



**Analyse critique de la carte de
prédisposition aux mouvements de
terrain de la DREAL Basse-Normandie.
Tranche 3 : Cartographie et
modélisation de l'aléa glissement de
terrain. Communes de Dives-sur-Mer
et Grangues (14).**

Rapport final

BRGM/RP-63975-FR
Décembre 2014



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**Analyse critique de la carte de
prédisposition aux mouvements de terrain
de la DREAL Basse-Normandie.
Tranche 3 : Cartographie et modélisation
de l'aléa glissement de terrain.
Communes de Dives-sur-Mer et
Grangues (14).**

Rapport final

BRGM/RP-63975-FR
Décembre 2014

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2014

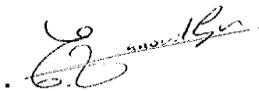
P. Pannet, R. Cochery

Vérificateur :

Nom : E. Vanoudheusden

Fonction : Responsable programme
scientifique

Date : 11/12/2014



Approbateur :

Nom : B. Vittecoq

Fonction : Directeur régional

Date : 17/12/2014

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés :

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Pannet P., Cochery R. (2014) – Analyse critique de la carte de prédisposition au risque mouvement de terrain de la DREAL Basse-Normandie. Tranche 3 : Cartographie et modélisation de l'aléa glissement de terrain. Communes de Dives-sur-Mer et Grangues (14). Rapport final. BRGM/RP-63975-FR, 54 p., 15 ill., 2 ann., 1 CD.

Synthèse

La Basse-Normandie, dans sa diversité géologique, possède plusieurs secteurs propices au développement de mouvements de terrain. Le déclenchement de ces phénomènes est la conséquence de différents facteurs : principalement d'ordre géomorphologique, géologique, hydrogéologique, climatique et également anthropique. Dans ce contexte, la DREAL de Basse-Normandie a réalisé sur l'ensemble de la région une carte de prédisposition aux risques de manifestation de mouvements de terrain (notamment chute de blocs et glissements de terrain) sur la base d'une analyse des pentes, et des données issues de la carte géologique au 1/50 000 (pour ce qui concerne les glissements de terrain).

Il est communément admis que la mise en place de ce type d'instabilité de terrain relève d'interactions complexes entre différents facteurs, que la carte de prédisposition, bien que pertinente à son échelle de validité, ne peut pas prendre en compte. La validation/adaptation de cette carte nécessitant une analyse s'appuyant notamment sur des observations de terrain détaillées, la DREAL de Basse-Normandie a sollicité le BRGM afin d'étudier des secteurs aux contextes géologiques variés pour en définir les niveaux d'aléa « mouvements de terrain » (chute de blocs et glissements), en vue d'une analyse critique de la carte de prédisposition à la manifestation de ces phénomènes.

Une première tranche de cette étude a concerné les chutes de blocs et a permis de définir une méthodologie de cartographie de l'aléa chute de blocs adaptée au contexte bas-normand (Rapport BRGM/RP-60464-FR ; Pannet *et al*, 2012). Une seconde tranche a permis de définir une méthodologie de cartographie de terrain de l'aléa glissement de terrain adaptée au contexte bas-normand (Rapport BRGM/RP-62599-FR ; Pannet *et al*, 2014) en travaillant sur quatre communes et trois contextes géologiques distincts. La troisième tranche, faisant l'objet de ce rapport permet de valider la méthode de cartographie de terrain définie lors de la seconde tranche, en travaillant sur deux communes, Dives-sur-Mer et Grangues (14), avec un contexte géologique différent de celui étudié lors de la précédente tranche. Ce rapport permet en outre, par des tests sur cette zone d'étude, de commencer une réflexion sur la possibilité d'une modélisation des glissements de terrain à grande échelle, qui permettrait, à terme, de réaliser des cartes d'aléa selon une méthode homogène et sur de grandes surfaces.

Cette étude met en évidence plusieurs points :

- Elle confirme ce que les résultats de la tranche précédente avaient commencé à indiquer, à savoir que la connaissance et la cartographie des formations de versant (essentiellement historique des glissements de terrain) est fondamentale dans l'identification de l'aléa glissement de terrain à fine échelle ;
- Que la carte de prédisposition « voit » les zones potentiellement à risque, mais ne permet pas d'être précise quant au niveau d'aléa glissement de terrain dans des zones à géologie complexe (notamment alternance de roches aux propriétés différentes) ;
- Que la modélisation donne par endroits des résultats cohérents sous réserves de respecter deux conditions : posséder un MNT à maille fine (5 m minimum) et pouvoir insérer comme donnée d'entrée une cartographie fiable des formations de versant. Toutefois, deux données permettraient d'accroître grandement la représentativité de la modélisation :
 - un couplage avec un modèle hydrogéologique simple, non testé ici ;
 - l'acquisition de données géotechniques, notamment des différentes séquences de coulées d'anciens glissements, qui permettraient au modèle de s'approcher de la réalité des stabilités de versant.

Sommaire

1. Introduction	8
2. Contexte géographique et géologique des communes étudiées.....	9
2.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE	9
2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE	10
3. Rappels théoriques	13
3.1. LA DYNAMIQUE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN	13
3.1.1. Définition.....	13
3.1.2. Les mécanismes de versant	13
3.2. FACTEURS INTERVENANTS DANS LA MISE EN PLACE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN	14
3.2.1. Facteurs de prédisposition (facteurs permanents)	14
3.2.2. Les facteurs de déclenchement	14
3.3. LES DIFFERENTS TYPES DE GLISSEMENT	15
3.3.1. Les glissements rotationnels	15
3.3.2. Les glissements translationnels (ou plans).....	17
3.3.3. Le fluage.....	18
4. Méthodologie	19
4.1. APPROCHE GEOMORPHOLOGIQUE	19
4.1.1. Dynamique gravitaire	20
4.1.2. Hydrodynamique.....	20
4.1.3. Dynamique éolienne	21
4.1.4. Cartographie géomorphologique.....	21
4.2. CARTOGRAPHIE HISTORIQUE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN.....	22
4.3. CARTE D'ALEA	24
4.3.1. Détermination du niveau d'aléa.....	26
4.3.2. Cartographie de l'aléa	27
5. Analyse critique de la carte de prédisposition	29
5.1. CRITERES PRIS EN COMPTE PAR LA CARTE DE PREDISPOSITION	29
5.2. COMPARAISON	29
5.2.1. Statistiques	29
5.2.2. Causes / Discussion	31

6. Tests de modélisation	33
6.1. MODELE EMPLOYE	33
6.2. METHODE, RESULTATS ET CONCLUSION.....	34
6.2.1. Préparation du modèle géologique	34
6.2.2. Paramètres de modélisation	35
6.2.3. Modélisation réalisées	35
6.2.4. Conclusions.....	38
7. Conclusion	39
8. Bibliographie.....	41

Liste des illustrations

Illustration 1 : Carte géologie de la Basse-Normandie, extrait de la carte géologique de la France à 1 000 000. ©BRGM. Le cercle rouge indique la localisation du secteur étudié ..	9
Illustration 2 : Localisation des deux communes concernées	10
Illustration 3 : Extrait de la carte géologique de la France au 1/50 000 ^e	11
Illustration 4 : Schéma de principe de stabilité d'un versant soumis aux glissements de terrain (Rivet et al., 2011)	13
Illustration 5 : Schéma descriptif d'un glissement rotationnel	16
Illustration 6 : Coupe schématique simplifiée d'un glissement rotationnel classique	17
Illustration 7 : Coupe schématique simplifiée d'un glissement plan	17
Illustration 8 : Exemple de cartographie historique des glissements de terrain. Commune de Grangues	23
Illustration 9 : Exemples d'indices de terrain associées à des phénomènes de glissement de terrain récent. Commune de Dives-sur-Mer.....	24
Illustration 10 : Tableau de détermination de l'aléa.....	26
Illustration 11 : Exemple de cartographie de l'aléa . Commune de Dives-sur-Mer	27
Illustration 12 : Exemple de comparaison entre la carte de prédisposition et la carte d'aléa ; exemple d'impact de la prise en compte des formations superficielles et des données de terrain	30
Illustration 13 : Coupe schématique du modèle géologique 3D utilisé pour la modélisation (les échelles verticale et horizontale ne sont pas respectées)	34
Illustration 14 : Exemple de modélisation : MNT 25 m ; non prise en compte des formations superficielles (au-dessus) ; comparaison avec la carte de prédisposition (au-dessous)	36
Illustration 15 : Exemple de modélisation : MNT 5 m ; non prise en compte des formations superficielles	37

Liste des annexes

Annexe 1 Cartographie historique des glissements de terrain sur le territoire de l'étude.....	43
Annexe 2 Cartographie de l'aléa glissement de terrain sur le territoire de l'étude.....	47

1. Introduction

La Basse-Normandie, dans sa diversité géologique, présente plusieurs secteurs propices au développement de mouvements de terrain. Le déclenchement de ces phénomènes est la conséquence de différents facteurs : principalement d'ordre géomorphologique, géologique, hydrogéologique et également anthropique.

Dans ce contexte, la DREAL de Basse-Normandie a réalisé sur l'ensemble de la région une carte de prédisposition aux risques de manifestation de mouvements de terrain (notamment chute de blocs et glissements de terrain) sur la base d'une analyse des pentes, et des données issues de la carte géologique à 1/50 000 (pour ce qui concerne les glissements de terrain).

Il est communément admis que la mise en place de ce type d'instabilité de terrain relève d'interactions complexes entre différents facteurs, que la carte de prédisposition, bien que pertinente à son échelle de validité, ne peut pas prendre en compte.

La validation/adaptation de cette carte nécessitant une analyse s'appuyant notamment sur des observations de terrain détaillées, la DREAL de Basse-Normandie a sollicité le BRGM afin d'étudier des secteurs aux contextes géologiques variés pour en définir les niveaux d'aléa « mouvements de terrain » (chute de blocs et glissements), en vue d'une analyse critique de la carte de prédisposition à la manifestation de ces phénomènes.

Ce projet s'articule en deux tranches distinctes :

- La première concerne le volet chute de blocs et a fait l'objet d'une étude des sites de Cherbourg-Octeville, Saint-Lô et Vire. L'étude a été présentée à la DREAL de Basse-Normandie en 2012 (Rapport BRGM/RP-60464-FR ; *Pannet et al.*, 2012) ;
- La seconde concerne le volet glissements de terrain. Le phénomène étant plus complexe dans sa mise en place, il a été fait le choix de travailler sur des zones peu urbanisées afin d'éviter au maximum les contraintes anthropiques. Par ailleurs, la géologie de la région, diversifiée, engendre des typologies de glissements de terrain diverses selon les endroits. Quatre contextes géologiques différents sont donc étudiés afin d'appréhender l'ensemble des possibilités d'instabilité. Pour cela, ce volet glissement de terrain a été découpé en deux tranches :
 - La première, faisant l'objet du rapport BRGM/RP-62599-FR (*Pannet et al.*, 2014), a proposé le développement d'une méthodologie de cartographie d'aléa adaptée à une échelle plus détaillée que celle de la carte géologique - 1/10 000 à 1/5 000 - et sa mise en application. Elle a concerné quatre communes situées dans deux contextes géologiques distincts. A l'issue, une méthodologie fiable de cartographie de l'aléa à fine échelle, adaptée au contexte bas-normand a été proposé, et une première analyse critique de la carte de prédisposition de la DREAL pour ce qui concerne les glissements de terrain a été faite.
 - La seconde, faisant l'objet du présent rapport, teste la méthodologie proposée lors de la tranche précédente sur un autre contexte géologique, puis propose, par des tests réalisés sur la zone d'étude, une réflexion sur la possibilité d'une modélisation de la cartographie d'aléa glissement de terrain, qui pourrait permettre par la suite une cartographie à grande échelle.

2. Contexte géographique et géologique des communes étudiées

D'un point de vue géologique, la Basse-Normandie est à cheval sur deux grandes structures : le Massif Armoricain à l'ouest et le Bassin Parisien à l'est. Les deux communes étudiées sont situées sur les roches sédimentaires de la marge nord-ouest du Bassin de Paris, dans le nord-est du département du Calvados.

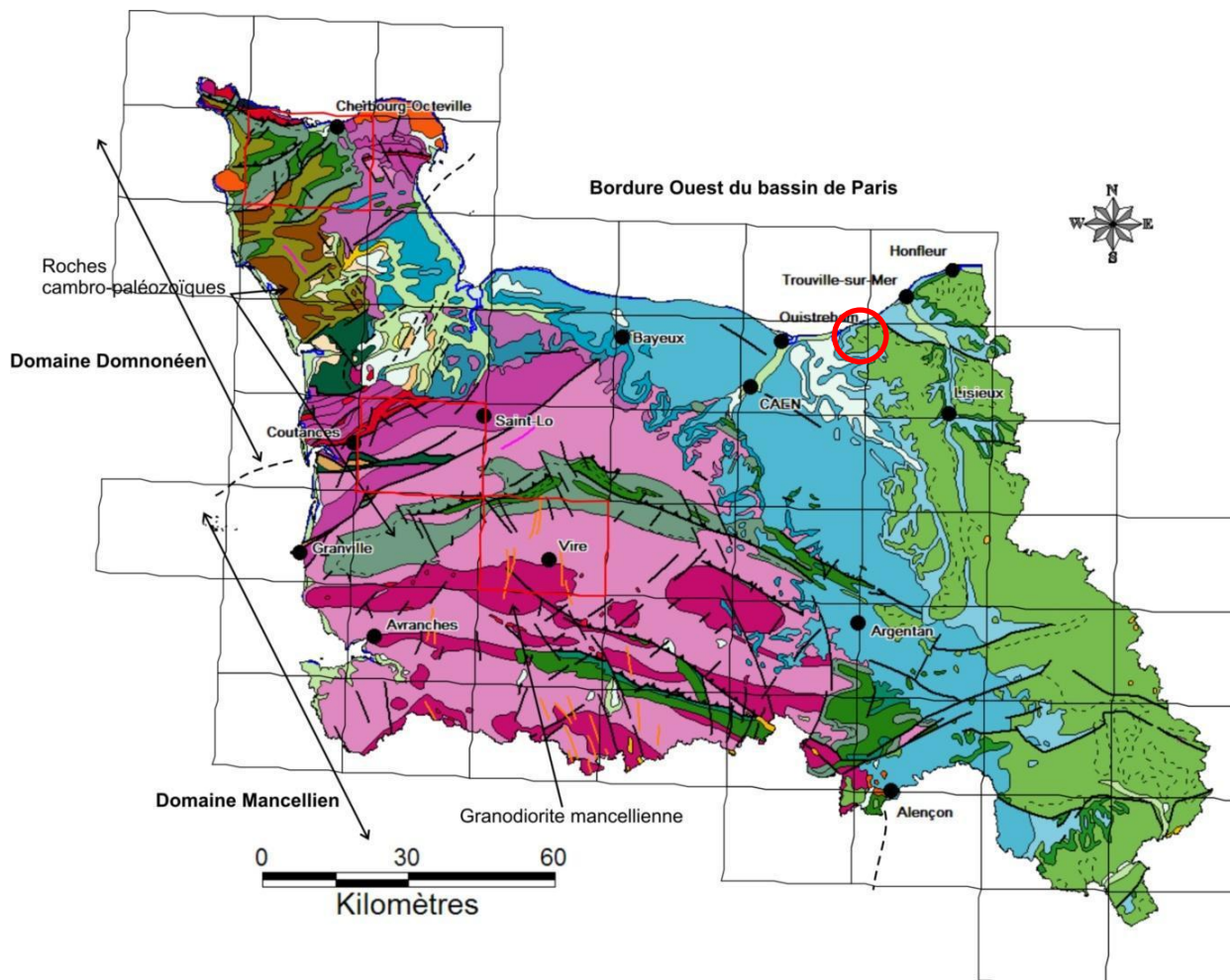


Illustration 1 : Carte géologie de la Basse-Normandie, extrait de la carte géologique de la France à 1 000 000. ©BRGM. Le cercle rouge indique la localisation du secteur étudié

2.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

Les deux communes sont situées à la bordure nord-ouest du Pays d'Auge, ce dernier étant délimité à l'ouest par la vallée de la Dives, qui fait office de frontière naturelle avec les paysages sans relief de la plaine de Caen.

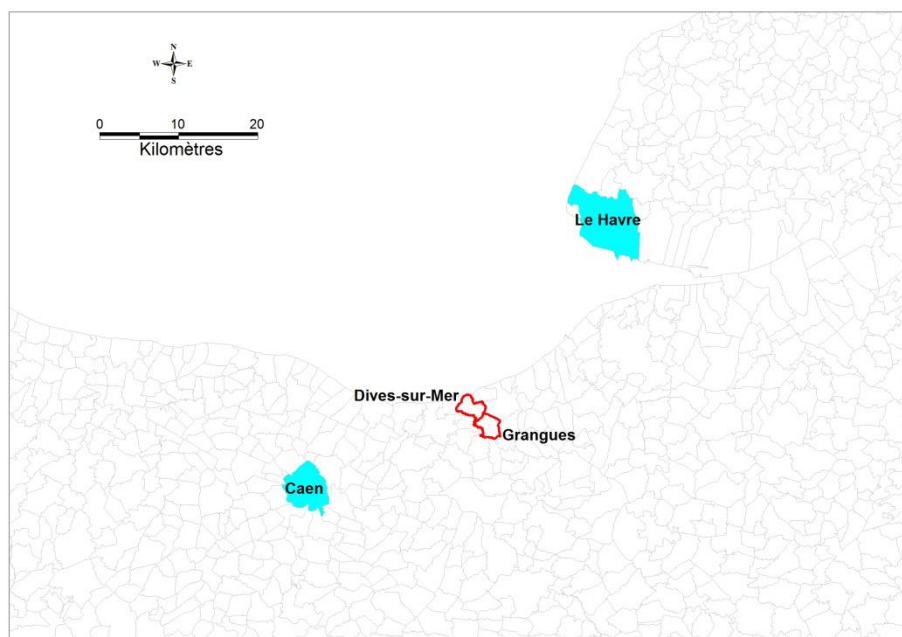


Illustration 2 : Localisation des deux communes concernées

D'un point de vue géomorphologique, les deux communes se trouvent au niveau de la cuesta crétacée, sur le revers de laquelle l'érosion (cours d'eau, ruissellement, littorale), accompagnée d'une légère surrection, a fortement incisé le plateau crayeux, générant des versants parfois abrupts, puisque le dénivelé entre les points les plus hauts et les points les plus bas de la zone d'étude est de l'ordre de 130 m.

Le paysage est donc celui de lambeaux de plateau, incisé par la Dives et ses affluents, créant des pentes dépassant souvent 20° sur les versants, et pouvant atteindre 45° sur le versant le plus au nord, qui a subi au fil du temps l'érosion littorale.

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Les deux communes présentent un contexte géologique similaire et contigu. Elles se trouvent à la limite NW de la couverture crayeuse, au niveau de la cuesta crétacée, ici dite « de la Dives ».

On trouve à l'affleurement les formations suivantes (de la plus ancienne à la plus récente) :

- Les marnes sableuses et calcaires du Callovien moyen (j3b), présentes au pied de la cuesta de la Dives. Elles sont souvent recouvertes par des alluvions ou des colluvions ;
- Les marnes de Dives (j3C, Callovien supérieur), peu épaisses au niveau de Dives, formées par des séquences argileuses à passées silto-sableuses ;
- Les marnes de Villers (j4, Oxfordien inférieur). Il s'agit de marnes grisâtres à rosées, puissantes de plus de 25 m, composées de trois séquences argileuses, surmontées de quelques bancs calcaires. Elles constituent le soubassement du Pays d'Auge. Les séquences argileuses se divisent comme suit :
 - Une séquence basale de 8 à 9 m d'épaisseur d'argiles grises ou noires, terminée par un très fin banc calcaire ;
 - Une séquence médiane épaisse de 8 à 10 m d'argiles brunâtres à rosées, comprenant de petits bancs calcaires, dont un au sommet ;

- Une séquence supérieure comprenant une majorité d'argiles grises alternant avec des petits bancs ou des nodules de calcaires aplatis.
- Cette séquence épaisse, très argileuse, située à mi pente, constitue des versants potentiellement instables, puisque composés d'argiles parfois très plastiques, entrecoupés de bancs calcaires pouvant parfois constituer un apport en eau ; Ces séquences sont souvent recouvertes de dépôts de pente (CLP/j4 ou Cn7, CP, c2, j4, .../j4), parfois très épais, notamment à Grangues, qui peuvent être assimilées à des coulées, probablement de glissements de terrain, issues d'avant le dernier maximum glaciaire ou du tardiglaciaire ;
- Les marnes et calcaires de l'Oxfordien inférieur à moyen (j4-5), alternance marno-calcaire ;
 - La glauconie de base (n7-c1), composée de sables argileux et glauconieux. Cette série peu épaisse marque la limite entre le crétacé inférieur et de crétacé supérieur, et donc ici la base de la transgression crétacée, qui vient en discordance sur les formations jurassiques, mettant en évidence ici une importante lacune de sédimentation. Cette formation bien qu'hétérogène, admet quasiment partout des caractéristiques géotechniques très faibles, et est donc particulièrement instable ;
 - La craie du Cénomanien (c2a et c2b), craie glauconieuse, gréseuse ou argileuse à la base, de plus en plus massive et calcaire dans les parties supérieures. Elle représente l'assise indurée du plateau. Son altération fournit une couche d'argiles sableuses à silex (RS), que l'on retrouve au-dessus à l'affleurement. Cette craie, poreuse, est le siège d'une importante nappe aquifère, pouvant humecter en eau régulièrement les argiles sous-jacentes.

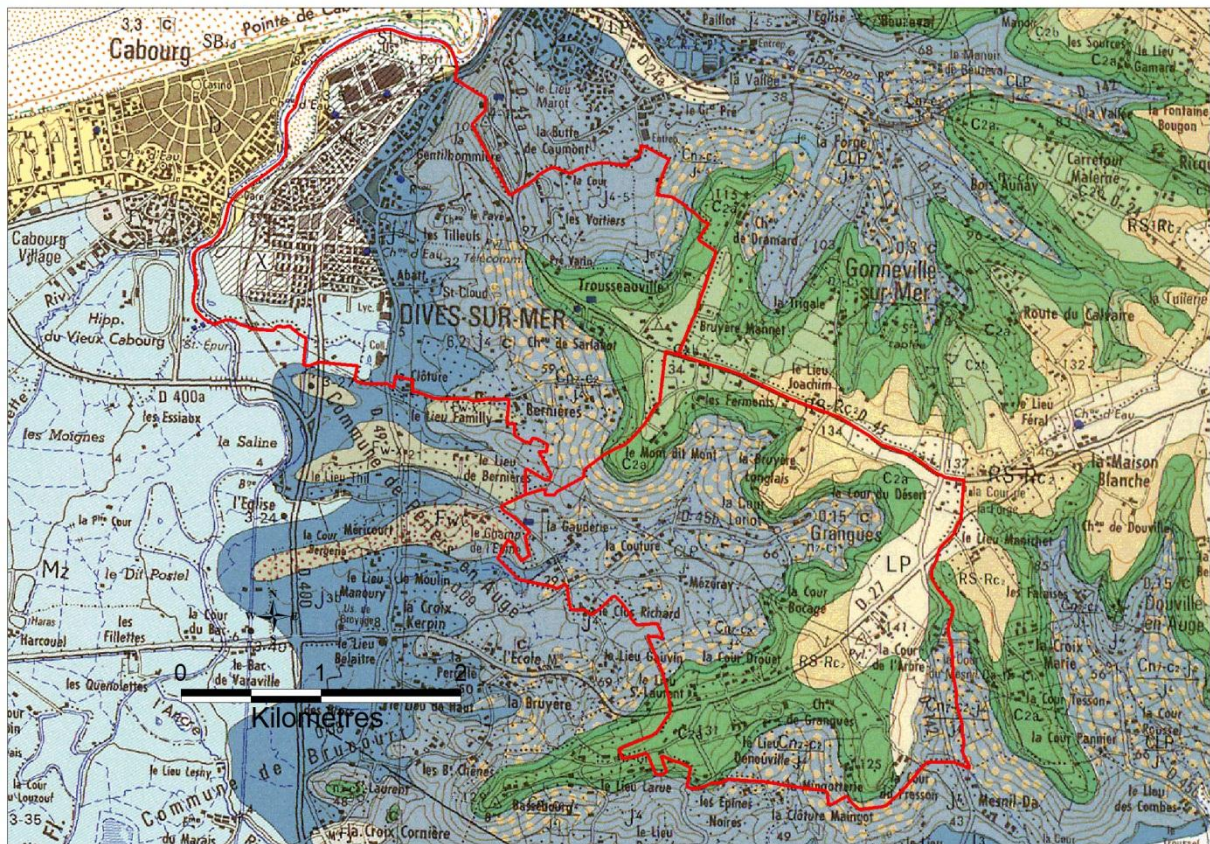


Illustration 3 : Extrait de la carte géologique de la France au 1/50 000°

3. Rappels théoriques

3.1. LA DYNAMIQUE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

3.1.1. Définition

Un glissement de terrain correspond à un déplacement, plus ou moins rapide (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 m^3 dans le cas du simple glissement de talus ponctuel, à quelques millions de m^3 dans le cas d'un mouvement de grande ampleur pouvant concerner l'ensemble d'un versant (Rivet et al., 2011).

3.1.2. Les mécanismes de versant

La stabilité des versants procède d'un rapport de force entre :

- ➔ Les forces de résistance, principalement exprimées par la cohésion, qui est la force d'attraction qui permet aux particules du sol de se maintenir reliées les unes aux autres ; ainsi que le frottement interne
- ➔ Les forces motrices : principalement composante du poids, éventuellement modifiées par la présence d'eau ; dirigées selon la pente.

Un versant sera stable tant que les forces résistantes seront plus élevées que les forces motrices. Dans le cas contraire, le seuil d'instabilité sera dépassé et le déséquilibre se manifestera par un départ en masse de matériaux, correspondant à un glissement de terrain.

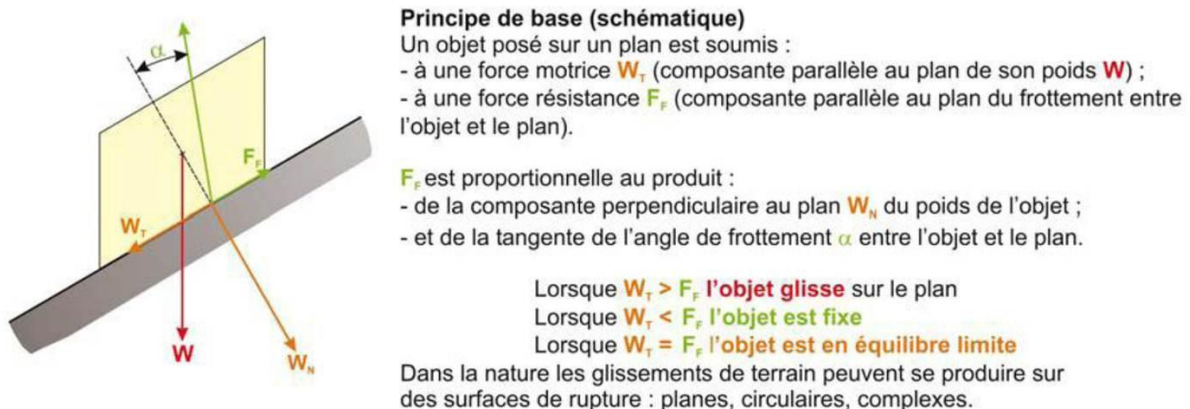


Illustration 4 : Schéma de principe de stabilité d'un versant soumis aux glissements de terrain (Rivet et al., 2011)

Les modifications apportées au milieu, qu'elles soient anthropiques ou naturelles, jouent en faveur de l'une des deux forces et influencent la stabilité des versants. En cas de déséquilibre induit, on parlera alors de facteur déclenchant.

3.2. FACTEURS INTERVENANTS DANS LA MISE EN PLACE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

3.2.1. Facteurs de prédisposition (facteurs permanents)

Ils constituent les éléments de paysages façonnés tout au long de l'histoire géologique. Ce sont ces facteurs qui définissent la susceptibilité d'un versant à être soumis ou non au phénomène de glissement de terrain. On citera :

- **Le facteur géologique**

Les glissements de terrain s'initialisent dans des matériaux meubles et/ou plastiques. Les terrains susceptibles seront donc plutôt à prédominance argileuse et/ou sableuse.

La disposition des couches jouera aussi un rôle important. En effet, si une couche argileuse plastique est surmontée de niveaux perméables aquifères, elle sera davantage soumise à une humectation et donc plus susceptible au phénomène de glissement de terrain.

- **Le facteur géomorphologique**

Il s'agit ici essentiellement de la pente, qui est liée aux processus de façonnement du paysage, et notamment à l'incision des plateaux par les cours d'eau, qui a eu pour conséquence de générer des déséquilibres sur les versants.

L'historique climatique du versant, et notamment les périodes froides du Quaternaire, jouent aussi un rôle important du fait des dépôts superficiels meubles qui ont pu être mis en place sous climat froid ou tardi-glaciaire, ainsi que des phénomènes d'altération et de décompression facilitant par la suite la déstabilisation des matériaux sur les versants.

3.2.2. Les facteurs de déclenchement

La mise en mouvement des matériaux est liée à un changement des conditions de stabilité qui peut avoir plusieurs origines, combinées ou non. Ainsi, les facteurs naturels favorisant le déclenchement d'un événement sont nombreux. On citera :

- Les événements pluvieux ou la fonte des neiges (augmentation des pressions hydrostatiques). Il apparaît que la présence d'une quantité importante d'eau dans des terrains en pente à composante argileuse est le principal facteur de déclenchement de glissements de terrain ;
- Certaines alternances climatiques brutales. Il s'agit notamment d'une alternance entre une période de sécheresse, entraînant des fentes de dessiccation dans les matériaux argileux, et une période orageuse, pouvant amener d'importantes quantités d'eau ;
- Les séismes. Bien que la région soit peu concernée, l'occurrence d'un séisme peut modifier les équilibres dans une pente et générer un glissement de terrain ;

On notera aussi que des facteurs anthropiques peuvent générer des glissements de terrain. C'est notamment le cas dans les milieux de bas plateaux du nord de la France, fortement urbanisés ou artificialisés. On citera parmi les causes anthropiques :

- Les terrassements. Des décaissements (déblais) non contrôlés peuvent supprimer une butée pouvant être la cause du déclenchement de glissements de terrain ; ça peut être

aussi le cas d'apport de masses importantes (remblais) en tête de versant à l'équilibre précaire ;

- L'apport d'eau. La non maîtrise des eaux à l'échelle d'un versant peut amener une concentration en certains points, favorisant le déclenchement d'instabilités ;
- Le déboisement. Les forêts jouent un rôle important dans l'évapotranspiration et ont donc tendance à empêcher la saturation des sols en eau. Par ailleurs, dans une moindre mesure, les racines des arbres de haut jet ont tendance à maintenir les couches superficielles. Un déboisement peut donc amener une modification des conditions d'équilibre d'un versant.

3.3. LES DIFFERENTS TYPES DE GLISSEMENT

On peut distinguer plusieurs types de glissement en fonction de la géométrie de la surface de rupture :

- Le glissement circulaire ou rotationnel,
- Le glissement translationnel ou plan,
- Le phénomène de fluage

3.3.1. Les glissements rotationnels

Dynamique générale

Il s'agit de la forme la plus classique et la plus spectaculaire de glissement de terrain. La surface de glissement est concave (loupe de glissement) et la cicatrice d'arrachement admet généralement une forme circulaire. Ils peuvent concerner des épaisseurs très importantes, même en milieu de bas plateau où l'on rencontre souvent des cicatrices d'arrachement dépassant 10 mètres de hauteur. Les matériaux concernés par les loupes de glissements sont peu cohérents à dominante argileuse.

Ils apparaissent souvent après une accumulation d'eau dans des terrains à la stabilité précaire.

Ce type de glissement se décompose souvent en deux parties : la partie supérieure, directement impactée par la loupe de glissement : masse glissée conservant généralement tout ou partie de la stratigraphie initiale et formant le plus souvent une contrepente ; la partie aval appelée coulée de débris. Le déclenchement du glissement libérant l'eau accumulée dans les matériaux sus-jacents, une coulée de matériaux désordonnés flue sur le versant. Ce type de coulée est toutefois souvent lié à la présence d'une nappe dans les terrains impactés.

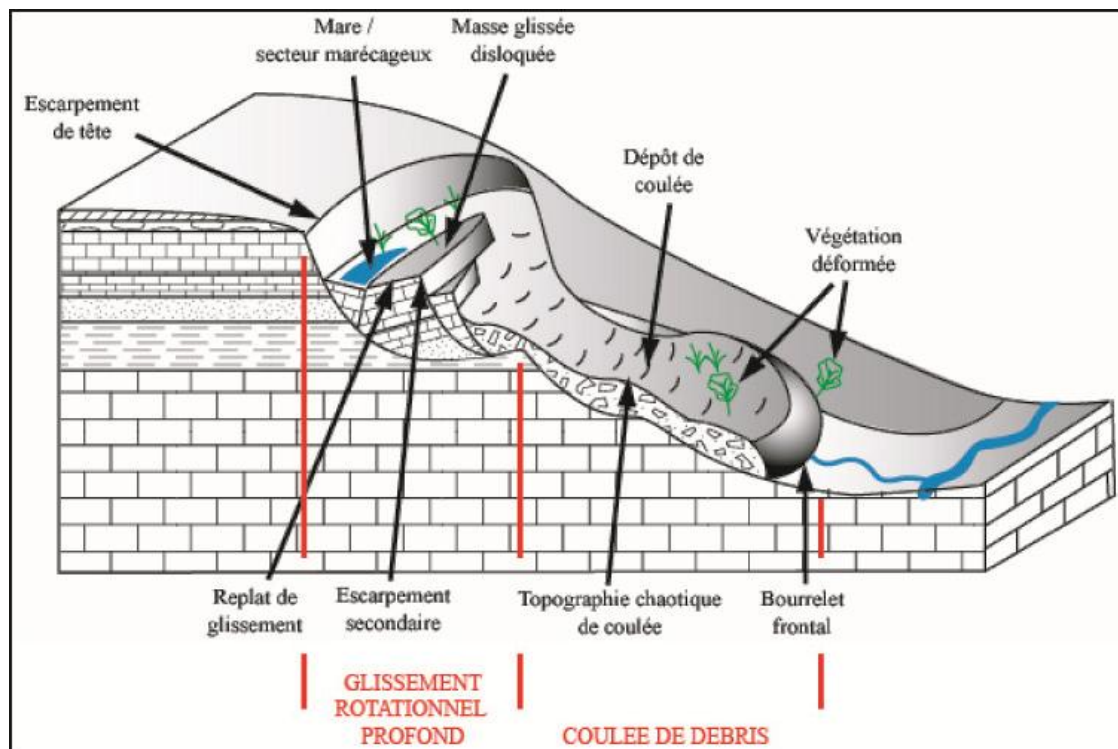


Illustration 5 : Schéma descriptif d'un glissement rotationnel

Les vitesses de ce type de glissement vont de plusieurs centimètres à plusieurs mètres par jour. Il faut souvent plusieurs dizaines d'années après le déclenchement avant d'observer une stabilisation précaire.

Les formations concernées sont donc : en partie supérieure, des masses glissées ayant conservé une partie de la stratigraphie locale ; en partie inférieure, des matériaux désordonnés, de toute taille (dépendant de la lithologie initiale), le plus souvent dans une matrice argileuse très plastique.

Il faut noter que les glissements de ce type qui se sont produits avant le dernier maximum glaciaire sont encore visibles dans le paysage et peuvent être repris, au moins en partie, par les glissements holocènes.

En fonction de leur volume et de leur géomorphologie, on distinguera deux types de glissement rotationnels :

- Les glissements gravitaires profonds, qui impactent souvent l'ensemble du versant et dont la surface de cisaillement se trouve dans la géologie argileuse en place. La profondeur de ces glissements dépasse souvent une dizaine de mètres ; Ils affectent les terrains meubles, mais aussi les terrains cohérents sus-jacents.
- Les glissements rotationnels « classiques ». De taille plus réduite, ils affectent essentiellement les terrains meubles. Ils peuvent donc se produire dans les terrains argileux en place, mais aussi dans des terrains déjà glissés. Ils se différencient aussi des glissements rotationnels profonds par les dimensions et les volumes mobilisés. Ils concernent en effet généralement des surfaces ne dépassant pas quelques milliers de m², pour une épaisseur ne dépassant pas quelques mètres.

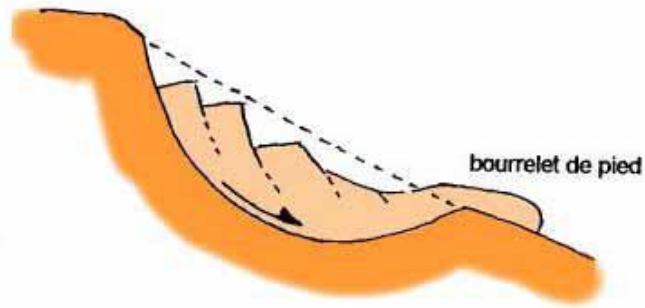


Illustration 6 : Coupe schématique simplifiée d'un glissement rotationnel classique

3.3.2. Les glissements translationnels (ou plans)

Dynamique générale

Ils impactent des roches peu cohérentes, argileuses. Leur surface de décollement est plane. Ils se déclenchent le plus souvent au niveau d'une zone de discontinuité entre deux matériaux de nature différente. Leur vitesse d'avancement (plusieurs centimètres à plusieurs mètres par jour) est variable dans le temps. Ils sont souvent peu profonds (quelques mètres au maximum).

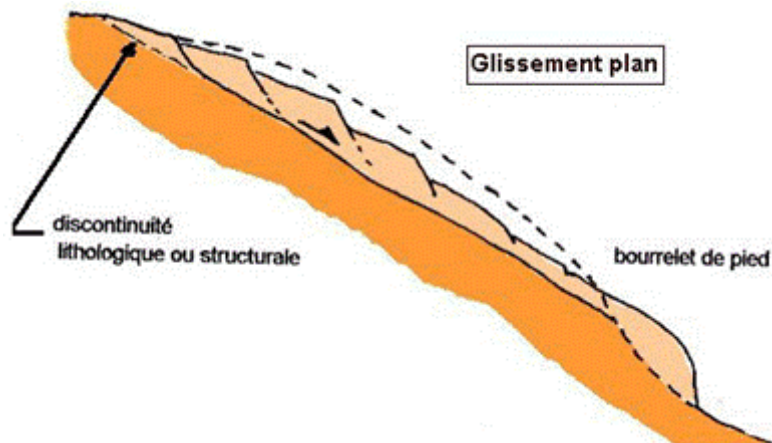


Illustration 7 : Coupe schématique simplifiée d'un glissement plan

Contrairement aux glissements rotationnels, ils impactent le plus souvent une seule lithologie. Aussi, dans la partie supérieure, il est difficile de différencier la masse glissée de la lithologie en place, si ce n'est au niveau du tassement des matériaux ou des formes visibles.

Dans la partie inférieure, il s'agit d'une coulée de matériaux généralement fins, se comportant comme un fluide, venant recouvrir les formations sous-jacentes, qui forme un bourrelet frontal bien caractéristique.

3.3.3. Le fluage

- **Description**

Le fluage est un phénomène de déformation lente à rapide, sous sollicitation permanente constante, qui affecte des matériaux déstructurés et/ou plastiques, même lorsque la pente est très faible (*Zornette et al.*, 2006). Ces matériaux sont souvent ceux de coulées de glissements profonds antérieurs, ou les couches géologiques les plus plastiques (de type Glauconie pour ce qui concerne les terrains faisant l'objet de cette étude). Le matériau évolue tel un fluide visqueux et, en fonction de sa teneur en eau, se déforme plus ou moins rapidement.

- Le fluage lent :

Le fluage lent (quelques millimètres par an) n'engendre généralement que des déformations « souples », sans rupture visible. En forêt, les arbres peuvent être courbés. Dans les prairies, le terrain peut prendre un aspect « moutonné ». Ces déformations lentes peuvent tout de même parfois être dommageables en milieu urbanisé.

- Le fluage rapide :

Le fluage rapide (quelques millimètres à quelques mètres par jour) résulte de la fluidification d'un sol déstructuré lorsque la quantité d'eau infiltrée dépasse un seuil critique. On peut l'associer aux coulées de débris résultant des glissements rotationnels ou des glissements translationnels. Ce phénomène peut engendrer de nombreux dégâts compte tenu de sa rapidité et de sa longue propagation.

4. Méthodologie

Peu d'éléments sont disponibles sur les deux communes étudiées. Afin de caractériser l'aléa de manière la plus fine possible, les données de base nécessaires doivent donc être acquises.

Lors de la première phase de l'étude (Pannet *et al.*, 2012) sur les glissements de terrain, plusieurs opérations avaient été réalisées :

- Une carte géomorphologique ;
- L'inventaire des phénomènes existants ;
- Une analyse critique des événements pouvant se produire dans des contextes similaires ;
- Une cartographie des formations superficielles.

L'analyse des résultats de la phase précédente a permis de montrer que certaines opérations étaient obligatoires à la bonne réalisation de la carte d'aléa, alors que d'autres, bien qu'apportant des informations intéressantes, l'étaient moins (cartographie exhaustive des formations superficielles par exemple), ce qui a permis d'optimiser le travail de terrain.

Aussi, le travail de terrain a consisté ici en la réalisation d'une cartographie historique des glissements de terrain, par une approche géomorphologique.

Les phénomènes pouvant se produire étant similaires dans leur déclenchement et dans leur propagation à des mouvements déjà connus, l'analyse des événements a pu être reprise de la phase précédente.

4.1. APPROCHE GEOMORPHOLOGIQUE

Très peu d'informations sur le sous-sol ou l'historique des instabilités de versant sont disponibles sur ces communes rurales qui constituent le terrain d'étude.

Les coupes existantes ou faciles à réaliser sur le terrain ne permettent pas d'être exhaustif sur la connaissance de la lithologie de surface. Il serait excessivement coûteux de réaliser un maillage de forages géotechniques permettant d'avoir la connaissance suffisante afin de définir l'aléa glissement de terrain sur l'ensemble du terrain d'étude.

Aussi, l'analyse des formes du terrain permet d'obtenir de nombreuses informations. En effet, les différents processus qui régissent la formation des paysages sont associés à des formes bien précises. La cartographie de ces formes, associée à l'étude de quelques coupes permettant d'identifier le matériel mobilisé et de confirmer ainsi l'interprétation de la forme, permet de retracer la mise en place des paysages, et ainsi les dynamiques et les formations associées.

Les données ainsi recueillies permettent l'acquisition d'une information nécessaire à la classification de l'aléa.

Les données recueillies permettent d'appréhender les différentes dynamiques qui façonnent les paysages de bas plateaux et donc les versants tels que ceux étudiés, tout au long du Quaternaire et encore aujourd'hui.

4.1.1. Dynamique gravitaire

C'est la principale dynamique qui régit la mise en place des formations de surface sur les versants. Les différents processus associés peuvent s'activer sous climat froid (période froide du Quaternaire) ou sous climat tempéré (actuel). Les matériaux mobilisés et les formes associées sont dépendants de ces processus.

On distingue deux types de formes associées à des formations superficielles de versant :

- les formes « lisses » : il s'agit d'une succession de formes régulières et uniformes qui naissent au sommet du versant et se raccordent au niveau altitudinal des cours d'eau. Successivement on distingue un versant réglé dont la pente est souvent supérieure à 30°, un glacis qui présente une pente comprise généralement entre 10 et 15 degrés et une terrasse quasiment horizontale. A ces formes, sont associées des formations superficielles caractéristiques d'un climat froid (éboulis de pente, grèzes litées, coulées de solifluxion superficielles, etc.). Ces formations se sont souvent mises en place sur un sol gelé (pergélisol) ;
- les formes « rugueuses » : il s'agit de formes de mouvements de terrain (glissements et/ou coulées) qui sont associées à une formation très plastique et qui est à la fois hétérogène (argiles, marnes, sables, calcaires) et hétérométrique (de l'argile au gros bloc). Ces formations sont caractéristiques d'un climat tempéré dans lequel l'eau sous sa forme liquide (peu de gel) est abondante. Elle favorise ainsi la plasticité des roches à dominante argileuse. Contrairement à un écoulement liquide qui rejoint toujours le fond de la vallée, ces formations glissent sur les versants mais ne parviennent pas toujours au niveau du cours d'eau.

Les observations de terrain permettent d'identifier chacune de ces formes et de ces formations. Elles sont localisées dans l'espace. La superposition de l'une par l'autre permet d'établir une chronologie relative. La construction de chacune des formes de terrain est ainsi replacée dans son contexte climatique (*Marre et al.*, 1997).

4.1.2. Hydrodynamique

Les formations issues de ces dynamiques résultent du transport et de la sédimentation par les eaux courantes des substances minérales et organiques érodées sur les bassins versants (d'après *Campy et Macaire*, 1989).

Concernant le terrain d'étude, on distinguera deux types de mise en place :

- **La dynamique alluviale**

Cela concerne le dépôt classique d'alluvions par les cours d'eau en fond de vallée, les dépôts les plus grossiers étant déposés en période périglaciaire, quand les cours d'eau ont le plus de compétence. Actuellement, la compétence des cours d'eau est très faible, et ils ne transportent que des matériaux fins (limons à sables).

Les formations associées ne concernent pas la problématique des glissements de terrain, puisque les formes associées sont pseudo-planes et situées en fond de vallée.

Ces formations sont généralement très bien cartographiées sur la carte géologique au 1/50 000.

- **Le ruissellement**

Il s'agit d'un processus hydrique dans lequel la gravité joue un rôle important. Il va concerner de l'érosion, du transport et du dépôt sur les versants.

Ce processus est directement lié aux précipitations, et va se mettre en marche lors d'épisodes pluvieux intenses.

La battance des sols du plateau (limons argileux) peut générer très rapidement une construction d'écoulement pouvant transporter des volumes importants de charge solide.

Cela va se traduire sur les versants par une réactivation des vallons secs, avec une dynamique d'incision dans les plus fortes pentes et une dynamique de dépôt au niveau des ruptures de pente.

Les dépôts se font sous forme de cône de déjection, de matériaux souvent fins au niveau des ruptures de pente ou d'obstacles. Ils sont généralement indiqués sur la carte géologique comme « limons ou colluvions de fond de vallon ».

Ce processus peut aussi engendrer des déstabilisations de versant au niveau des zones d'incision.

4.1.3. Dynamique éolienne

Il s'agit de dépôts de matériaux très fins déposés par les vents essentiellement lors des périodes froides du Quaternaire pour ce qui concerne la région Basse-Normandie. Les dépôts sont essentiellement déposés sur le plateau (souvent très bien cartés sur la carte géologique au 1/50 000 comme loess ou limons de plateau), mais on peut en retrouver dans certains versants sur des épaisseurs qui peuvent être importantes (dépôts « sous le vent » essentiellement, généralement non cartés). Ces matériaux fins peuvent être repris par le ruissellement et être déposés dans le versant.

4.1.4. Cartographie géomorphologique

Une carte géomorphologique de travail a donc été réalisée sur l'ensemble du territoire de chacune des deux communes étudiées. Elle résulte d'un travail de terrain d'identification des dynamiques décrites ci-dessous.

L'interprétation des formes permet par la suite, combiné à l'étude des coupes, de réaliser l'inventaire des phénomènes historiques, une carte des formations superficielles puis d'apporter des informations permettant d'affiner la cartographie de l'aléa.

Les formes suivantes ont été identifiées :

- Décrochement / escarpement / cicatrice d'arrachement,
- Moutonnement,
- Bourrelet (avec identification des bourrelets frontaux),
- Forme de graben / hémi graben,
- Replat,
- Contrepente,

L'ensemble des formes listées ci-dessus peuvent être en lien avec un phénomène présent ou passé de glissement de terrain.

D'autres formes ont aussi été cartées :

- Abrupt / corniche,
- Versant réglé,
- Glacis,
- Terrasse,
- Cône de déjection,
- Talweg marqué / ravine,
- Rupture de pente,

Par ailleurs, l'eau étant un des moteurs principaux de la mise en place des mouvements de terrains, les indices de présences d'eau ont aussi été cartés :

- Source / sourcin,
- Zone humide,
- Végétation hygrophile,

Enfin, un dernier indice permettant d'identifier un mouvement a été pris en compte : la forme des arbres. En effet, un arbre étant incliné à la suite d'un mouvement a toujours tendance à se redresser. On peut alors observer une forme de « tête de pipe » au niveau du tronc. Quand plusieurs arbres de ce type sont présents sur une même zone, ils indiquent un déplacement des terrains. C'est donc un indice permettant d'identifier des formes particulières de terrain, souvent plus difficilement visibles en milieu forestier

4.2. CARTOGRAPHIE HISTORIQUE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

L'exploitation des données bibliographiques et la cartographie géomorphologique ont permis de répertorier un très grand nombre de glissements de terrain ayant affecté la zone d'étude. L'âge des glissements de terrain (Pléistocène, Holocène, Récent ou Actuel) est donné à titre indicatif et est déterminé tout d'abord par analyse géomorphologique et une datation relative.

Ainsi, les glissements considérés comme « récents à actuels » sont les glissements effectivement en cours d'évolution (donc actifs) ou bien des glissements dont il existe un témoignage précis. Les glissements datant de l'Holocène ou du Pléistocène sont des glissements qui se sont produits à des périodes échappant généralement à la mémoire ou tout simplement à l'occupation anthropique historique de la région.

Globalement, on peut résumer ainsi :

- glissement « Pléistocène » : datant de plus de 10 000 ans, ayant subi au moins une glaciation ;
- glissement « Holocène » : datant de moins de 10 000 ans, la date précise reste inconnue ;
- glissement « récent ou actuel ou historique » : datant d'une époque pour laquelle on a pu obtenir une information chronologique précise.

D'une façon générale, les limites exactes des glissements de terrain ne sont pas connues : l'emprise des glissements actifs est a priori évolutive et l'emprise des glissements plus anciens est estompée par le temps.

La connaissance de quelques glissements récents nous a été apportée par la bibliographie ou par quelques témoignages locaux. On notera notamment que la carte géologique de la France

au 1/50 000^e, feuille de Caen (n°120) décrit et cartographie des formations assimilables à des résidus de glissements de terrain mis en place en climat péri-glaciaire. Les dépôts ainsi identifiés sur la carte géologique ont donc été ajoutés comme « glissements pléistocènes » à la carte historique des glissements de terrain.

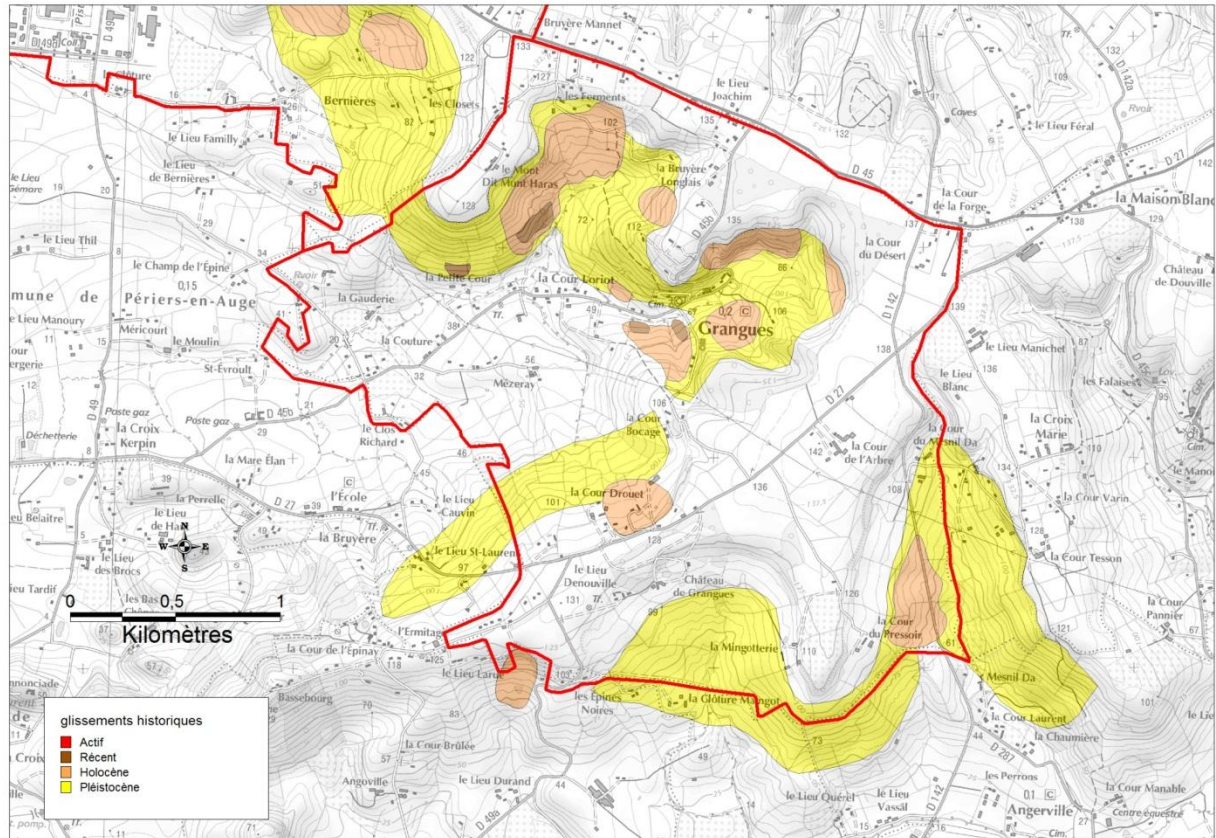


Illustration 8 : Exemple de cartographie historique des glissements de terrain. Commune de Grangues

Mais la plupart des glissements répertoriés provient de l'analyse géomorphologique des terrains pour lesquels on s'est attaché à relever tous les indices susceptibles d'apporter une information spatiale et temporelle (Marre et al., 1997). Il s'agit donc des indices géomorphologiques évoqués dans les paragraphes précédents, accompagnés d'autres indices botaniques ou anthropiques (illustration 9) :

- Les indices topographiques : escarpement de tête, replat de glissement, contrepente, etc.
- Les indices géologiques : nature de la formation, altitude de la formation, pendage, contre pendage, etc.
- Les indices hydrologiques : présence d'étangs, de mares, de sources, etc.
- Les indices botaniques : présence d'une végétation hygrophile, déformation des arbres, état sanitaire de la végétation, etc.
- Les indices anthropiques : fissures dans des murs, dégâts sur les voies de communications, déformations des plantations, etc. Ces derniers indices peuvent aussi donner une information chronologique sur l'activité du mouvement.

La cartographie historique (en exemple sur l'illustration 8) est visible au 1/10 000 en annexe 1 et disponible en format SIG sur le CD annexé au rapport.



Illustration 9 : Exemples d'indices de terrain associées à des phénomènes de glissement de terrain récent. Commune de Dives-sur-Mer

4.3. CARTE D'ALEA

Nous avons identifié quatre types de glissements de terrain spécifiques à la zone d'étude. Il s'agit des glissements rotationnels profonds, des glissements de pente, dits « classiques », des glissements plans ou translationnels et du phénomène de fluage (lent ou rapide).

Dans le but de cerner l'ampleur d'un phénomène qui pourrait se produire, il convient de définir un phénomène de référence permettant de définir une intensité en cas d'occurrence.

Bien que les formations géologiques diffèrent quelque peu, les conditions de mise en place des glissements de terrain sur la zone de l'étude sont similaires à celles observées lors de la phase précédente. Aussi, les éléments de références pris en compte lors de la phase précédente de l'étude ont été jugés valables pour caractériser ceux pouvant affecter le terrain de la présente étude.

Qualification de l'aléa

Il s'agit de délimiter le périmètre où les phénomènes doivent être pris en compte en termes de prévention des risques et hiérarchiser ces zones en différents niveaux d'aléa. La quantification de l'aléa doit faire référence à quatre éléments :

- Le type de phénomène ;
- La probabilité d'occurrence du phénomène ;
- L'intensité du phénomène en cas d'occurrence ;
- L'extension spatiale du phénomène.

Les données acquises, décrites dans les paragraphes précédents, ainsi que les données de pentes (MNT) et sur le substratum (cartes géologiques) nous permettent de définir ces quatre éléments. Par exemple, la typologie des glissements va plutôt permettre d'obtenir une information sur le type de phénomène susceptible de se produire et donc sur l'intensité en cas d'occurrence. La présence d'eau, mais aussi de masses glissées en équilibre précaire apportent une information sur la probabilité d'occurrence.

Facteurs pris en compte

Les différents facteurs listés précédemment permettent selon les critères décrits ci-après de caractériser l'aléa glissement de terrain sur la zone d'étude. Il s'agit :

- De la géologie, une note de susceptibilité étant attribuée à chaque couche géologique. Sur la zone d'étude, la Glauconie et les argiles de Gault ont été caractérisés comme très susceptibles ;
- La pente ;
- Les formations superficielles ;
- Les coulées de glissement, qui jouent un rôle très important, car renfermant une bonne partie des indices d'instabilités relevés sur le terrain ;
- La présence d'eau
- Les indices d'instabilité, de trois ordres : topographiques (cicatrices, moutonnement, bourrelets...), botaniques et anthropiques.

Estimation de la probabilité d'occurrence du phénomène

La diversité et la complexité des phénomènes de glissements de terrain ainsi que le manque de données les concernant ne permettent pas de quantifier précisément la probabilité d'occurrence d'un mouvement de terrain, comme cela se pratique pour d'autres risques (inondation notamment).

On adopte donc ici une approche plus qualitative :

- Pour les phénomènes déclarés, la probabilité d'occurrence sera maximale,
- Pour les phénomènes potentiels, l'estimation de la probabilité d'apparition d'un glissement de terrain dépendra de l'importance des différents facteurs de prédisposition considérés.

Les différentes méthodes et données recueillies tout au long de l'étude, et notamment l'approche géomorphologique prennent tout leur sens ici car elles permettent d'appréhender cette notion de probabilité d'occurrence en prenant en compte :

- Les phénomènes anciens,
- Les paramètres naturels et anthropiques favorables au processus d'instabilité (présence d'eau notamment...)
- Les indices précurseurs (formes, végétation...).

Estimation de l'intensité du phénomène

Les différents niveaux d'intensité des phénomènes ont été évalués en fonction principalement de la possibilité de mettre en œuvre un parade technique (guide PPRN) pour s'en prémunir et

de la difficulté (et donc du cout probable) de sa réalisation. Cela permet d'identifier les phénomènes majeurs des phénomènes plus secondaires.

- **Intensité très forte**

Phénomènes de grande ampleur dont les caractéristiques sont telles qu'aucune parade technique permettant de s'en prémunir ne pourra être mise en place (*Zornette et al.*, 2006) :

- Glissements actifs mettant en mouvement un volume de terrain très important (dépassant largement 100 000 m³),
- Glissements anciens ayant provoqué de fortes perturbations.

- **Intensité forte**

Phénomènes intéressant une aire géographique débordant largement le cadre parcellaire. Les parades techniques pouvant être mises en œuvre pour s'en protéger seront techniquement difficiles à réaliser et/ou auront un coût très important.

- **Intensité moyenne**

Phénomènes d'ampleur réduite dont le coût des parades techniques pouvant être mises en place pourra être supportable financièrement par un groupe restreint de propriétaires (immeuble collectif, petit lotissement...).

- **Intensité faible**

Phénomènes actifs ou anciens dont le coût des parades techniques pour s'en prémunir serait supportable financièrement par un propriétaire individuel.

- **Intensité nulle à faible**

Phénomène inexistant ou d'ampleur très réduite (de type reptation superficielle)

4.3.1. Détermination du niveau d'aléa

Le croisement entre la probabilité d'occurrence et l'intensité d'un phénomène permet de déterminer le niveau d'aléa.

Conformément aux recommandations pour la réalisation de PPR, les espaces protégés par des ouvrages ou stabilisés à l'aide de travaux de confortement ou de drainage seront toujours considérés comme restant soumis aux phénomènes étudiés et la délimitation de l'aléa n'en tiens pas compte. Le niveau d'aléa sera finalement évalué comme suit :

Intensité du phénomène Probabilité d'occurrence	Très forte	Forte	Moyenne	Faible	Très faible
Fort : quelques années, phénomène actif	Majeur	Fort	Fort	Moyen	Moyen
Moyen : quelques décennies	Fort	Fort	Moyen	Moyen	Faible
Faible : supérieure à 100 ans	Moyen	Moyen	Moyen	Faible	Faible
Très faible: plusieurs siècles	Moyen	Faible	Faible	Très faible	Très faible

Illustration 10 : Tableau de détermination de l'aléa

Il faut noter, compte-tenu notamment du faible dénivelé (pentes faibles et versants de faible longueur), et donc d'absence de possibilité d'occurrence d'un phénomène d'intensité très forte, qu'aucun aléa majeur n'est recensé sur la zone d'étude.

4.3.2. Cartographie de l'aléa

La cartographie de l'aléa (exemple en illustration 11) est réalisée à partir de croisements SIG de tous les critères identifiés précédemment. Les différentes cartes d'aléa au 1/10 000 sont visibles en annexe 2, et disponibles en format SIG dans le CD joint au rapport.

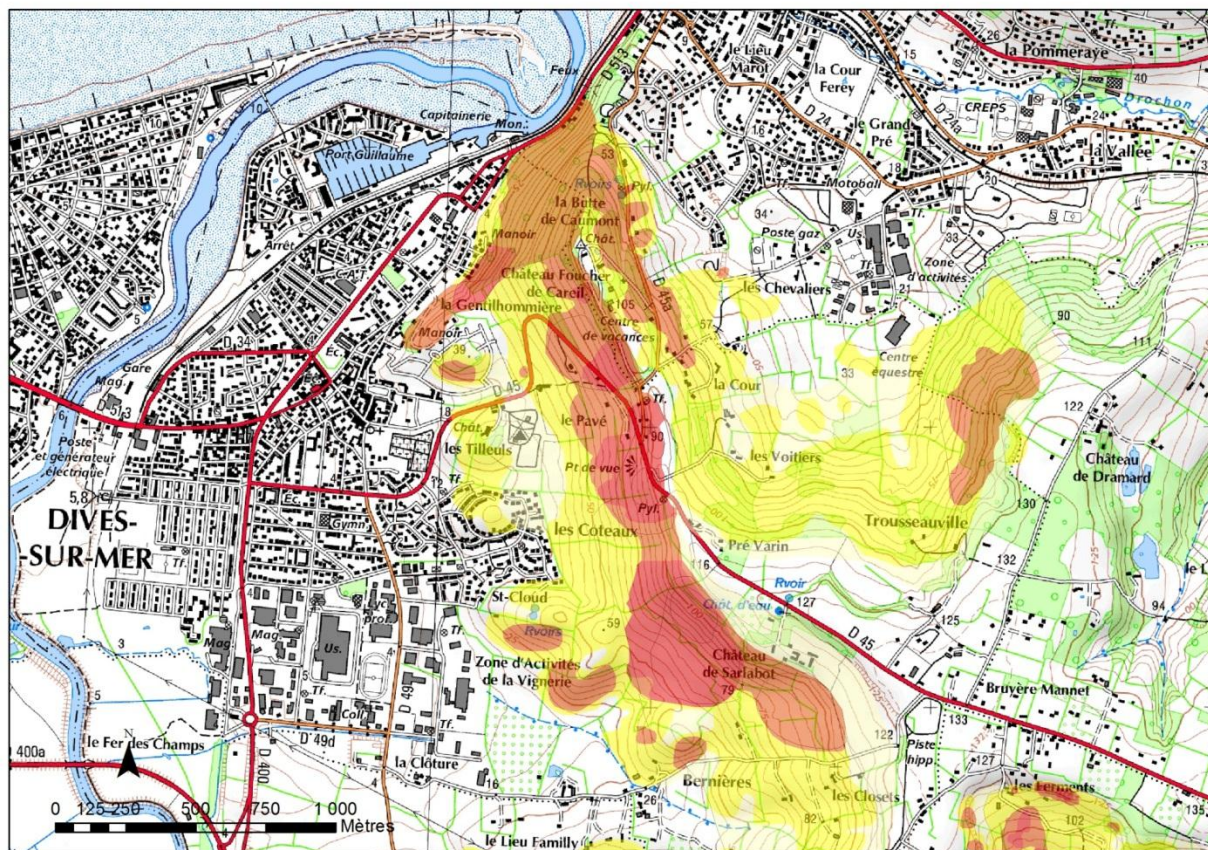


Illustration 11 : Exemple de cartographie de l'aléa . Commune de Dives-sur-Mer

5. Analyse critique de la carte de prédisposition

5.1. CRITERES PRIS EN COMPTE PAR LA CARTE DE PREDISPOSITION

La carte de prédisposition aux glissements de terrain est réalisée à partir d'une analyse combinée des pentes et de la géologie, qui sont deux facteurs essentiels dans la mise en place de tels phénomènes.

Des limites peuvent toutefois être apportées quant à l'utilisation brute de ces données.

- **La pente**

Même s'il est vrai qu'un terrain peu cohérent dans une forte pente est toujours fortement prédisposé au phénomène de glissement de terrain, une faible pente dans ces mêmes matériaux n'est pas forcément garante d'une prédisposition moins élevée. En effet, un troisième facteur déterminant la mise en place de glissements de terrain n'est pas pris en compte ici : l'eau. Aussi, on peut observer la mise en mouvements de volumes importants sur des versants à faible pente en cas de combinaison entre des matériaux très plastiques (type glauconie de base par exemple) et une alimentation conséquente de ces matériaux en eau.

Aussi il apparaît clairement sur la carte de prédisposition au niveau du secteur d'étude un impact relativement fort du critère pente, qui entraîne une surévaluation de la prédisposition.

- **La géologie**

La seule donnée géologique couvrant l'ensemble des versants de Basse-Normandie est issue de la carte géologique de la France au 1/50 000. Cette information avait à l'origine pour but de connaître de façon exhaustive le sous-sol français, notamment dans une optique d'identifier les ressources minérales. Aussi, les formations superficielles ont été longtemps négligées par les cartographes, d'une part parce que cette information n'était pas le but recherché, et d'autre part parce que leur cartographie exhaustive rendrait illisible l'information géologique sous-jacente.

Les formations superficielles sont présentes sur la majeure partie du territoire, y compris sur les versants où elles n'ont été que très peu cartographiées. Or, on observe que ces formations de versant jouent un rôle très important dans la mise en place actuelle des phénomènes de glissement de terrain.

L'utilisation de la carte géologique au 1/50 000 comme élément prédisposant au déclenchement de glissement de terrain est donc juste, mais très incomplète, notamment car les formations superficielles sont très peu présentes sur cette dernière.

5.2. COMPARAISON

5.2.1. Statistiques

En comparant la carte de prédisposition avec la carte d'aléa, plusieurs éléments notables peuvent être cités :

- 74 % des zones présentant un aléa sont couvertes par la carte de prédisposition. Cette statistique indique donc une tendance générale de la carte de prédisposition à sous-évaluer le phénomène.
- 92% des surfaces prédisposées correspondent réellement à un aléa. Ce qui signifie une très légère surévaluation ponctuelle des zones impactées, probablement due à la précision du MNT (?) ainsi qu'à certaines imprécisions de la carte géologique au 1/50 000^e.
- 72% des zones d'aléa fort correspondent à des zones de prédisposition forte à très forte.
- 48% des zones d'aléa moyen correspondent à des zones de prédisposition fortes ou très fortes
- Mais 90% des zones fortement ou très fortement prédisposées ne correspondent pas à un aléa fort, ce qui marque ici une très forte surévaluation du niveau de prédisposition.

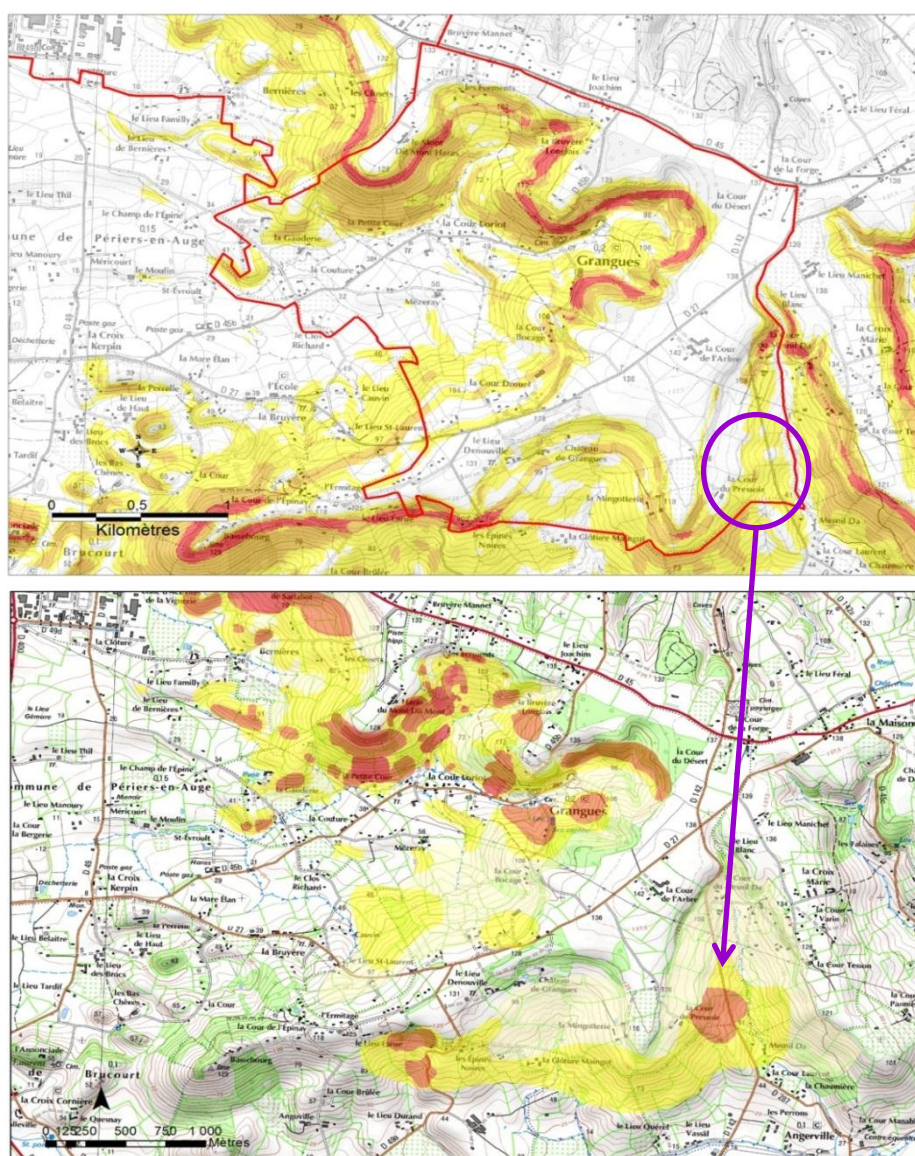


Illustration 12 : Exemple de comparaison entre la carte de prédisposition et la carte d'aléa ; exemple d'impact de la prise en compte des formations supercielles et des données de terrain

5.2.2. Causes / Discussion

Certains critères de comparaison fonctionnent assez bien au regard des statistiques précédemment présentées.

La corrélation générale montre que la carte de prédisposition cible correctement les surfaces prédisposées, puisque ces dernières correspondent pour l'essentiel à un aléa réel.

Selon la comparaison inverse, $\frac{1}{4}$ des zones d'aléa sont « oubliées » par la carte de prédisposition. Trois raisons peuvent être avancées :

- La plus prégnante est liée à la propagation des glissements de terrain, et notamment des glissements historiques. En effet, la carte géologique ne cartographie que très peu les coulées d'anciens glissements, qui sont pourtant, pour ceux ayant été activés à l'Holocène, des zones de forte instabilité potentielle, donc correspondant à un aléa (illustration 12) ;
- La forte prédominance du critère de pente dans la définition de l'aléa ;
- L'imprécision du MNT utilisé.

Dans le détail, les résultats de la comparaison sont moins bons pour la carte de prédisposition. Les zones d'aléa fort sont correctement ciblées (72%), ce qui est dû à la corrélation entre des pentes importantes, et la formation la plus plastique de la pile considérée, à savoir la glauconie de base. On peut ainsi dire que la carte de prédisposition cible très bien l'aléa de départ de glissements originels profonds impactant le substrat géologique en place, dont la mise en action est liée à la pente, à la lithologie et des apports massifs d'eau sur le long terme (remontée de nappe par exemple).

Mais si on cumule les aléas moyen et fort, plus de la moitié ne correspondent pas à des zones de prédisposition forte ou très forte. Cela s'explique aisément par le fait qu'un des deux moteurs principaux - l'eau - et qu'un des facteurs de prédisposition principaux - la disposition des formations superficielles -, ne sont pas pris en compte dans la mise en place de cette carte de prédisposition. Si l'on ajoute à cela l'importance trop grande donnée à la pente, et la surévaluation des critères de stabilité attribués à certaines formations argileuses (glauconie notamment), cela explique aussi la très forte surévaluation de la prédisposition (90% des zones fortement ou très fortement prédisposées ne correspondant pas à un aléa fort).

Or, des éléments de coulées de débris, remaniant des formations très plastiques comme la glauconie de base, en présence d'eau, peuvent générer des instabilités même sur des pentes très faibles (quelques %).

En résumé, et cela rejoint pour une grande partie les observations de la phase précédente de l'étude, on peut donc dire que la carte de prédisposition est un excellent outil qui permet de cibler les zones présentant potentiellement un aléa, et doit alerter les autorités compétentes lorsque des zones indiquées comme prédisposées recroisent des enjeux ou lors de travaux d'aménagement du territoire. Elle permet donc de cibler les zones devant faire l'objet de travaux plus poussés.

Elle ne permet toutefois pas de se substituer à une carte d'aléa pour les raisons principales suivantes :

- L'importance trop grande donnée au critère de pente, et dans certains cas à la susceptibilité de certaines couches géologiques (corrections envisageables pour ce point),

- L'absence de prise en compte des formations superficielles,
- L'absence de prise en compte des arrivées d'eau,
- L'absence de prise en compte du recul et de la propagation en cas d'occurrence.

Elle constitue donc un très bon d'outil de prévention en première approche, à son échelle de validité.

6. Tests de modélisation

La modélisation effectuée au cours de cette étude est à but expérimental. Elle consiste à modéliser un même objet avec des données d'entrée de différentes précisions. Le but de cette opération est de trouver les éléments d'entrées nécessaires à la réussite d'une telle modélisation, ainsi que les éléments manquant pour y parvenir.

Le but étant à terme de disposer d'un outil fiable, permettant de réaliser une modélisation de l'aléa à grande échelle et à coût modéré.

6.1. MODELE EMPLOYE

ALICE (Assessment of Landslides Induced by Climatic Events) est un logiciel d'aide à la cartographie de l'aléa glissement de terrain développé par le BRGM. Il a été conçu pour être utilisé dans le cadre d'études régionales de plusieurs km², mais peut fournir des résultats tout à fait cohérents à l'échelle de la commune, tant que les données d'entrée sont adaptées pour un rendu à cette échelle.

Il s'appuie sur un modèle mécanique et géotechnique dans lequel les principales caractéristiques physiques du milieu sont quantifiées et utilisées dans un modèle mathématique calculant un facteur de sécurité.

Ces modèles nécessitent de connaître la répartition spatiale (et parfois temporelle) des paramètres qui vont conditionner la stabilité des sols (caractéristiques mécaniques, paramètres de la nappe...).

L'intérêt principal de ce logiciel est de permettre la prise en compte des incertitudes liées à certains paramètres du modèle grâce à une approche probabiliste. En effet, les caractéristiques géotechniques sont définies par des distributions, et non par des valeurs constantes.

Pour la modélisation de la stabilité des terrains, le logiciel calcule des facteurs de sécurité au glissement en utilisant la méthode de Morgenstern and Price (1965, 1967), modèle de stabilité de pente défini avec une géométrie de rupture quelconque (*Olivier et al.*, 2012)

Les données d'entrée pour la modélisation sont :

- Un Modèle Numérique de Terrain (MNT), qui va permettre le calcul d'une carte des pentes et d'une carte des directions d'écoulement (ici, deux MNT ont été utilisés : 25 m IGN et lever LIDAR dégradé à 5 m),
- Un modèle géologique réalisé à partir de la carte géologique et de la cartographie de terrain réalisée dans le cadre de cette étude, permettant notamment d'intégrer les formations superficielles,
- Un niveau de nappe, permettant d'intégrer des zones où de l'eau sub affleurante a pu être constatée sur le terrain (rendu possible ici notamment car le terrain a été réalisé en période sèche).

Le principe de modélisation du logiciel est basé sur le calcul de facteurs de sécurité pour plusieurs positions de glissements de long de profils définis sur les lignes de plus grande pente.

Pour chaque série de modélisation effectuée, plusieurs calculs sont réalisés pour chaque position en utilisant un tirage de type Monte-Carlo dans les distributions des caractéristiques

géotechniques. La probabilité d'obtenir un facteur de sécurité inférieur à 1 représente la probabilité d'occurrence du glissement pour un scénario de déclenchement déterminé (type et taille du glissement, profondeur de nappe).

La particularité d'utilisation de ce modèle ici est qu'il a été calibré et utilisé dans des milieux de montagne ou moyenne montagne, mais pas dans des milieux à faible énergie, comme la zone de cette étude.

6.2. METHODE, RESULTATS ET CONCLUSION

Plusieurs tests ont été réalisés sur la zone d'étude, en jouant sur la qualité du MNT d'une part, et la prise en compte ou non des formations superficielles dans le modèle géologique et des éléments cartographiés sur le terrain (arrivées d'eau notamment) d'autre part.

6.2.1. Préparation du modèle géologique

Un modèle simple a pu être réalisé ici (illustration 13) : le pendage quasiment nul (la stratification est presque horizontale) a permis d'associer une cote constante pour chaque interface entre les couches en place. Seul un ajustement à proximité des affleurements a été effectué à partir des limites de la carte géologique (modifiées suite à des observations de terrain).

Une épaisseur a été donnée par défaut (5 m) aux coulées de glissements observés. Cette épaisseur n'est évidemment pas constante en réalité, mais il est difficile de la connaître, et de plus il est complexe d'intégrer des épaisseurs variables. Cela constitue une des pistes de progrès à amener à ce type de modélisation.

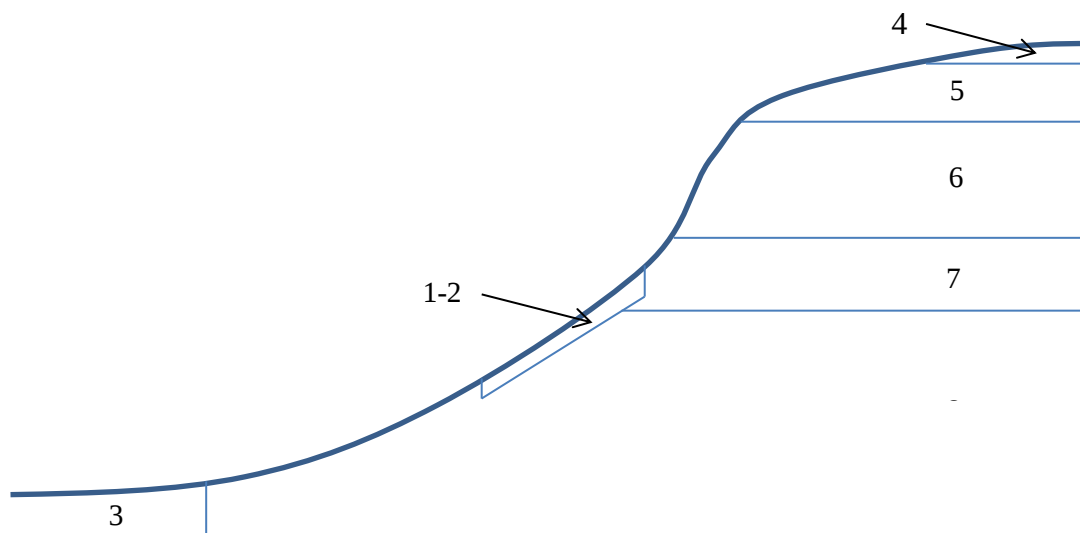


Illustration 13 : Coupe schématique du modèle géologique 3D utilisé pour la modélisation (les échelles verticale et horizontale ne sont pas respectées)

Les couches définies sont les suivantes :

- 1) glissements ;
- 2) colluvions limoneuses de pente ;
- 3) alluvions, dunes, sablons, sables vasards...
- 4) limons des plateaux ;
- 5) Argile à silex, argile de décalcification, gaize à cherts ;
- 6) Craie glauconieuse ;
- 7) Glauconie de base ;
- 8) Marnes de Villers, Callovien indifférencié.

6.2.2. Paramètres de modélisation

Des glissements circulaires ont été modélisés, ainsi que des glissements plans aux interfaces inférieures des glissements et des colluvions. Le type de glissement le plus défavorable a été conservé en chaque endroit.

3 tailles de glissements circulaires ont été utilisées : 20, 40 et 60 m (rayon du cercle de glissement en profondeur dans les terrains).

400 tirages ont été effectués pour chaque configuration, les valeurs aléatoires étant les paramètres géomécaniques (définis à partir de la bibliographie et à dire d'expert).

6.2.3. Modélisation réalisées

Plusieurs modélisations ont été réalisées afin d'appréhender l'impact de l'apport de différentes données dans le résultat final :

- MNT 25m, sans prise en compte de la cartographie historique des glissements,
- MNT 25m, avec prise en compte de la cartographie historique des glissements,
- MNT 5m, sans prise en compte de la cartographie historique des glissements,
- MNT 5m, avec prise en compte de la cartographie historique des glissements.

- **MNT 25m**

Le premier des tests prend en compte la pente et la lithologie issue de la carte géologique, soit les mêmes critères que la carte de prédisposition (illustration 14). Les résultats diffèrent pourtant de manière très significative. Les raisons sont à relier à la méthode de modélisation tout d'abord, ainsi qu'aux critères géotechniques introduits dans le modèle.

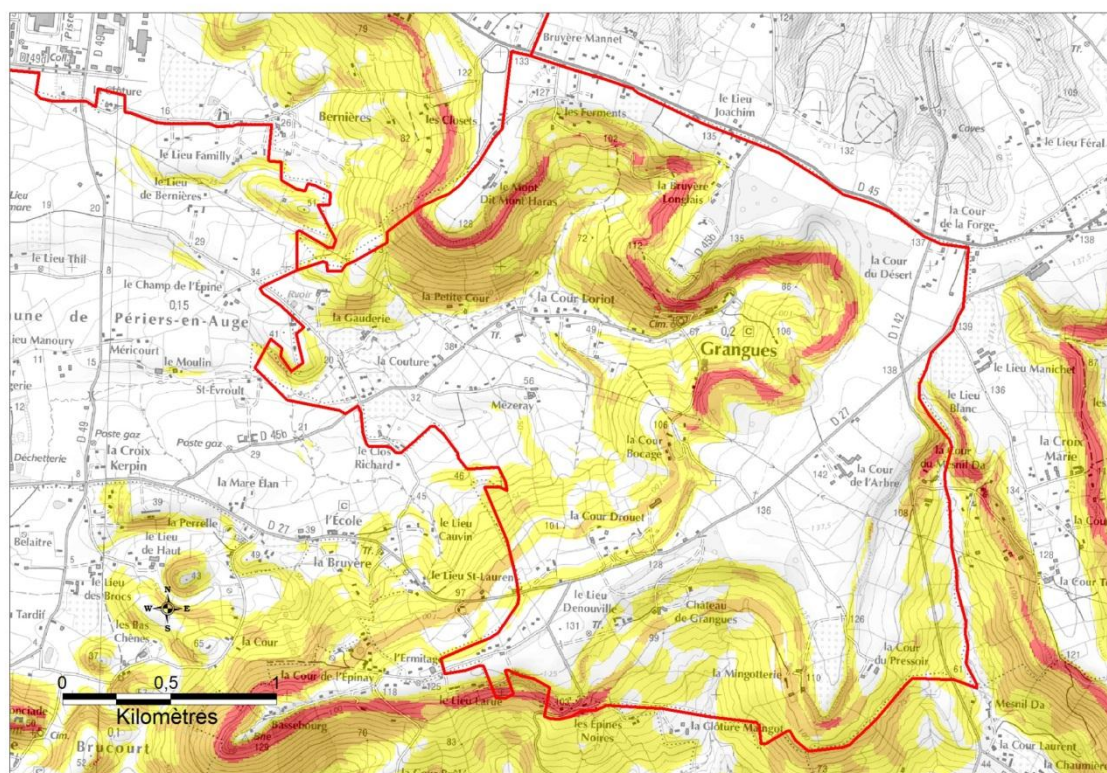
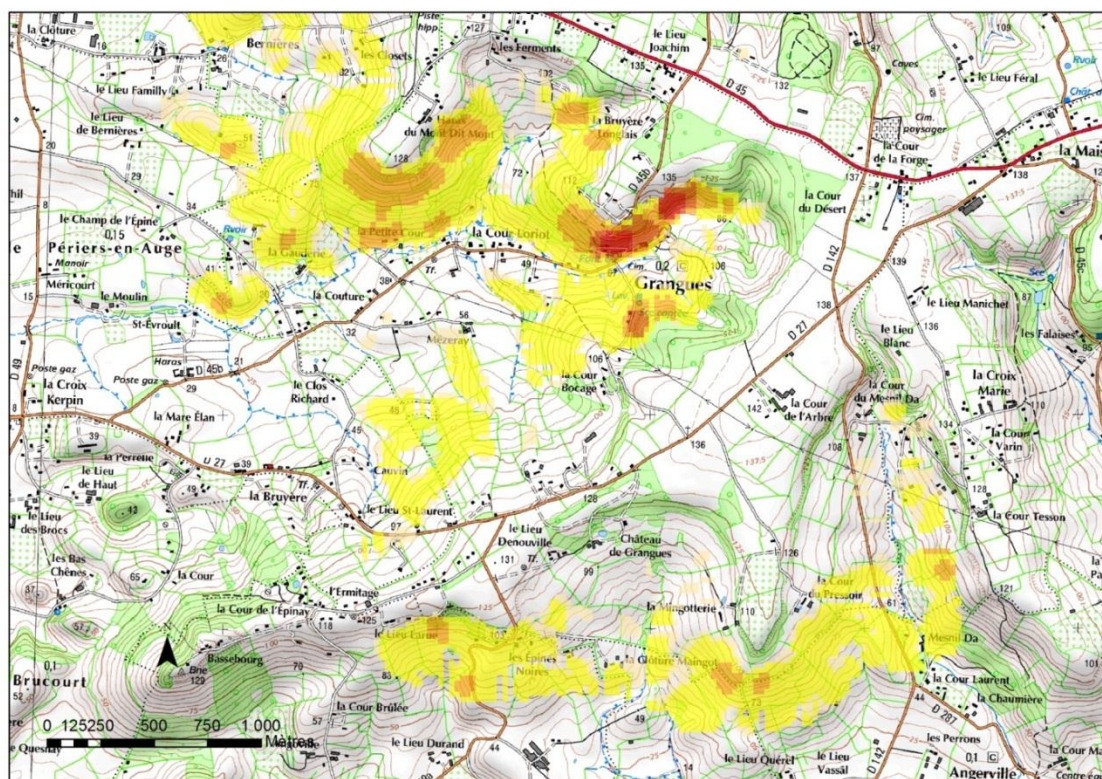


Illustration 14 : Exemple de modélisation : MNT 25 m ; non prise en compte des formations superficielles (au-dessus) ; comparaison avec la carte de prédisposition (au-dessous)

Le second test, introduisant la cartographie historique des glissements de terrain dans le modèle géologique se rapproche davantage de la cartographie de l'aléa, au moins dans la répartition spatiale de l'aléa.

Toutefois, dans les deux cas, la modélisation a tendance à sous-évaluer l'aléa, sauf dans le cas de fortes pentes (versant nord-ouest de Dives) où la modélisation surévalue l'aléa.

On constate, notamment à Grangues, dans les secteurs où la pente moyenne du versant est faible et lorsque le versant admet une forme sinueuse, que la modélisation s'éloigne de la carte d'aléa. C'est clairement dans ce cas la précision du MNT qui pose problème, mais aussi probablement la combinaison des facteurs eau et caractéristiques géotechniques.

- **MNT 5m**

Dans le cas de l'utilisation du MNT 5m (LIDAR dégradé), et sans pris en compte des formations superficielles (illustration 15), on constate plus de similitudes entre la carte de prédisposition et la modélisation.

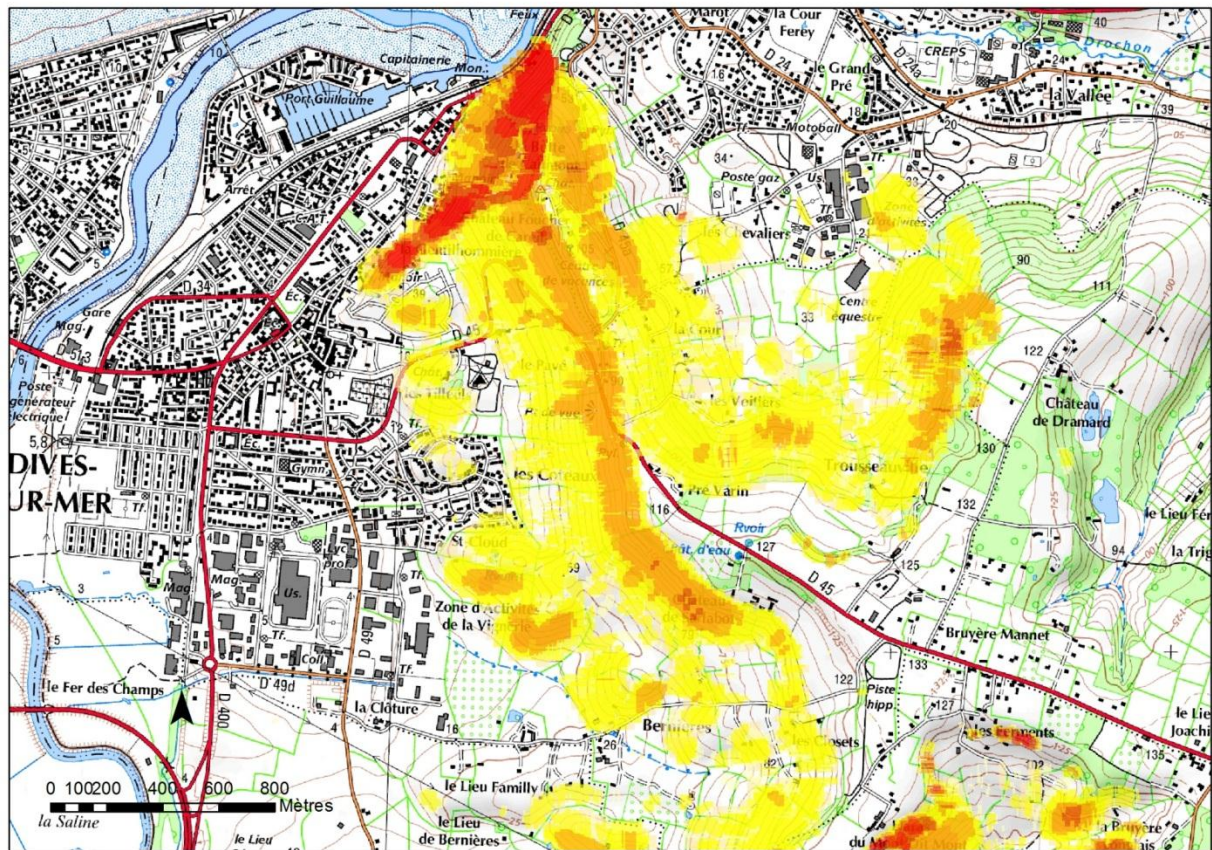


Illustration 15 : Exemple de modélisation : MNT 5 m ; non prise en compte des formations superficielles

La modélisation se rapproche toutefois davantage de la cartographie de l'aléa, notamment dans les zones à forte pente.

Avec la prise en compte des formations superficielles, la proximité avec la carte d'aléa est parfois très marquée. On constate néanmoins toujours une légère surévaluation dans les secteurs à forte pente, ainsi qu'une sous-évaluation assez marquée des zones cartographiées

en aléa moyen. Cela est probablement dû aux caractéristiques géotechniques attribuées aux formations géologiques dans le modèle, qui l'ont été d'après la bibliographie, et à dire d'expert, après observation des formations à l'affleurement sur le terrain.

6.2.4. Conclusions

Les tests de modélisation réalisés sont partiellement concluants.

Ils montrent bien l'intérêt de l'utilisation d'un MNT précis, ainsi que l'intérêt d'utiliser un modèle probabiliste à calcul complexe, puisqu'il permet selon des critères simples de se rapprocher de l'aléa issu de la cartographie par méthode conventionnelle.

La modélisation réalisée ne permet toutefois pas de parvenir à des résultats totalement satisfaisants et transposables dans le cas d'une cartographie réglementaire.

Plusieurs raisons peuvent être avancées pour expliquer cela :

- La première et la plus prégnante est l'absence de données fiables sur les caractéristiques géotechniques des formations rencontrées et notamment des formations superficielles. Cela pose de gros problèmes à partir du moment où la modélisation est basée sur un modèle géotechnique. Il apparaît donc nécessaire de pouvoir s'appuyer sur des données géotechniques fiables pour progresser dans une modélisation de ce type ;
- La prise en compte partielle de l'hydrologie et l'hydrogéologie locale. Dans le cadre de cette modélisation, le levier « niveau de nappe » a été utilisé pour prendre en compte la présence d'eau observée sur le terrain lors d'une période sèche. Cela reste toutefois très imprécis, et il semblerait intéressant de pouvoir coupler la modélisation avec un modèle hydrogéologique ;
- L'épaisseur des coulées de glissement. Elles ont été définies par défaut, la limite de la méthode de cartographie de terrain entraînant notamment un défaut d'information à ce sujet.

A l'issue de ces tentatives de modélisation, il apparaît donc nécessaire de réaliser des acquisitions de connaissances supplémentaires, notamment sur les caractéristiques géotechniques intrinsèques des formations concernées. Cela paraît particulièrement intéressant pour les coulées de glissement et la distribution spatiale (comprenant l'inconnue d'épaisseur) des formations qui la composent, qu'il conviendrait aussi d'étudier davantage.

7. Conclusion

La troisième tranche de l'étude, faisant l'objet de ce rapport a d'abord permis de valider la méthode de cartographie de terrain définie lors de la tranche précédente, en travaillant sur deux communes, Dives-sur-Mer et Grangues (14), avec un contexte géologique différent des communes précédemment étudiées.

Ces travaux confirment aussi que la carte de prédisposition est un excellent outil de prévention en première approche et à son échelle de validité, puisque la corrélation entre les zones prédisposées et les zones réellement soumises à un aléa est bonne, voire très bonne. Dans le détail, elle ne peut toutefois pas se substituer à une cartographie de l'aléa à fine échelle, car l'absence de prise en compte de plusieurs facteurs majeurs (eau, disposition et lithologie des formations superficielles notamment) ne permettent pas de qualifier correctement le niveau de prédisposition.

Ce rapport a aussi permis d'amorcer une réflexion sur une possible modélisation de l'aléa glissement de terrain, sur le modèle de la carte de prédisposition, mais en intégrant l'ensemble des facteurs à prendre en compte. Le modèle BRGM ALICE[®] a donc été utilisé. Cette modélisation, réalisée avec un MNT à maille fine, et après une campagne d'acquisition de données de terrain, a notamment permis ici de prendre en compte la cartographie historique des glissements de terrain, et donc par-là, les formations superficielles présentes sur le versant et susceptibles de générer des instabilités. Elle a aussi permis de prendre en compte les arrivées d'eaux constatées lors des levers de terrain.

Les résultats, bien qu'en progression par rapport à la carte de prédisposition, ne permettent toutefois pas encore de définir correctement l'aléa à une échelle de carte réglementaire. Plusieurs éléments semblent en effet manquer pour obtenir un modèle réaliste à fine échelle :

- Des données géotechniques fiables pour les formations plastiques considérées, notamment dans les coulées d'anciens glissements ;
- Dans une moindre mesure, un modèle hydrogéologique fiable à corréler au modèle géotechnique ;
- Dans une moindre mesure également, des informations précises sur l'épaisseur des coulées d'anciens glissements.

Les pistes de progression ne sont donc pas sur les méthodes de modélisation employées, qui semblent adaptées, mais davantage sur l'absence de données fiables à entrer dans le modèle. Aussi, il conviendrait de travailler sur les caractéristiques géotechniques des formations responsables de la mise en place des glissements de terrain, et notamment d'arriver à corréler des caractéristiques géotechniques aux formes observées sur le terrain. Cela permettrait de générer un modèle géologique précis à intégrer dans le modèle qui proposerait probablement ainsi des résultats beaucoup plus proches de la réalité.

En conclusion, cette étude met en évidence plusieurs points :

- Elle confirme ce que les résultats de la tranche précédente avaient commencé à indiquer, à savoir que la connaissance et la cartographie des formations de versant (essentiellement historique des glissements de terrain) est fondamentale dans l'identification de l'aléa glissement de terrain à fine échelle ;

- Que la carte de prédisposition « voit » les zones potentiellement à risque, mais ne permet pas d'être précise quant au niveau d'aléa glissement de terrain dans des zones à géologie complexe (comprendre alternance de roches aux propriétés différentes) ;
- Que la modélisation peut par endroits donner des résultats cohérents sous réserves de respecter deux conditions : posséder un MNT à maille fine (5 m minimum) et pouvoir insérer comme donnée d'entrée une cartographie fiable des formations de versant. Toutefois, deux données permettraient d'accroître grandement la représentativité de la modélisation :
 - o un couplage avec un modèle hydrogéologique simple, non testé ici ;
 - o l'acquisition de données géotechniques, notamment des différentes séquences de coulées d'anciens glissements, qui permettraient au modèle de s'approcher de la réalité des stabilités de versant.

8. Bibliographie

- Campy M. et Macaire J.J. (1989 ; reed. 2003) – Géologie de la surface. Ed. Dunod.
- Dewolf Y. et Bourrié G. (2008) – les formations superficielles. Genèse – Typologie – Classification – Paysages et environnements – Ressources et risques. Ellipses éditions. Paris. 896 p.
- DREAL de Basse-Normandie (2004) – Notice d'utilisation de la carte de prédisposition aux mouvements de terrain.
- Fressard M. (2013) – Morphodynamique des versants du Pays d'Auge continental : fonctionnement, héritages et risques associés (Normandie, France). Thèse de doctorat de l'université de Caen.
- Fressard M., Maquaire O. (2012) – Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans le pays d'Auge (Normandie). Groupe d'échange sur les risques mouvements de terrain en Basse-Normandie. DREAL Basse-Normandie, Caen.
- Juignet P., Lebert A. (1986) – Carte géologique de la France à 1/50 000 et sa notice, feuille de Mamers (n°288). Ed. BRGM.
- Maquaire O. (2002) – Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain) – Processus, fonctionnement, cartographie. Diplôme d'habilitation à diriger des recherches. IPGS.
- Maillard R., Pannet P., Zornette N. (2004) – PPR Côte d'Ile-de-France. Secteur « vallée de la Marne ». Connaissance des phénomènes historiques « mouvements de terrain ». Zone Centre-Est (16 communes). Rapport d'étape. BRGM/RP-53606-FR. 34 p., 15 ill., 7 ann.
- Marre A., Laurain M., Guérémy P. (1997) – Etude des relations spatiales et temporelles entre les formations superficielles et les mouvements de terrain sur la Côte d'Ile-de-France. Un moyen de préparer les cartes d'aléa. Géol. De la France, n°2, pp 39-49.
- Morgenstern N.R., Price V.E. (1967) – A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces. Computer journal, 9. pp. 388-393.
- Morgenstern N.R., Price V.E. (1965) – The analysis of stability of general slip surfaces. Geotechnique, 15. pp. 70-93.
- Olivier M., Monod B., Sedan O., (2012) – Projet DO-SMS : utilisation du logiciel ALICE® pour l'élaboration de carte d'aléa glissement de terrain. Rapport final. BRGM/RP-60249-FR, volume 1, 70 p., 50 fig., 5 ann.
- Pannet P., Meire B., Vincent C. (2013) – Analyse de la carte de prédisposition au risque mouvement de terrain réalisée par le DREAL Basse-Normandie. Tranche 2 : cartographie de l'aléa glissement de terrain à Cordebugle et Courtonne-les-deux-églises (14), Condeau et Pervenchères (61). Rapport final. BRGM/RP-62599-FR, 95 p., 17 ill., fig., 3 ann., 1 CD.

Pannet P. (2013) – Glissement de terrain à Bellou-sur-Huisne (61). Avis complémentaire du BRGM, Rapport BRGM/RP-62541-FR. 24 p., 6 ill., 7 ph..

Pannet P. (2012) – Commune de Bellou-sur-Huisne (61). Glissement de terrain à proximité d'une maison d'habitation, Rapport BRGM/RP-61727-FR. 31 p., 5 ill., 19 ph..

Pannet P., Thollon O., Lechat K., Schroetter JM., coll. Branellec M., Le Roy M. (2012) – Analyse critique de la carte de prédisposition aux risques mouvements de terrain réalisée par la DREAL de Basse-Normandie. Tranche 1 : cartographie de l'aléa chute de blocs à Cherbourg-Octeville, Saint-Lô et Vire. Rapport BRGM/RP-60464-FR. 152 p., 44 ill., 11 tabl., 3 ph., 4 ann.

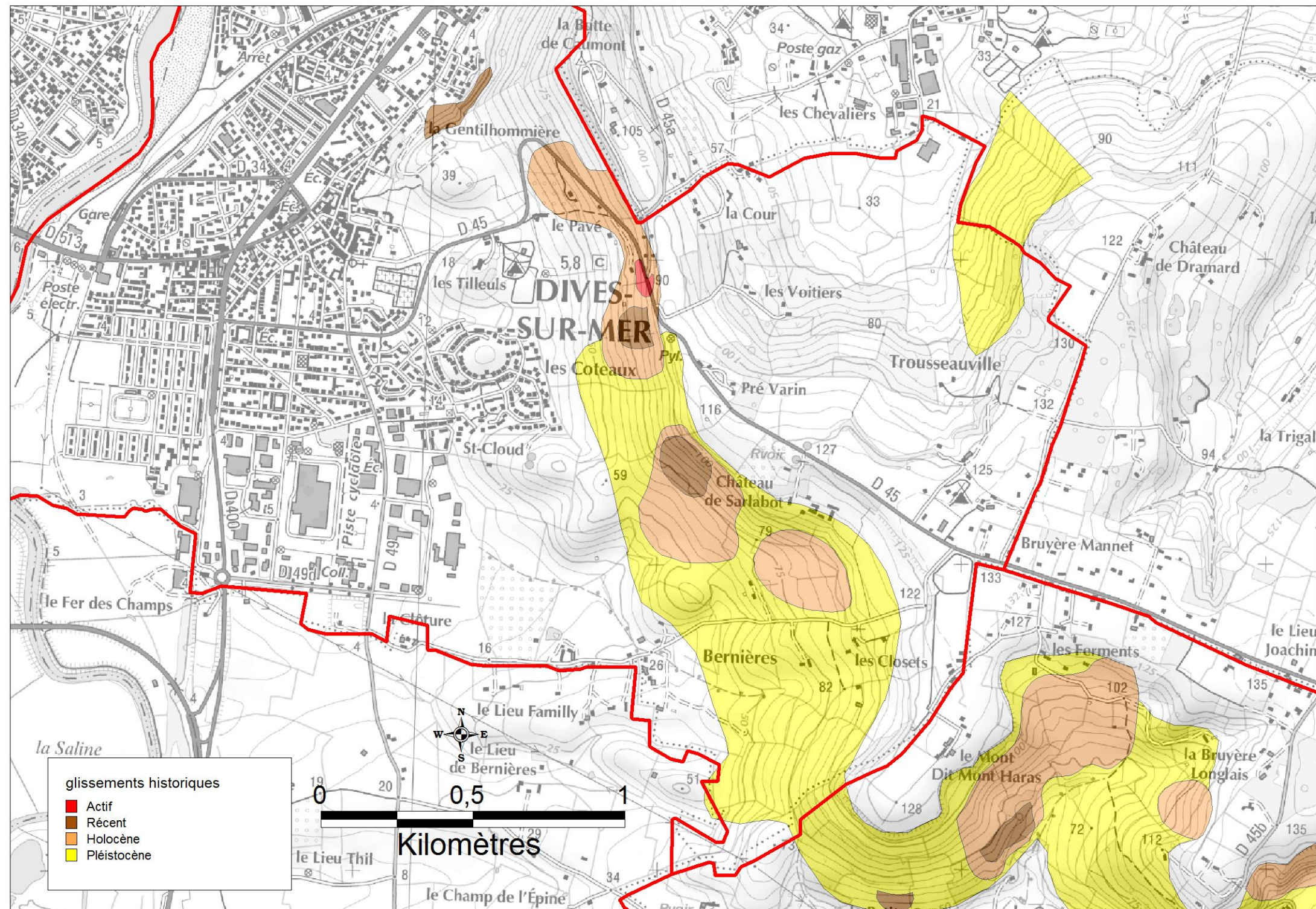
Riout M., Coutard J.P., Helluin M., et al. (1986) – Carte géologique de la France au 1/50 000^e et sa notice. Feuille n°120 (Caen). Ed. BRGM.

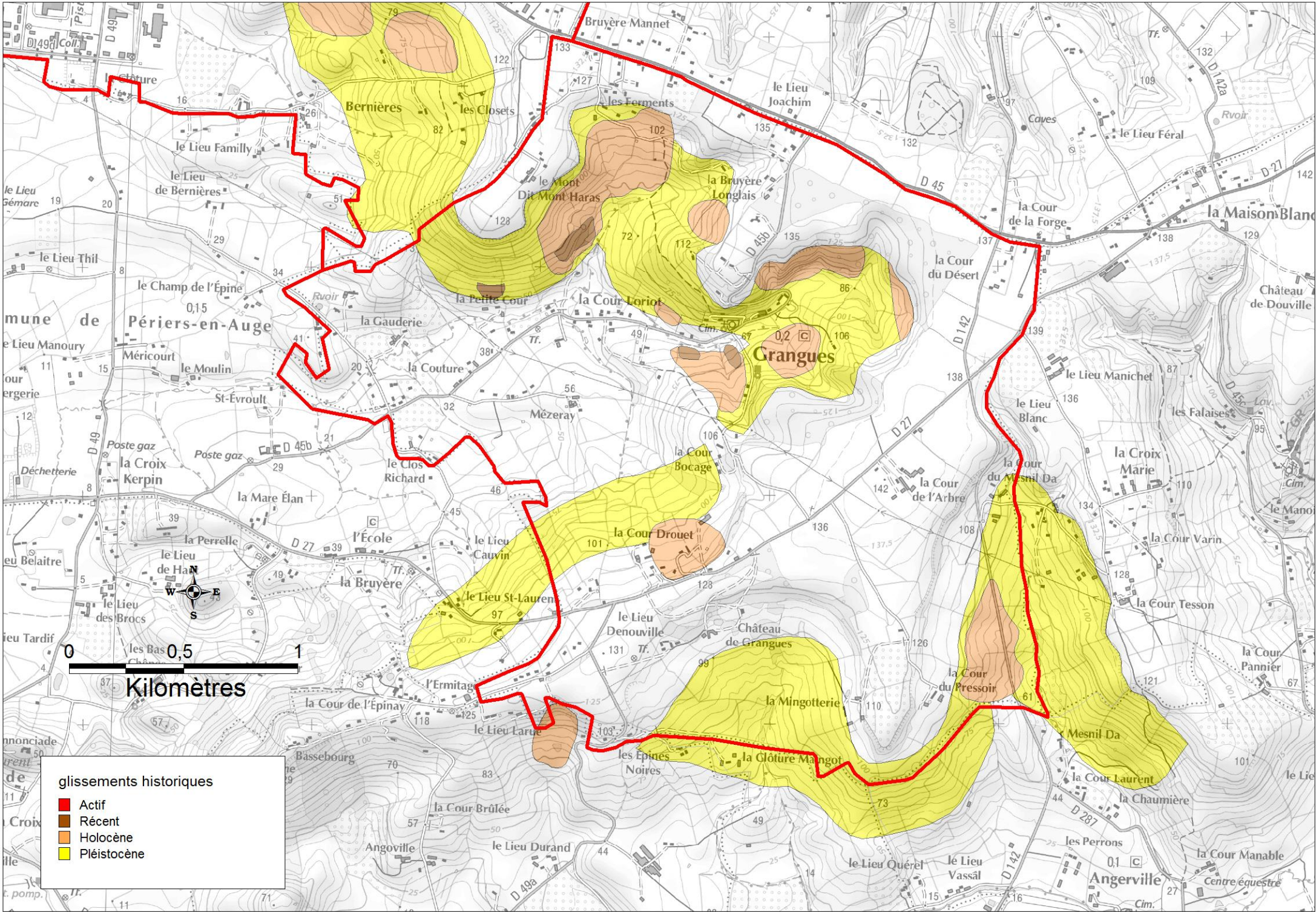
Rivet F. (coord) et al. (2011) – Classeur « Le risque mouvements de terrain en Provence-Alpes-Côte d'Azur ». Coédition BRGM, région et DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Zornette N. et Marre A., coll. Anquetin E, Maillard R., Pannet P. (2006) – Plan de prévention des risques naturels « mouvements de terrain ». Côte d'Ile-de-France – secteur vallée de la Marne portant sur 19 communes. Commande n°2 – année 2006-2007. Phase 2 – caractérisation de l'aléa. Rapport d'étape. BRGM/RP-55189-FR. 23 p., 9 ill., 2 ann.

Annexe 1

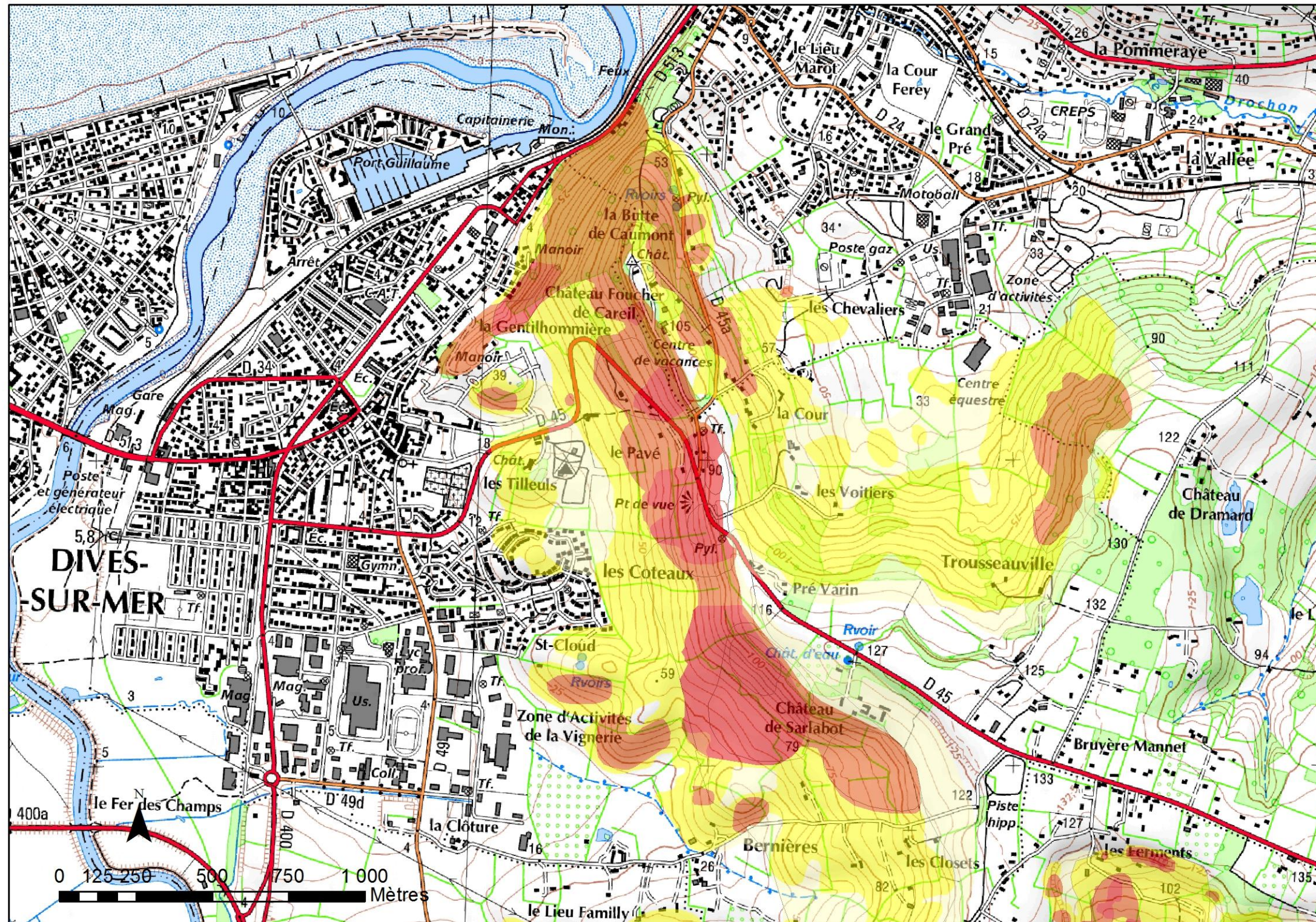
Cartographie historique des glissements de terrain sur le territoire de l'étude

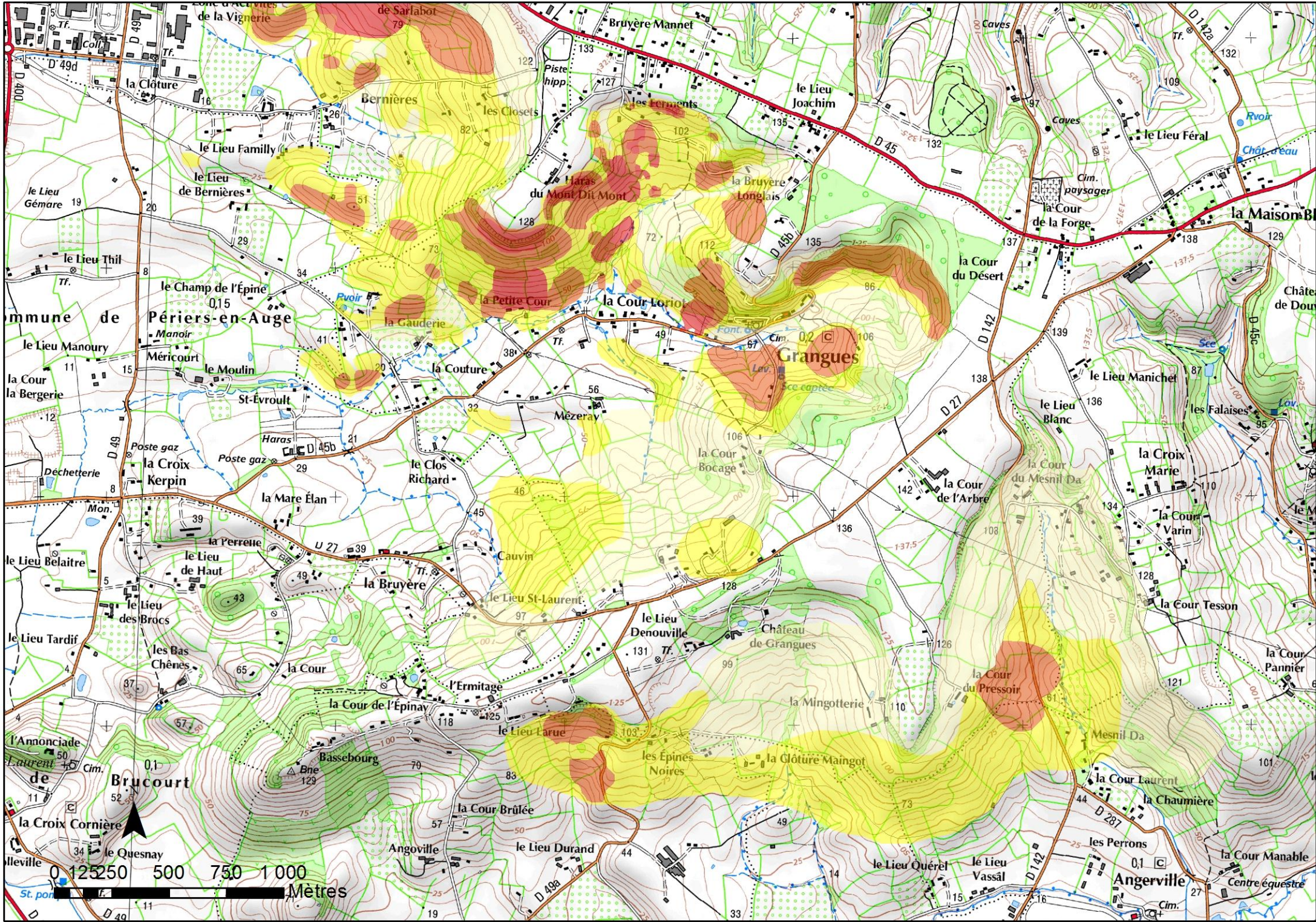




Annexe 2

Cartographie de l'aléa glissement de terrain sur le territoire de l'étude







Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Basse-Normandie

CITIS "Odyssée", Bât. C, 2ème étage
4, avenue de Cambridge

14 200 – Hérouville-Saint-Clair – France

Tél. : 02 31 06 66 40