1
	O6	Ardoises grises/bleues, formation Ansovell	1	1
	s	Schistes argileux noirs carburés, pyriteux à graptolites; Ampélites et shales noirs	1	1
Schistes quartzeux	d1-3(1)	Pélites noires à microrhythmes gréseux; Dôme de la Garonne; Microrhythmes gréseux, intercalations calcaires sombres		1

Lithologie principale	Notation	Description (Fr)	Sensibilité aux...	
			glissement	chutes de blocs
Schistes quartzeux	d4-5	Alternance de grès et lutites avec des calcaires sombres au sommet, passant latéralement aux roches de l'unité Dpf. Grès d'Auba		1
	d4-h3	Schistes de Cathervielle; Schistes argileux ardoisiers, grès grossier; Psammites		1
	d6-7	Alternance de lutites verdâtres à grisâtres et de grès à grains fins, et couches de calcaires. Alternance de Riu Nere; Quartzites et lutites noires		1
	d6-7G	Série des Agudes; Grès verts		1
	d6-7P	Série des Agudes; Pérites gréseuses claires		1
	h	Grès, lutites et quelques turbidites. Faciès de Culm, formation Bellver		1
	h1-2	Jaspes sombres, lydiennes à nodules phosphatés, schistes silteux et quartzites; schistes noirs à nodules et niveaux phosphatés; Psammites		1
	h-r(1)	Grès et Lutites; schistes sériciteux tachetés et cornéennes; Marbres, quartzites		1
	k-O(3)	Schistes et quartzites sombres, quartzites bleutés en gros bancs, à intercalation calcaires		1
	O(1)	Schistes quartzeux bleuté, niveau de schistes noirs, série détritique des Hounts Secs : conglomérats à galets de quartzite		1
	O(2)	Alternance d'ardoises et de quartzites		1
	O(L)	Massif du Lis-Caillauas; Faciès noduleux à andalousite		1
	O5-6(1)	Grès passant au sommet à des schistes gréseux bleu-noir, alternances de calcaires plus ou moins gréseux et de siltites carbonatées		1
	O5-6(3)	Grès quartzo-feldspathiques, roches volcaniques acides et intermédiaires, schistes argileux sombres et, localement, conglomérat à la base		1