



Carte régionale de l'aléa effondrement/glissement lié à la présence de terrains gypseux triasiques en région Provence-Alpes- Côte d'Azur

Rapport final

BRGM/RP-60896-FR

Juillet 2012

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2011RISE18

F. Rivet et A. Girard

Avec la collaboration de

C. Mathon

Vérificateur :

Nom : G. Grandjean

Date : 26 juillet 2012

Signature :

Approbateur :

Nom : N. Frissant

Date : 31 juillet 2012

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : gypse, effondrement, glissement de terrain, Trias supérieur, Provence-Alpes-Côte d'Azur

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

Rivet F., Girard A. avec la collaboration de Mathon C. (2012). Amélioration de la connaissance sur les risques d'effondrement/glissement liés à la présence de terrains gypseux triasiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Rapport final BRGM/RP-60896-FR – 106 pages, 43 Ill., 3 ann.

Synthèse

Le BRGM a réalisé dans le cadre d'un partenariat avec le Conseil Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur et la DREAL une étude régionale sur le risque de mouvements de terrain lié à la présence de gypse triasique d'origine naturelle dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Le BRGM est intervenu dans le cadre de la convention cadre pluriannuelle 2010-2013 Conseil Régional/BRGM, ainsi que dans le cadre de la convention de recherche et développement à coûts partagés n°2010-003 signée par la DREAL et le BRGM le 19 octobre 2010.

Une synthèse bibliographique sur le contexte général des formations gypseuses portant sur les caractéristiques des formations gypseuses triasiques et des mouvements de terrain associés a été réalisée.

A partir de cette synthèse, une méthodologie de cartographie de l'aléa lié à la présence de formations gypseuses a été élaborée. Elle se base sur une approche croisant plusieurs facteurs favorables à l'apparition de mouvements de terrain dans les formations gypseuses tels que la présence avérée de gypse, la capacité du gypse à se dissoudre, le rôle des précipitations et de l'infiltration des eaux de surface dans l'accélération des phénomènes, ainsi que l'effet de la sollicitation sismique induite par l'activité sismique des failles actives. Deux cartes régionales de susceptibilité aux effondrements et aux glissements de terrain liés à la présence de gypse ont ainsi été élaborées.

Ces cartes ont ensuite été croisées avec les zones d'enjeux que sont les surfaces communales urbanisées, afin de délimiter les territoires à enjeux particulièrement soumis aux phénomènes. Plusieurs entités sont apparues : aire dracénoise, avec trois communes présentant plus de la moitié de leur surface urbanisée en susceptibilité moyenne : Bargemon, Claviers et Lorgues, et la commune de Flayosc concernée par une susceptibilité forte sur plus de 10% de la surface urbanisée communale ; la vallée de l'Estéron dans les Alpes-Maritimes avec la commune de Bonson couverte sur près de 52% par une susceptibilité moyenne, le secteur de Grasse avec notamment les communes de Grasse, Châteauneuf-de-Grasse et Mougins fortement concernées par l'aléa ; le centre Var : communes de Barjols, Carcès, Cotignac, Méounes-les-Montrieux, La Celle exposées à une susceptibilité moyenne, les vallées de la Vésubie et de la Roya, où les communes de La Bollène-Vésubie et Sospel apparaissent particulièrement exposées.

La dernière partie de l'étude a consisté à élaborer des modèles de fiches techniques d'aide à la gestion du risque de mouvements de terrain lié à la présence du gypse. Ces fiches à destination des communes ont été présentées et discutées avec les services techniques de deux communes pilotes : Grasse (département des Alpes-Maritimes) et Brignoles (département du Var).

Sommaire

1. Introduction.....	9
2. Contexte général sur les terrains gypseux triasiques et les effondrements/glissements qu'ils peuvent engendrer.....	11
2.1. PROPRIETES/CARACTERISTIQUES DES TERRAINS GYPSEUX	11
2.1.1. Propriétés du gypse	11
2.1.2. Rôle du gypse dans les régimes tectoniques.....	12
2.2. MOUVEMENTS DE TERRAIN LIES A LA PRESENCE DE GYPSE.....	13
2.2.1. Effondrements de karsts liés à la dissolution du gypse	13
2.2.2. Glissements de terrain associés à des formations gypseuses.....	21
3. Méthodologie et choix des critères pour l'évaluation de l'aléa d'effondrement / glissement lié au gypse triasique.....	27
3.1. METHODE D'EVALUATION DE L'ALEA EFFONDREMENT DE CAVITES FORMEES PAR LA DISSOLUTION DU GYPSE TRIASIQUE	27
3.1.1. Susceptibilité de présence de gypse	27
3.1.2. Susceptibilité de présence de cavités liées à la dissolution de gypse.....	28
3.1.3. Capacité des cavités de dissolution à s'effondrer	29
3.1.4. Facteurs aggravants	30
3.1.5. Rétro-analyse.....	31
3.1.6. Diagramme résumé	31
3.2. METHODOLOGIE SUIVIE POUR ESTIMER L'ALEA GLISSEMENT LIE AUX FORMATIONS GYPSEUSES TRIASIQUES.....	32
3.2.1. Facteurs permanents.....	33
3.2.2. Facteurs aggravants	33
3.2.3. Diagramme résumé	34
4. Evaluation de l'aléa effondrement lié à la présence de cavités formées par dissolution de gypse triasique à l'échelle régionale	35
4.1. PROBABILITE DE PRESENCE DE GYPSE.....	35
4.2. CAPACITE DE DISSOLUTION DU GYPSE.....	37
4.3. FACTEURS AGGRAVANTS	40
4.3.1. Précipitations.....	40
4.3.2. Activité sismique	41

4.4. SUSCEPTIBILITE A L'EFFONDREMENT AU NIVEAU REGIONAL.....	42
5. Evaluation de l'aléa glissement de terrain dans des formations gypseuses du Trias à l'échelle régionale	47
5.1. FACTEURS PERMANENTS ET AGGRAVANTS	47
5.2. SUSCEPTIBILITE REGIONALE AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN.....	48
6. Interprétation.....	53
6.1. CROISEMENT DES ZONES DE SUSCEPTIBILITE AVEC LES INTERCOMMUNALITES	53
6.2. CROISEMENT DES ZONES SENSIBLES AVEC LES COMMUNES.....	57
7. Rédaction de fiches techniques.....	59
8. Conclusion.....	61
9. Bibliographie	63

Liste des illustrations

Illustration 1: Différents modes de genèse des diapirs évaporitiques (d'après Pothérat, 1997).....	13
Illustration 2 : Dépression d'une vingtaine de mètres de diamètre due à l'effondrement du toit d'une cavité souterraine, observation à Chateaudouble (Var) – source BRGM	14
Illustration 3 : Fontis de 10 m de diamètre et 6-7 m de profondeur apparu sur la commune de Saint-Zacharie (Var) en 2010 (source BRGM)	15
Illustration 4: 1a= Fontis à cratère pseudo-circulaire : éboulement regard sur un cours souterrain, par effondrement d'une voûte, 1b= Entonnoir affectant les formations superficielles par désobstruction d'un puits (Nicod, 1985).	15
Illustration 5 : Entonnoirs de dissolution dans le gypse, sur le versant savoyard du col du Galibier	17
Illustration 6: Manifestations des formes karstiques du Trias gypseux dans les plateaux varois (Nicod, 1967).....	18
Illustration 7: Exemple d'effondrement du à une cavité de Gypse, le trou de l'Infernet près de Châteauvert dans le Var (source : http://www.flickr.com/ , photo S. Robert).	19

Illustration 8: Doline lac du Grand Loucien dans le Centre-Var (source : www.plus.randomania.fr).....	19
Illustration 9: Effondrement de Peyrui, Bargemon (BRGM).....	20
Illustration 10: Schéma présentant une hypothèse d'évolution polyphasée de cavités de dissolution dans le gypse du Trias de Provence, région de Bargemon, Var (d'après Pothérat, 1997).....	21
Illustration 11 : Glissement de Roquebilière, 1926.	22
Illustration 12 : Glissement principal du Duech. La cicatrice d'arrachement se dessine bien même au milieu des arbres. Son pied est limité par la piste Gaudissard (Fiolet, 2000).	24
Illustration 13 : Alignement des grandes discontinuités structurales suivant une direction SSW-NNE (source Geoazur)	25
Illustration 14 : CoupeNW-SE à travers le versant de la Marbrière (source Geoazur)	25
Illustration 15 : Critères de présence du gypse	28
Illustration 16 : Critères caractérisant le potentiel de dissolution des formations gypseuses triasiques	29
Illustration 17 : Critères caractérisant les instabilités liées à la présence de gypse triasique dans les formations géologiques	29
Illustration 18 : Facteurs aggravant la formation des effondrements.....	31
Illustration 19 : Démarche suivie pour évaluer l'aléa effondrement.....	32
Illustration 20 : Démarche suivie pour évaluer l'aléa glissement	34
Illustration 21 : Répartition des formations triasiques contenant du gypse	36
Illustration 22 : Synthèse hydrogéologique sur la région PACA (BRGM, 2011)	38
Illustration 23 : Carte de l'IDPR et regroupement en classes	39
Illustration 24 : Carte de densité de fracturation (exploitation des cartes géologiques au 1/50 000 ^e)	39
Illustration 25 : Définition de classes de hauteur d'eau (mm)	40
Illustration 26: Carte des précipitations annuelles en mm, moyennées sur 30 ans (d'après les données AURELHY 1971-2000 de Météo France).....	41
Illustration 27: Extrait du zonage sismique national sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et localisation des séismes issus du catalogue du RÉNASS de 2004 à 2009	42
Illustration 28 : Scores attribués à chaque critère permettant d'évaluer la susceptibilité régionale à l'effondrement dans les terrains triasiques gypseux.	43
Illustration 29 : Susceptibilité régionale aux effondrements liés aux cavités formées par dissolution du gypse triasique, scores arbitraires	44
Illustration 30 : Définition des niveaux de susceptibilité aux effondrements liés aux cavités formées par dissolution de gypse	44
Illustration 31 : Carte régionale de la susceptibilité des formations aux effondrements liés à la présence de cavités formées par dissolution du gypse triasique	45

Illustration 32 : Surfaces départementales concernées par des formations sensibles aux effondrements liés à la présence de gypse triasique	46
Illustration 33 : Sensibilité au glissement de terrain des formations gypseuses du Trias en fonction des classes de pentes par zone	47
Illustration 34 : Pentes limites au-delà desquelles les glissements dans les terrains gypseux triasiques sont possibles	48
Illustration 35 : Scores attribués à chaque critère permettant d'évaluer la susceptibilité régionale au glissement dans les terrains triasiques gypseux	49
Illustration 36 : Susceptibilité aux glissements de terrain liés aux formations triasiques gypseuses, scores arbitraires	50
Illustration 37 : Définition des niveaux de susceptibilité vis-à-vis des glissements de terrain liés à la présence de gypse triasique	50
Illustration 38 : Carte régionale de la susceptibilité des formations aux glissements de terrain liés à la présence de gypse triasique	51
Illustration 39 : Surfaces départementales concernées par des formations sensibles aux glissements liés à la présence de gypse triasique	52
Illustration 40 : Pourcentage de surface intercommunale exposée à l'aléa effondrement lié au gypse triasique	54
Illustration 41 : Pourcentage de surface intercommunale urbanisée exposée à l'aléa effondrement lié au gypse triasique	55
Illustration 42 : Pourcentage de surface intercommunale urbanisée exposée à l'aléa glissement lié au gypse triasique	56
Illustration 43 : Exposition des communes vis-à-vis de l'aléa effondrement lié à la présence de gypse	57

Liste des annexes

Annexe 1 - Définition de l'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR)	67
Annexe 2 - Analyse du risque effondrement/glissement lié à la présence de gypse sur les communes	71
Annexe 3 - Fiches techniques sur deux communes pilotes :	91

1. Introduction

Le gypse et les formations qui lui sont généralement associées, dans le Trias de la région PACA, sont des matériaux qui présentent des propriétés particulières : roches tendres et facilement érodibles par l'eau, haut degré de solubilité, mobiles car peu denses avec un seuil de plasticité très bas leur donnant de fortes aptitudes à migrer verticalement ou latéralement. Une forte instabilité caractérise ces affleurements d'évaporites, les formations superficielles sus-jacentes étant en outre souvent impliquées dans les mouvements de terrain. Localisés de manière parfois insolite vu la variété des modes de genèse, les terrains gypseux avec ses roches associées, doivent faire l'objet d'une attention particulière car les instabilités qu'ils génèrent sont des menaces permanentes pour la sécurité des personnes et des biens : l'aléa est sournois car généralement caché, et brutal lorsqu'il s'agit de mouvements de terrain verticaux (effondrements, fontis). Au-delà de la connaissance nécessaire des contextes géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques, l'aménagement des secteurs concernés requiert des investigations géophysiques et géotechniques préalables.

Afin de mieux prévenir le risque, cette étude a pour objectif d'améliorer la connaissance régionale sur les mouvements de terrain associés à la présence de gypse, en proposant tout d'abord une typologie des différents phénomènes que l'on peut rencontrer sur le territoire régional. A partir de cette typologie, des critères d'apparition des mouvements de terrain sont identifiés et caractérisés sur le territoire. Ces critères sont ensuite analysés et traités pour réaliser des cartes régionales de susceptibilité d'apparition des phénomènes glissements/effondrements (à l'échelle du 1/50 000). Enfin, une pré-analyse de risque est proposée en croisant les données régionales sur les enjeux (département, intercommunalités, communes) avec les zones susceptibles d'être affectées par des mouvements de terrain liés à la présence de gypse. A l'issue de ces croisements, les territoires concernés par le risque sont identifiés, et des propositions de fiches d'aide à la gestion du risque destinées aux collectivités sont rédigées sur deux communes sélectionnées.

L'étude est limitée aux terrains gypseux triasiques. Le cas des cavités souterraines liées aux anciennes exploitations (carrière de gypse) n'est pas traité dans ce cadre car la localisation des galeries et chambres d'exploitation est en principe connue et généralement prise en compte dans les documents d'urbanisme.

2. Contexte général sur les terrains gypseux triasiques et les effondrements/glisements qu'ils peuvent engendrer

Dans le cadre de l'étude, il a été considéré que les propriétés du gypse du Trias de Provence-Alpes-Côte d'Azur ne diffèrent pas de celles du gypse « en général » : érodibilité, haut degré de solubilité, aptitude au glissement. Une forte instabilité, se traduisant par de fréquentes perturbations voire quelques sinistres de grandes ampleurs, est attribuée à ces évaporites, instabilité qui peut être le déclencheur de glissements dans les formations superficielles (Nicod, 1990).

2.1. PROPRIETES/CARACTERISTIQUES DES TERRAINS GYPSEUX

2.1.1. Propriétés du gypse

Formé par évaporation dans des milieux lagunaires, le gypse est un sulfate de calcium hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), exploité notamment pour la fabrication du plâtre. Le gypse est une évaporite (ou roche saline), c'est-à-dire constituée par des minéraux résultant de phénomènes évaporatoires. On parle souvent de roche évaporitique.

Dans le sud-est de la France, les périodes géologiques qui ont favorisé son dépôt sont principalement le Trias (Secondaire) et l'Oligocène (Tertiaire) (LCPC, 2002).

Faible densité

Le gypse est une roche tendre (dureté de 2 sur l'échelle de Mohs), rayable à l'ongle (trace blanche), de faible densité : 2,3.

La faible densité du gypse et plus encore du sel (2,1), ainsi que leur seuil de plasticité très bas (quelques kg/cm^2 pour le sel), confèrent à ces évaporites de fortes aptitudes à migrer verticalement ou latéralement. Sous l'effet d'un gradient géothermique (comme c'est le cas lors des phases tectoniques régionales majeures : provençale et alpine) et du poids des terrains de recouvrement, les évaporites ont tendance à fluer vers la surface, donnant naissance à des phénomènes tectoniques particuliers : dômes de sel, plis, diapirs, décollements, « couche savon » des chevauchements et charriage. Le Trias gypseux s'injecte également dans les discontinuités majeures et les grandes cassures. On parle alors de tectonique salifère (Pomerol & al., 2000). Le gypse est considéré comme une roche « mobile ».

Forte solubilité

Le gypse est une roche soluble. Suivant les conditions de circulation hydrique, le gypse est capable de se dissoudre assez rapidement et d'amener ainsi à la formation de karsts susceptibles de s'effondrer en impactant la surface s'ils en sont proches.

2.1.2. Rôle du gypse dans les régimes tectoniques

Dans les Alpes-Maritimes comme en Provence, le Trias supérieur gypseux représente un niveau de décollement entre les ensembles rocheux mis en mouvement sous l'effet des contraintes tectoniques. La périphérie des massifs paléozoïques (Mercantour, Dôme de Barrot) voit sa morphogenèse étroitement commandée par l'affleurement de ces terrains gypseux. On retrouve le Trias gypseux le long des grands décrochements qui compartimentent la couverture et guident les principales artères hydrographiques : failles de Daluis, de Lantosque, de Breil-sur-Roya, de Levens. Le Trias supérieur perce également le cœur d'anticlinaux serrés ou coffrés (Mont Gourdan, au Sud de Puget-Théniers). Moins disloqué, il affleure dans les boutonnières de Grasse et du Bar-sur-Loup. Dans les zones internes, des lames gypseuses s'intercalent également dans les écailles et les nappes du Briançonnais et des divers flyschs : Col de Larche, Mont-Oserot - Tête de Moïse (Julian et Nicod, 1990).

Des perturbations de plus grande ampleur, vraisemblablement quaternaires, s'expliquent par les propriétés migratrices du gypse qui est soit accumulé par bourrage dans les structures favorables (plis anticlinaux, failles), soit chassé de sa formation d'origine, qui ne comporte alors plus que des marnes, des dolomies et des cargneules «par un véritable effet de filtre-presse» (Julian et Nicod, 1990).

Le gypse peut également se présenter sous la forme de dômes évaporitiques résultant de la montée de diapirs (plis à noyau perçant de sel) dans les couches supérieures plus denses. Les modes de genèse des diapirs évaporitiques dépendent étroitement du régime tectonique (Quémart, 1998). Ils sont décrits dans l'illustration 1.

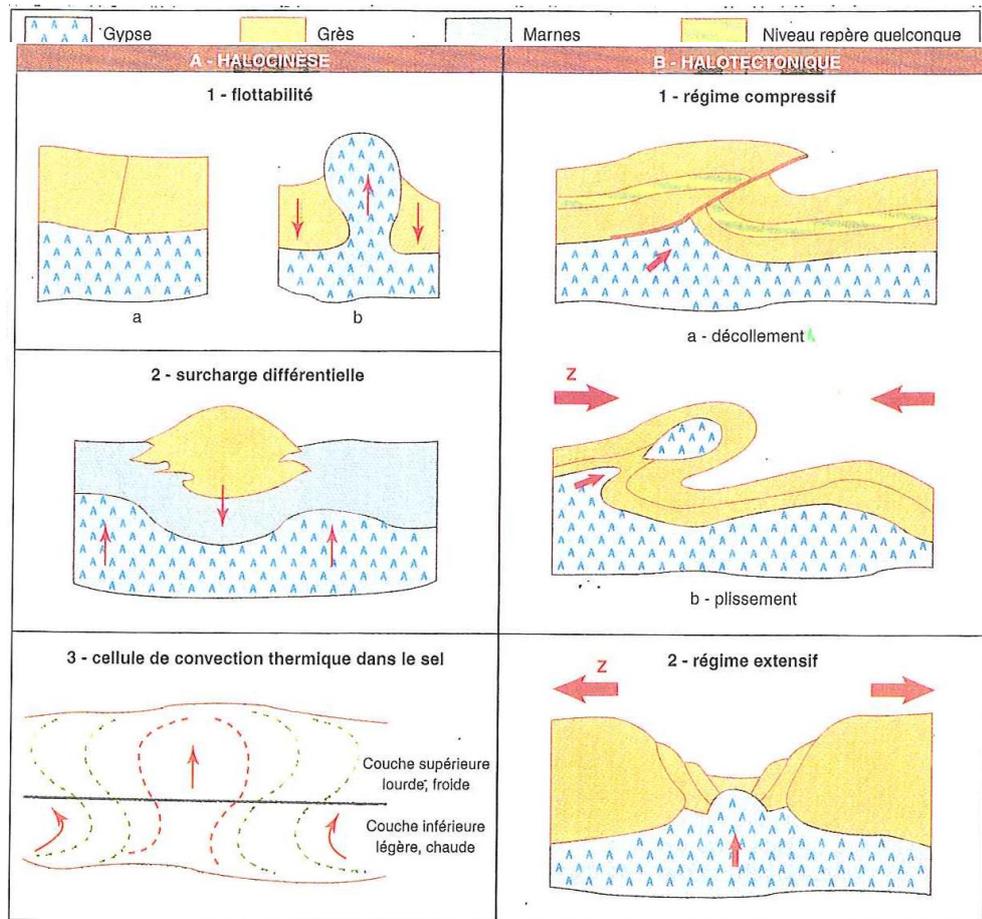


Illustration 1: Différents modes de genèse des diapirs évaporitiques (d'après Pothérat, 1997)

2.2. MOUVEMENTS DE TERRAIN LIES A LA PRESENCE DE GYPSE

De par sa forte capacité à se dissoudre, le gypse présent dans certaines formations géologiques du Trias entraîne des instabilités qui peuvent se traduire par des effondrements ou des glissements au niveau des versants.

2.2.1. Effondrements de karsts liés à la dissolution du gypse

La présence de karsts (vides souterrains) dus à la dissolution des évaporites peut engendrer des effondrements impactant la surface pour peu que les voûtes des cavités soient à faible profondeur. Les affleurements triasiques sujets à ces phénomènes sont le lieu de formation de dépressions fermées très évolutives. Les dimensions et les formes de ces dépressions vont de l'entonnoir élémentaire à des cuvettes de longueur pluri-hectométrique, profondes de plusieurs dizaines de mètres, notamment dans les cargneules (Illustration 2). A cela il faut ajouter le développement de cavités souterraines, pouvant former des réseaux très étendus (Julian et Nicod, 1990).



Illustration 2 : Dépression d'une vingtaine de mètres de diamètre due à l'effondrement du toit d'une cavité souterraine, observation à Chateaudouble (Var) – source BRGM

Les différents types d'évènements effondrements

- **Le fontis**

Le fontis est un effondrement localisé qui affecte brutalement la surface en créant un entonnoir ou un cratère pseudo-circulaire, dont le diamètre et la profondeur peuvent varier de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres (diamètre inférieur à 50 m, occasionnellement 100 m) selon la géométrie des cavités, la nature, l'épaisseur et le foisonnement des terrains de recouvrement, et du caractère aquifère ou non de ces terrains (Illustration 3).



Illustration 3 : Fontis de 10 m de diamètre et 6-7 m de profondeur apparu sur la commune de Saint-Zacharie (Var) en 2010 (source BRGM)

Dans le cas des karsts de gypse, les fontis s'appellent entonnoirs de dissolution ou d'effondrement dès lors que les formations superficielles sont meubles (Illustration 4).

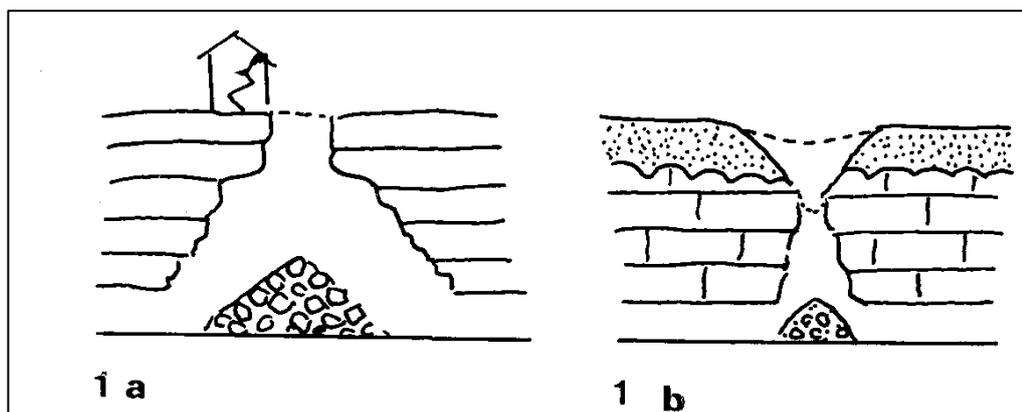


Illustration 4: 1a= Fontis à cratère pseudo-circulaire : éboulement regard sur un cours souterrain, par effondrement d'une voûte, 1b= Entonnoir affectant les formations superficielles par désobstruction d'un puits (Nicod, 1985).

Dans la littérature, certains auteurs, parlent de « dolines d'effondrement » plutôt que d'entonnoirs de dissolution. Néanmoins, le terme « doline » s'applique généralement au domaine karstique calcaire.

- **Affaissement**

Les affaissements, sont des dépressions topographiques en forme de cuvette plus ou moins profonde due au fléchissement lent et progressif des terrains de couverture, avec ou sans fractures ouvertes, consécutifs à l'évolution d'une cavité souterraine. Il n'y a pas de rupture en surface. Des efforts de flexion, de traction et de cisaillement, et des tassements différentiels peuvent se manifester dans les zones de bordure. Dans certains cas, les affaissements peuvent être le signe annonciateur de fontis.

Dans le cas des cavités naturelles, ce phénomène s'observe surtout en milieu karstique calcaire ; les affaissements s'appellent alors « dolines ». Cependant il existe des affaissements dus à des karsts de gypse comme par exemple les dolines-lac des plateaux varois (voir Illustration 8).

Les types de cavités naturelles issues de la dissolution du gypse en région Provence-Alpes-Côte d'Azur

Dans le sud-est, on ne trouve que des cavités de dimension relativement modeste, d'exploration difficile. Dans de tels cas, la dissolution est en relation étroite avec l'alimentation hydrique. Ainsi, dans les régions très humides, par exemple comme les Alpes, on voit la multiplication d'affaissements en forme d'entonnoirs dans les gypses.

- **Les karsts du gypse dans les montagnes alpines**

Dans les régions alpines, les évaporites ont participé activement à la grande complexité tectonique de la région, formant la semelle de plusieurs nappes. De ce fait les zones gypseuses sont en position très variées, souvent réduites à des pincées exiguës ; les karsts du gypse les plus développés ne couvrent que quelques kilomètres.

Bien que les affleurements de gypse se situent dans des environnements géomorphologiques variés, les karsts à entonnoirs multiples ne sont présents dans la zone alpine qu'à haute altitude (Nicod, 1976).

Les entonnoirs sont ouverts en puits sur des écoulements souterrains, mais le plus fréquemment la présence de formations superficielles induit le colmatage du fond (vallon de Salze Morène, Haute-Tinée). Des laquets temporaires peuvent se développer en cas d'imperméabilisation, et même des dolines-lacs, comme celles des bassins varois, dont l'alimentation est assurée par la nappe phréatique (Nicod, 1967).

La forme à la fois la plus banale et la plus spectaculaire est la bande d'affleurement des gypses crevée de nombreux entonnoirs. Comme la pincée de gypse affleurant au col du Galibier, au nord de Briançon (Illustration 5), qui présente, au-dessus du tunnel, une suite d'entonnoirs (Nicod 1968). Des karsts analogues s'observent dans le Briançonnais et dans le Queyras.



Illustration 5 : Entonniers de dissolution dans le gypse, sur le versant savoyard du col du Galibier

A moyenne et basse altitude, dans les étages forestiers la présence de gypse ne se traduit que par des effondrements épisodiques et dispersés, mais parfois de très grande taille (région de Beuil et de Valberg dans les Alpes-Maritimes). Quant aux grottes elles sont rarement spacieuses en raison de l'instabilité des parois et des voûtes liée à la tectonisation poussée et l'active dissolution (Nicod, 1976).

Dans la région alpine, les conditions hydriques et la topographie sont telles que la dissolution de gypse est relativement rapide.

- **Les phénomènes karstiques du gypse en Provence**

Tout aussi variés que les karsts alpins, en région méditerranéenne les karsts sont généralement plus étendus. Les conditions bioclimatiques, en particulier l'aridité de l'été, permettent de rencontrer des karsts pratiquement nus à basse altitude. Certains ont subi une évolution très longue, comparable à celle des karsts des calcaires voisins (Nicod, 1976).

Les évaporites sont présentes dans deux étages du Trias provençal ; le Keuper comportant des lentilles de gypse localement exploitées (plâtrières de la vallée de la Nartuby sous Châteaudouble) et l'Anhydritgruppe (Muschelkalk inférieur) où le gypse (issu de l'halite) est associé à des dolomies et des cargneules. L'ensemble a été intimement plissé lors de la phase provençale fini-Eocène en servant de semelle au déplacement des grandes unités calcaires mésozoïques (Nicod, 1967).

Les phénomènes karstiques récents et actifs sont nombreux mais dispersés. Plusieurs types sont identifiés (Illustration 6).

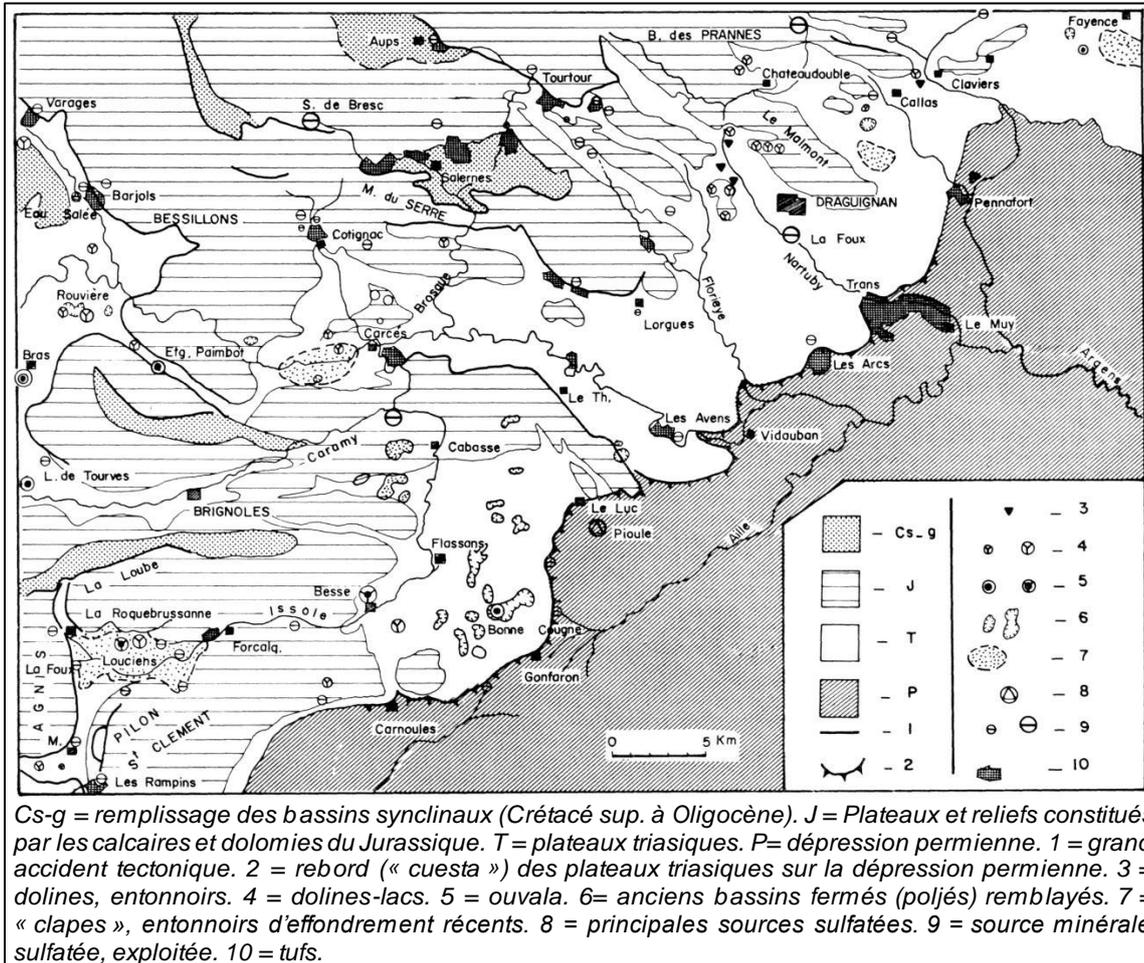


Illustration 6: Manifestations des formes karstiques du Trias gypseux dans les plateaux varois (Nicod, 1967).

On peut citer tout d'abord les clapes définies comme des entonnoirs de suffosion qui apparaissent brutalement dans la vallée de la Nartuby en amont de Draguignan et près de Rebouillon ou près de Claviers.

Les dolines d'effondrement, également, affectent les calcaires liasiques et jurassiques sus-jacents. Les entonnoirs de suffosion, sur le rebord septentrional du Malmont près de Draguignan, et les cratères du Jas de Pageolier au nord-ouest de Châteaudouble, constituent des groupes de profondes dolines. D'autres s'ouvrent directement dans les calcaires, les dolomies, et les cargneules du Muschelkalk et du Keuper. On peut citer parmi les excavations les plus impressionnantes « le trou de l'Infernet » de Rouvière Plane près de Bras (Illustration 7) et le « trou de Seville » à Varages.



Illustration 7: Exemple d'effondrement dû à une cavité de Gypse, le trou de l'Infernet près de Châteauevert dans le Var (source : <http://www.flickr.com/>, photo S. Robert).

Par ailleurs, les dolines-lacs constituent le phénomène le plus caractéristique des plateaux varois. Elles sont de deux types ; a) dépressions cratériformes dans le Muschelkalk calcaire, comme les deux Louciens de la Roquebrussanne le lac de Besse et le marais de Gavoty ; b) simples entonnoirs pleins d'eau provenant de la nappe comme les lacs de Tourves ou les « Gours bénits » de Bras. Au départ les grandes dépressions cratériformes comme les Louciens se sont ouverts par effondrement dans un anticlinal de Muschelkalk. L'agrandissement de la dépression se poursuit, particulièrement dans le Grand Loucien (Illustration 8) du fait des variations importantes du niveau de l'aquifère, entraînant la dissolution et la désagrégation des gypses qui affleurent sur une partie des parois de ce « cratère ».



Illustration 8: Doline lac du Grand Loucien dans le Centre-Var (source : www.plus.randomania.fr)

Les entonnoirs ou dolines recensés en Basse Provence sont ouverts généralement dans les terrains argilo-gypseux du Keuper (clapes de Draguignan et de Callas, effondrement de Peyrui à Bargemon, Illustration 9).



Illustration 9: Effondrement de Peyrui, Bargemon (BRGM)

On peut tirer des informations importantes de la disposition des entonnoirs. Créés par dissolution du gypse du Keuper puis par effondrements successifs, ces entonnoirs sont rapidement colmatés par des matériaux soliflués (provenant essentiellement des formations superficielles) et deviennent alors des « dolines » ou des ouvalas (coalescences de dolines) (Illustration 10). L'entonnoir dont l'effondrement est actif est le plus bas : ce qui témoigne de la circulation aquifère, facteur de dissolution de CaSO_4 (Nicod, 1967).

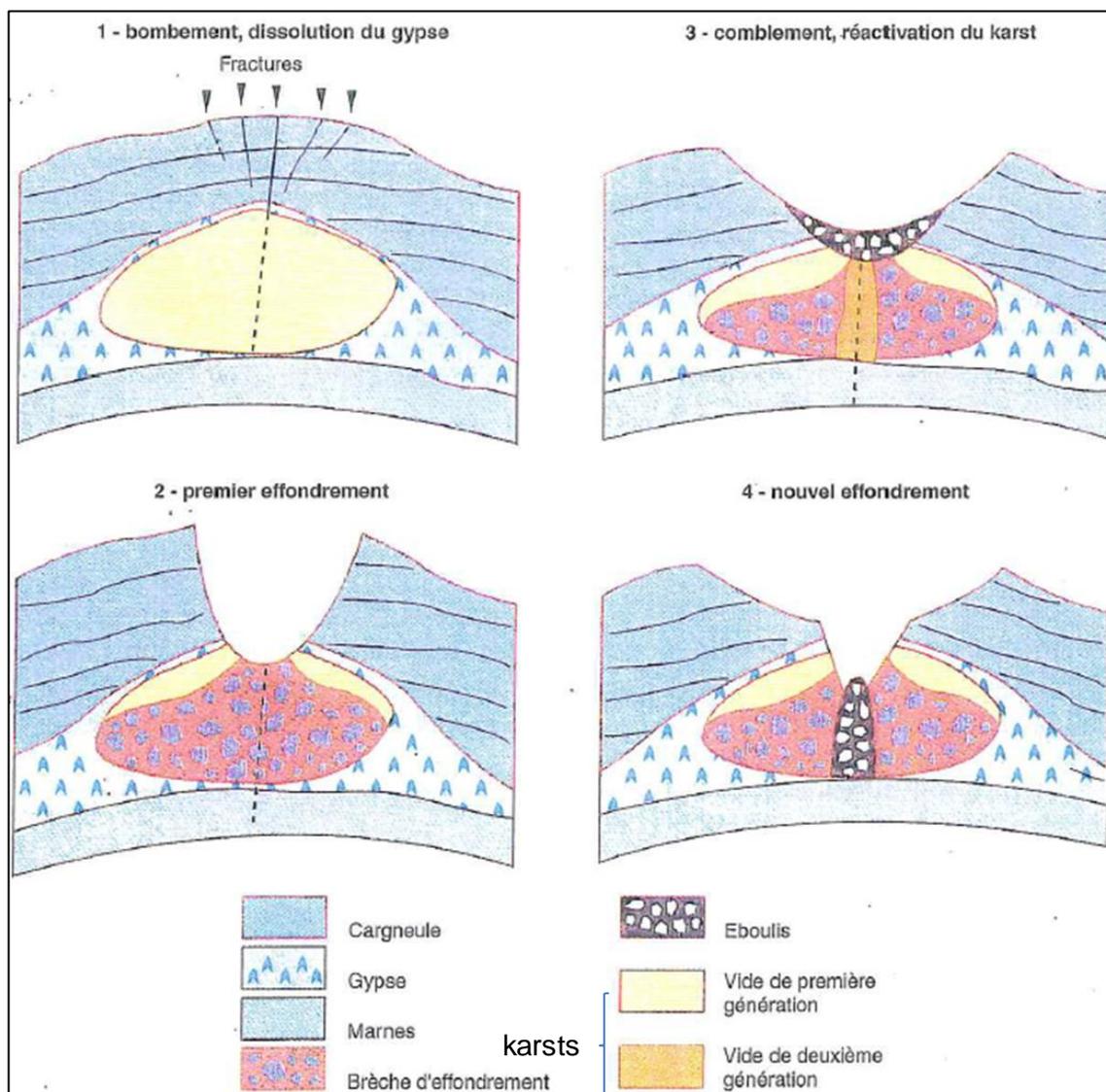


Illustration 10: Schéma présentant une hypothèse d'évolution polyphasée de cavités de dissolution dans le gypse du Trias de Provence, région de Bargemon, Var (d'après Pothérat, 1997).

2.2.2. Glissements de terrain associés à des formations gypseuses

La présence de gypse au niveau d'un versant accentue son instabilité naturelle liée à la pente, la gravité et à la circulation de l'eau sur le talus. Cette instabilité peut se traduire notamment par des glissements de terrain.

Exemples de glissements liés à la présence de gypse rencontrés en Provence-Alpes Côte d'Azur

- **Glissement de Roquebilière (1926)**

Ce glissement qui a eu lieu dans les Alpes-Maritimes, a été déclenché à la suite de fortes et durables précipitations (sept fois la norme en octobre et novembre 1926). Il a mobilisé un volume de plus de 2 millions de mètres cubes, écrasé une vingtaine de maisons et provoqué la mort de 19 personnes (Illustration 11).



Illustration 11 : Glissement de Roquebilière, 1926.

Ce glissement a affecté une très épaisse formation de moraines argileuses reposant sur un substrat irrégulier, formé pour moitié de gypse et de marnes, en strates subverticales dans lesquelles s'intercalent des bancs de dolomie et de cargneules. La dénivellation était de plus de 250 m et la pente générale du versant d'à peu près 20°.

- **Glissements en hautes montagnes alpines**

Quelques cas existent où la dissolution de formations gypseuses a favorisé la déstabilisation complète d'un versant. Par exemple le glissement du Lamet, près du barrage du Mont Cenis (Savoie) : les schistes lustrés surmontant par charriage tectonique les gypses triasiques ont subi un tassement et un glissement, par suite de la dissolution des gypses sous-jacents (LCPC, 2002).

• Glissements rencontrés en Provence

Dans la zone de Bargemon dans le Var, les glissements dus aux formations gypseuses sont une manifestation physique notable des versants. Ils sont situés exclusivement sur les terrains du Keuper, étage triasique très hétérogène contenant essentiellement des marnes et du gypse. Ici, il ne s'agit pas de glissements classiques, c'est-à-dire présentant une géométrie caractéristique des glissements : niche d'arrachement, bourrelet de pied... Il s'agit plutôt de glissements qui pourraient être qualifiés de « primitifs » ou « non aboutis » car ils ne possèdent ni de bourrelets latéraux, ni de pied (Fiolet, 2000).

Le gypse et les marnes n'ont pas du tout le même comportement vis-à-vis de l'eau, ils seraient même opposés : les marnes, du fait de leur imperméabilité, ont une tendance à conserver l'eau alors que le gypse, avec sa structure grumeleuse et ses capacités à la dissolution, a pour effet de créer des vides où l'eau peut s'écouler. C'est l'association de ces deux roches qui accentue les capacités aux glissements des formations gypseuses du Keuper : le gypse, roche perméable se trouve dans une matrice de marnes, roches imperméables. Il fait alors office de réservoir : l'eau s'infiltré dans le gypse, crée des nappes perchées piégées par les marnes. Ainsi, du fait de la présence du gypse, les marnes du Keuper peuvent rapidement atteindre leur limite de plasticité et provoquer le glissement (Fiolet, 2000).

A titre d'exemple, deux glissements liés à la présence de gypse en Provence sont décrits ci-dessous.

Exemple du glissement du Duech (Var, près de Bargemon)

Le glissement du Duech n'est pas à proprement parlé un glissement, mais plus exactement une zone de multiples mouvements de terrain : glissements rotationnels ou loupes de solifluxion. Cette zone se situe à la limite *Est* de la commune de Bargemon sur le versant *Est* du vallon du Duech. Elle s'étend sur au moins 350 m de large et 250 à 500 m le long du versant (Illustration 12). Cette zone n'est pas homogène : on peut y distinguer un grand glissement rotationnel, classique, et une multitude de petits mouvements de terrain constituant des loupes de solifluxion (Fiolet, 2000).



Photo prise le long de la piste Gaudissard à environ 550 m d'altitude

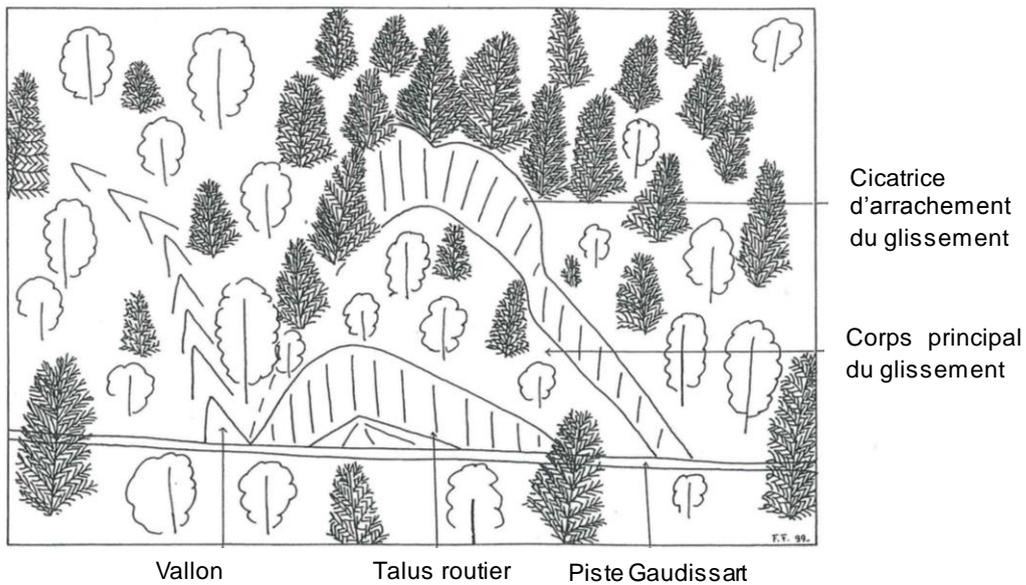


Illustration 12 : Glissement principal du Duech. La cicatrice d'arrachement se dessine bien même au milieu des arbres. Son pied est limité par la piste Gaudissard (Fiolet, 2000).

Exemple des mouvements gravitaires dans la région de Grasse (Alpes-Maritimes)

Les travaux de recherche menés récemment par Géoazur dans la région de Grasse ont mis en évidence la présence d'un contexte à la fois géologique, géomorphologique et hydrogéologique très particulier favorisant la dissolution du gypse et la manifestation de mouvements de terrain ponctuels ou généralisés (Illustration 13 et Illustration 14).

En effet, sur le secteur de Grasse, les marnes et gypse du Keuperaffleurent par endroits sur des épaisseurs conséquentes pouvant atteindre près de 300 m. Le secteur est très tectonisé et parcouru par de nombreuses discontinuités structurales. Le gypse est fortement impliqué dans les processus tectoniques et apparaît sous la forme de bourrage dans les failles majeures. D'autre part, le secteur se trouve à la croisée de tous les réseaux de résurgence drainant les aquifères karstiques de l'arrière-pays. Les failles jouent de plus un rôle dans ces écoulements souterrains en servant de lignes préférentielles pour la circulation des eaux. Ce contexte favorise ainsi les phénomènes de dissolution du gypse qui induisent des instabilités gravitaires à plusieurs échelles : des effondrements et glissements ponctuels, et des mouvements de plus grande ampleur impliquant des versants entiers. C'est le cas notamment du versant de la Marbrière qui présente des signes manifestes de basculement gravitaire généralisé (Zerathe, 2011).

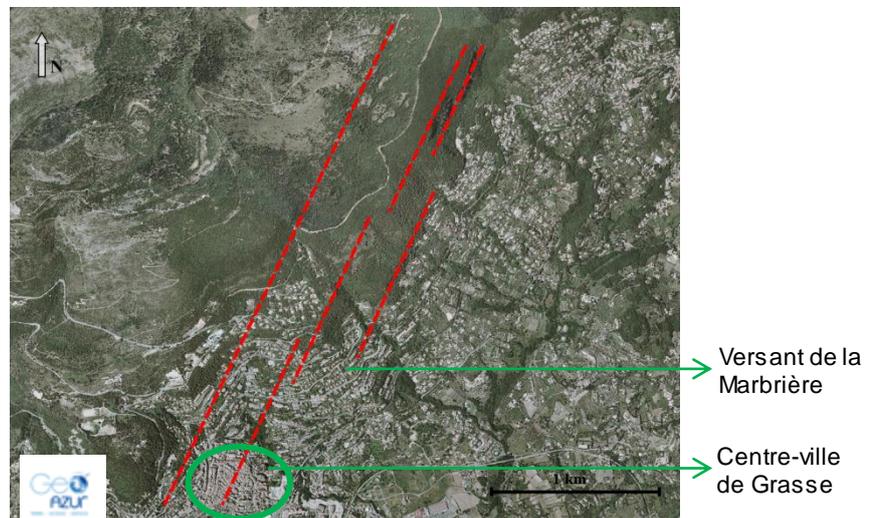


Illustration 13 : Alignement des grandes discontinuités structurales suivant une direction SSW-NNE (source Geoazur)

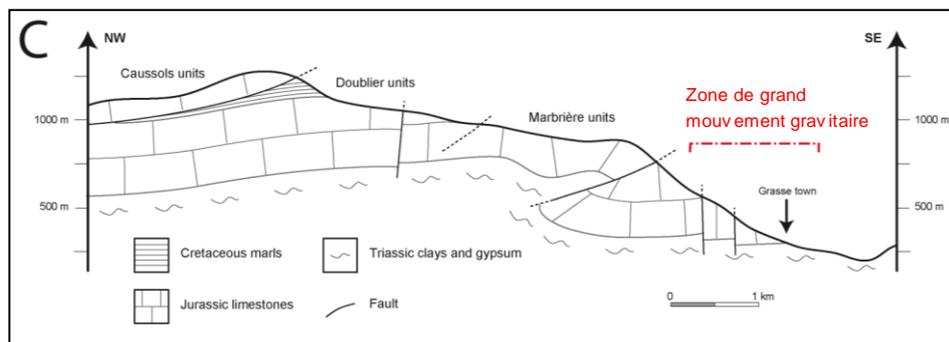


Illustration 14 : Coupe NW-SE à travers le versant de la Marbrière (source Geoazur)

3. Méthodologie et choix des critères pour l'évaluation de l'aléa d'effondrement/glissement lié au gypse triasique

Les processus de dissolution du gypse provoquant des mouvements d'effondrement/glissement résultent souvent de la combinaison d'une ou plusieurs configurations défavorables (facteurs permanents) et de l'occurrence de facteurs externes (facteurs aggravants ou déclenchants) susceptibles de modifier les conditions d'équilibre du milieu et d'accélérer la rupture. Ceux-ci peuvent être naturels ou anthropiques (LCPC, 2002).

3.1. METHODE D'EVALUATION DE L'ALEA EFFONDREMENT DE CAVITES FORMEES PAR LA DISSOLUTION DU GYPSE TRIASIQUE

Les effondrements liés aux karsts formés par dissolution de gypse triasique se produisent lorsque différentes conditions sont remplies :

- il doit y avoir présence de gypse triasique ;
- le gypse doit pouvoir se dissoudre ;
- la cavité ainsi formée doit être suffisamment instable pour s'effondrer.

3.1.1. Susceptibilité de présence de gypse

Le gypse triasique est présent dans certaines formations du Trias. Au sein de ces formations il peut se présenter sous diverses formes : lentilles, diapirs, en injection dans la fracturation, éparses... Chaque formation gypseuse est décrite par les géologues comme contenant du gypse en quantité plus ou moins grande, sous telle ou telle forme. Cela donne donc une information sur la susceptibilité de présence de gypse.

L'épaisseur de la formation gypseuse est également un critère qui permet d'évaluer la quantité de gypse potentiellement soluble.

Du fait de sa faible densité, le gypse peut s'injecter facilement dans la fracturation ou être présent sous forme de bourrage dans des plis pincés (anticlinaux) ou au niveau des grands accidents tectoniques (chevauchements) (cf. § 2.1.1, Illustration 1). Ainsi, la densité de fracturation est un indicateur de zones où le gypse pourrait potentiellement se concentrer.

Les différents critères permettant de qualifier la susceptibilité de présence de gypse dans les formations triasiques citées sont regroupés dans le tableau de l'illustration 15.

Critères de présence de gypse triasique	Données existante
Formations gypseuses et quantité de gypse associée	Cartes géologiques au 1 : 50 000 et leur notice
Epaisseur des formations gypseuses	Coupes géologiques présentes dans la BSS
Localisation de zones où il y aurait concentration potentielle de gypse	Fracturation cartographiée dans les cartes géologiques au 1 : 50 000 et données structurales de photo-interprétation par exemple

Illustration 15 : Critères de présence du gypse

3.1.2. Susceptibilité de présence de cavités liées à la dissolution de gypse

Les critères favorables à la dissolution du gypse sont directement liés à la circulation de l'eau dans la roche.

La dissolution est contrôlée par la vitesse de circulation des eaux souterraines, elle est donc possible s'il y a battement de la nappe au sein de la formation gypseuse ; en effet, si l'eau au contact du gypse ne circule pas, celle-ci se sature en sulfate de calcium SO_4Ca et la dissolution s'arrête.

Le contexte hydrogéologique est primordial pour comprendre les circulations souterraines. Assez souvent les formations gypseuses du Trias sont non aquifères et souvent intensément plissées (c'est le cas du Keuper en Provence par exemple) ; la circulation des eaux se fait par la fissuration et parfois par les pores.

La densité de fracturation pourrait donc être un critère d'évaluation de la susceptibilité à la dissolution de la formation renfermant du gypse ; en effet une densité de fracturation importante peut favoriser la circulation d'eau souterraine et l'infiltration des eaux de surfaces (pluie, fonte des neiges) et donc l'effet de dissolution du gypse. L'infiltration des eaux de surface est un facteur de dissolution ; il est très dépendant de la topographie. Afin de rendre compte, indirectement, de la capacité intrinsèque du sol à laisser s'infiltrer ou ruisseler les eaux de surface, le BRGM a créé l'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR). Cet indice se calcule en comparant le réseau hydrographique naturel au réseau de talwegs calculés (définition en Annexe 1).

Le tableau de l'illustration 16 résume les données utilisées pour caractériser le potentiel de dissolution des formations gypseuses triasiques.

Critères de potentiel de dissolution	Données existantes
Mode de circulation de l'eau dans la roche	Synthèse hydrogéologique de la région PACA (BRGM), carte hydrogéologique du Var, Fracturation des cartes géologiques au 1 : 50000 et données structurales
Taux d'infiltration dans le sol	IDPR (BRGM)

Illustration 16 : Critères caractérisant le potentiel de dissolution des formations gypseuses triasiques

3.1.3. Capacité des cavités de dissolution à s'effondrer

L'effondrement d'une cavité naturelle résulte de l'instabilité de ses voûtes, souvent favorisée par la présence de discontinuités structurales (diaclasses ou failles) et/ou la dégradation de leur recouvrement, en particulier lorsqu'il est peu épais.

Suivant la profondeur du karst et la nature de la formation de recouvrement (formation superficielle, rocher massif, formation gypseuse affectée par le karst), la cavité peut créer ou non des dommages en surface en s'effondrant.

Les caractéristiques des terrains de couverture influent sur la géométrie du débouché en surface d'un effondrement en lui conférant, à plus ou moins long terme, un angle de talus plus ou moins grand. En fonction de cet angle et de l'épaisseur de la couche, le rayon d'action du phénomène en surface peut varier considérablement. Ainsi, un effondrement débouchant dans des terrains marno-calcaires forme un cratère à parois subverticales, tandis qu'un effondrement débouchant dans des sols sableux forme un cratère conique s'évasant vers le haut. Par ailleurs, l'évolution dans le temps d'un cratère conduit à un élargissement du diamètre en surface et à une réduction de la pente de talus par éboulements successifs.

Le tableau de l'illustration 17 résume les données utilisées pour caractériser les critères d'instabilités liées à la présence de gypse triasique dans les formations géologiques.

Critères d'instabilités	Données utilisées
Profondeur de la formation gypseuse sous recouvrement	BSS, sondages de bureaux d'études
Nature de la formation sus-jacente à la formation gypseuse	BSS, cartes géologiques au 1 : 50 000 ^e

Illustration 17 : Critères caractérisant les instabilités liées à la présence de gypse triasique dans les formations géologiques

La zone susceptible d'être affectée par l'apparition d'un effondrement dépend de l'épaisseur et de la nature du recouvrement. L'échelle de travail étant le 1/50 000 et

l'objectif étant de cartographier l'ensemble de la région, il est très difficile à cette échelle de pouvoir évaluer l'épaisseur et la nature des formations de recouvrement.

3.1.4. Facteurs aggravants

Précipitations et/ou mises en charge hydraulique

De nombreux effondrements surviennent après une longue période pluvieuse. Celle-ci favorise la mise en charge des nappes phréatiques, l'augmentation des gradients hydrauliques et donc les vitesses de transit et de dissolution dans le gypse. C'est ainsi que le fontis de La Clappe, au nord de Draguignan, aurait été réactivé suite aux fortes précipitations de juin 2010. Un facteur aggravant est également la présence de gypse dans la zone de battement de la nappe (niveau hivernal – niveau estival).

Activité sismique

L'activité sismique régionale est également à prendre en compte, notamment dans le cas de cavités situées en zones de sismicité 3 ou 4 qui correspondent respectivement à un aléa modéré ou moyen (LCPC, 2002).

Facteurs anthropiques

Les activités de surface (construction, terrassement, dépôts de remblais, circulation, transports, etc.) engendrent des contraintes, des vibrations ou des ébranlements susceptibles d'accélérer par surcharge statique ou dynamique le processus naturel de dégradation des cavités.

D'autre part, les affouillements ou déboisements de la surface peuvent provoquer des modifications défavorables du régime des écoulements d'eau superficiels voire souterrains. C'est également le cas des infiltrations d'« eaux parasites » (fuite de canalisations, absence de réseau d'assainissement collectif, etc.).

Enfin, notamment dans le département du Var, l'exploitation des eaux souterraines par pompage est assez courante et peut avoir une influence sur la dissolution du gypse éventuellement présent dans l'aquifère exploité.

Cependant, compte-tenu de l'échelle de travail (1/50 000) et l'étendue de la zone cartographiée (région entière), les facteurs anthropiques ne seront pas pris en compte dans cette étude.

L'ensemble des facteurs aggravant retenus et les données utilisées pour les caractériser sont regroupés dans le tableau de l'illustration 18.

Facteurs aggravant la formation des effondrements	Données utilisées
Précipitations	Hauteurs annuelles de précipitation moyennées sur 30 ans (période de 1971 à 2000) en PACA (grille au pas de 1 km) (AURELHY, météo France)
Séismes	Zonage national de l'aléa sismique, carte des failles actives de la région PACA
Facteur anthropique	Néant

Illustration 18 : Facteurs aggravant la formation des effondrements

3.1.5. Rétro-analyse

La probabilité de présence de cavités formées par dissolution du gypse telle qu'elle vient d'être décrite, c'est-à-dire résultant de la combinaison des facteurs permanents et aggravants, peut être validée en repérant la présence de fontis (effondrements) non liés à la présence de cavités anthropiques sur le terrain.

La BD Cavités (www.cavites.fr) est un inventaire des cavités repérées sur le terrain ou dans des sondages ; certes cette base de données n'est pas exhaustive mais elle renseigne sur les contextes de localisation de ces cavités. Elle ne permet cependant pas de faire une rétroanalyse très poussée car l'origine, naturelle, des cavités est rarement explicitée (dissolution de gypse ou karst calcaire).

L'aléa effondrement final peut être également confronté aux évènements effondrements ayant eu lieu. La base de données BD MVT (www.mouvementsdeterrain.fr) répertorie les mouvements de terrain inventoriés en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Comme la précédente cette base de données n'est pas exhaustive mais elle permet en général de retrouver la formation affectée par le mouvement de terrain.

3.1.6. Diagramme résumé

L'ensemble des étapes suivies pour la réalisation de la carte régionale d'aléa effondrement est résumé sur le diagramme de l'illustration 19. L'aléa considéré est l'aléa effondrement lié aux cavités formées par dissolution de gypse triasique. A chaque étape les facteurs permanents et aggravants permettant l'évaluation de la susceptibilité apparaissent.

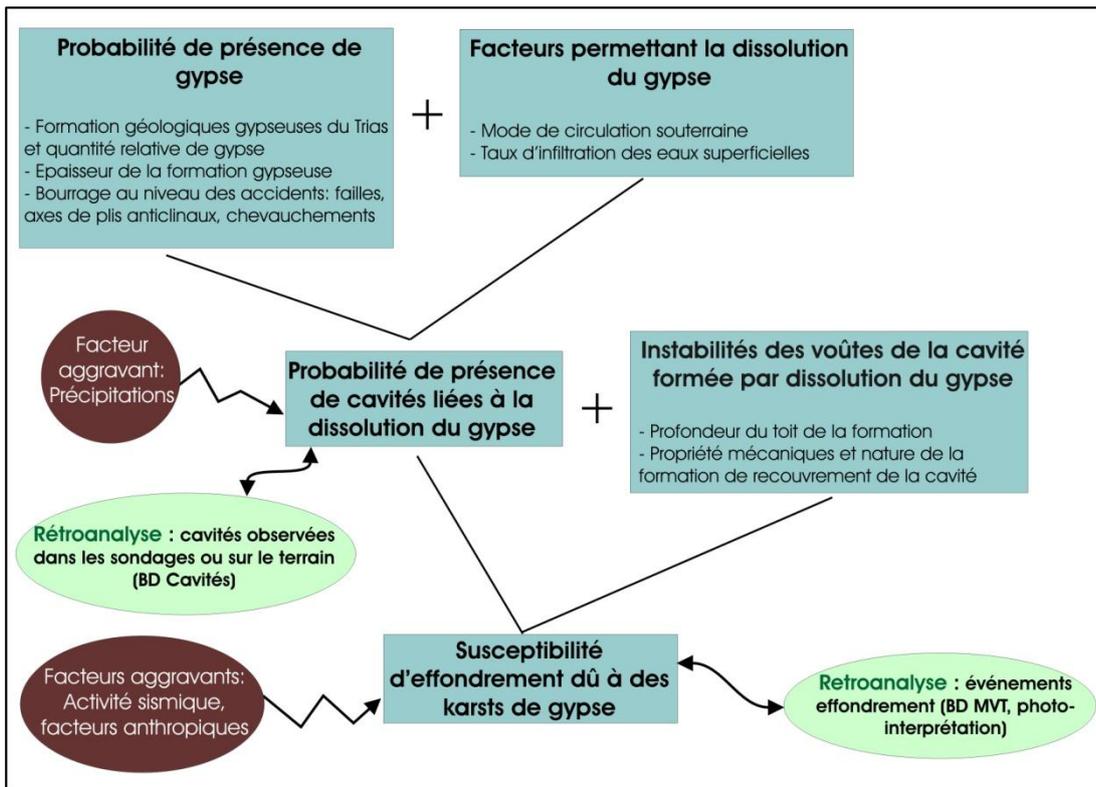


Illustration 19 : Démarche suivie pour évaluer l'aléa effondrement

3.2. METHODOLOGIE SUIVIE POUR ESTIMER L'ALEA GLISSEMENT LIE AUX FORMATIONS GYPSEUSES TRIASIQUES

Les terrains triasiques gypseux ont des propriétés qui permettent d'engendrer des glissements de terrain. Les mécanismes de glissement sont très dépendants de la lithologie affectée et de la configuration du gypse dans la formation triasique.

En région Provence-Alpes Côte d'Azur, il existe principalement deux types de situations où le gypse est impliqué dans des phénomènes de glissements :

- celui du mélange du gypse avec des argiles ou marnes ;
- celui de la superposition d'une formation rocheuse ou meuble sur un substrat gypseux.

Dans tous les cas, on doit être en présence d'un talus raide imbibé d'eau comme cela se produit à la suite de précipitations intenses par exemple.

3.2.1. Facteurs permanents

La lithologie : présence de gypse

Le premier facteur est la présence de gypse dans la formation triasique ; la quantité de gypse est déterminante mais aussi le type de roche associé (marnes, calcaires, dolomie...). Dans le Var par exemple, les marnes tendres et gypseuses du Keuper, dès qu'elles sont imbibées, deviennent plastiques et peuvent provoquer un glissement de terrain (Fiolet, 2000). Dans les Alpes, le gypse peut servir de « couche savon » pour les niveaux sus-jacents.

Les critères de présence de gypse sont les mêmes que ceux définis pour l'aléa effondrement (Illustration 15).

La pente

La pente accentue l'action de la gravité. Plus elle sera importante, plus des glissements pourront se déclencher. Il existe des seuils limites de pente au-delà desquels les glissements sont possibles. Le modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN au pas de 1/50 000 sera utilisé dans cette étude pour évaluer un modèle de pente à l'échelle de la région.

Fracturation de la roche

La présence de fractures ou fissures dans la roche susceptible d'être mise en mouvement par glissement va jouer sur, d'une part la dissolution du gypse présent dans la formation en question ou dans la formation sous-jacente, et ce par infiltration des eaux, d'autre part la mise en charge des nappes perchées ou les réseaux superficiels de circulation d'eau. Les fractures cartographiées sur les cartes géologiques au 1/50 000^e seront utilisées dans l'étude pour réaliser une carte de densité de fracturation.

3.2.2. Facteurs aggravants

Précipitations

- **Action mécanique de l'eau**

Le deuxième facteur est la présence de l'eau. L'eau intervient de deux façons. Dans un premier temps sous la forme de précipitations : la pluie arrose directement le versant et l'humidifie. Dans un second temps l'eau de pluie peut s'infiltrer et dissoudre le gypse.

- **Action chimique de l'eau**

L'eau qui circule dans les formations gypseuses se charge en sulfate et contribue à la défloculation des argiles dans les marnes par exemple. Cela peut favoriser le

déclenchement de glissements de terrain si les roches des formations encaissantes contiennent des argiles ou des marnes.

Activité sismique

L'activité sismique régionale est également à prendre en compte, notamment dans le cas de glissements situés en zone de sismicité modérée à moyenne (zones 3 à 4 du zonage national).

Facteurs anthropiques

Les mêmes facteurs anthropiques que ceux identifiés pour l'aléa effondrement ont un rôle aggravant dans la genèse des glissements. Les facteurs aggravants étant finalement les mêmes que ceux considérés pour l'aléa effondrement, ils sont résumés dans le tableau de l'illustration 18.

3.2.3. Diagramme résumé

L'ensemble des étapes suivies pour la réalisation de la carte régionale d'aléa glissement lié à la dissolution de gypse triasique est résumé sur le diagramme de l'illustration 19. A chaque étape les facteurs permanents et aggravants permettant l'évaluation de la susceptibilité apparaissent.

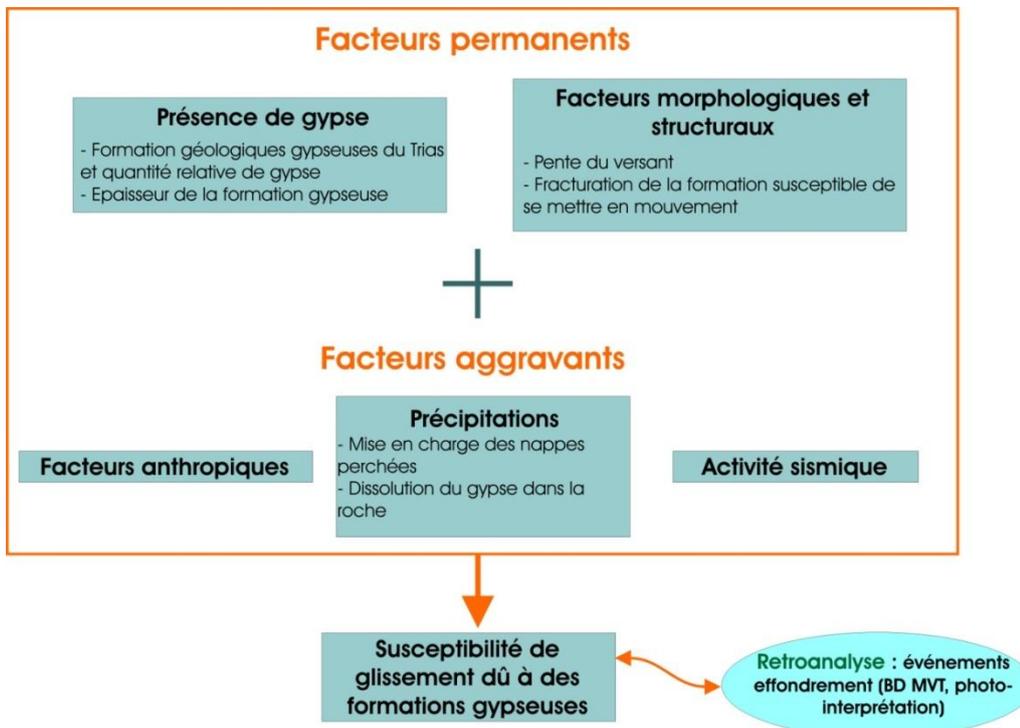


Illustration 20 : Démarche suivie pour évaluer l'aléa glissement

4. Evaluation de l'aléa effondrement lié à la présence de cavités formées par dissolution de gypse triasique à l'échelle régionale

Dans ce chapitre, l'échelle d'étude ne permet pas d'utiliser tous les facteurs favorables aux effondrements énumérés au chapitre précédent. Il est par exemple difficile d'estimer de manière homogène l'épaisseur de recouvrement minimale des cavités formées vu la disparité spatiale des données BSS.

4.1. PROBABILITE DE PRESENCE DE GYPSE

Le gypse est présent en plus ou moins grande quantité dans des formations du Trias.

La composition des formations du Trias contenant potentiellement du gypse dans la région Provence Alpes-Côte d'Azur varient selon que l'on se trouve dans les Alpes, dans le Var, ou sur le littoral. Il s'agit principalement de formations appartenant aux sous étages du Keuper et du Muschelkalk.

Ces formations ont été divisées en quatre catégories selon un critère purement lithologique lié à la quantité de gypse présent :

- formation contenant presque exclusivement du gypse (indice 4) ;
- formation correspondant à un ensemble très tectonisé d'éléments rocheux emballés dans du gypse, ou formation contenant de puissants niveaux gypseux (indice 3) ;
- formation comportant des niveaux gypseux de faible puissance et/ou présents localement (indice 2) ;
- formation uniquement constituée de cargneules ou comprenant très peu de gypse (indice 1).

Les différentes formations représentées en fonction de leur indice lithologique de présence du gypse figurent sur la carte de l'illustration 21. L'extension des formations utilisée et représentée sur les cartographies présentées dans les pages suivantes, correspond aux formations décrites sur les différentes cartes géologiques du BRGM (échelle 1/50 000^e). A l'échelle du 1/50 000^e, et vu l'imprécision, nous faisons l'hypothèse qu'à l'extérieur des zones où les formations gypseuses sont affleurantes à subaffleurantes le recouvrement augmente très rapidement et devient trop épais pour permettre la progression jusqu'en surface d'effondrements de cavités souterraines.

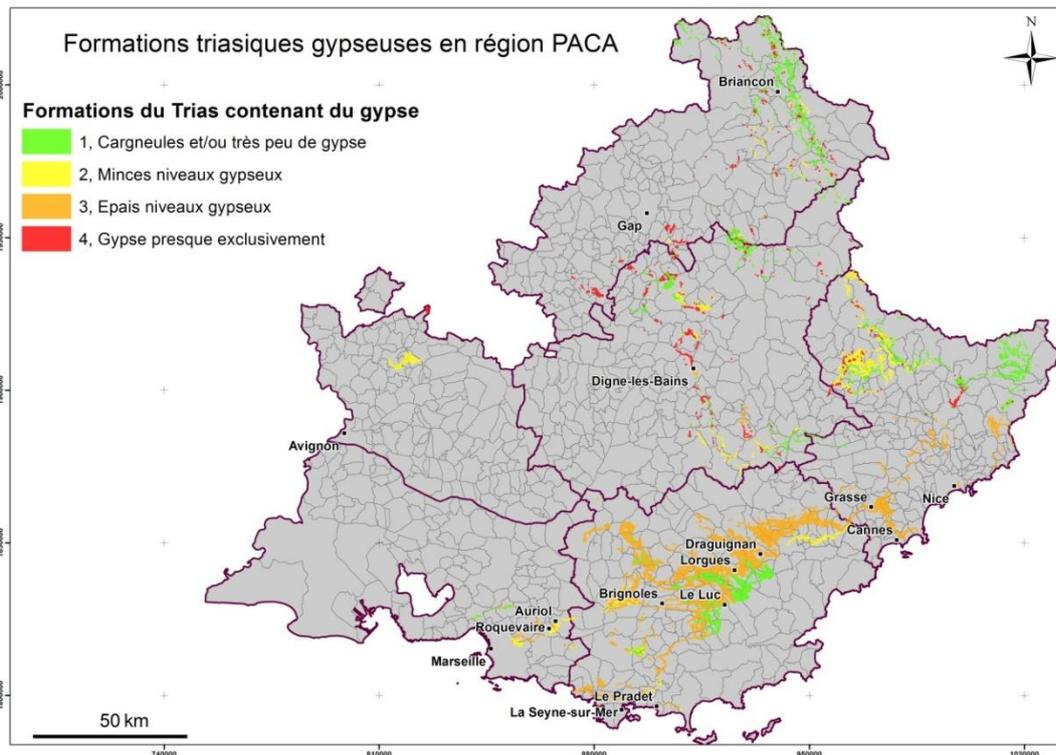


Illustration 21 : Répartition des formations triasiques contenant du gypse

Les formations les plus susceptibles (indice 4) affleurent de manière très ponctuelle et diffuse dans les zones de relief (ces niveaux très gypseux peuvent appartenir à tous les étages du Trias) :

- dans les Alpes-Maritimes : dans la vallée de la Vésubie, de la Roya, autour des gorges de Daluis ;
- dans les Alpes de Haute-Provence : à l'Est de La Motte-du-Caire et au nord de Digne juste à l'ouest de la réserve géologique ;
- dans les Hautes-Alpes : au Nord Est de Laragne-Montéglin, dans la région Briançonnaise au niveau du col de l'izoard à Névache.

Les formations d'indice 3 comprennent presque essentiellement du Keuper (Trias supérieur) qui se rencontre en particulier dans le département du Var. Le Keuper dans cette zone prend souvent la forme d'une masse chaotique très tectonisée, dont l'épaisseur est quasi-impossible à évaluer, comprenant généralement des marnes, du gypse sous diverses formes et des dolomies plus ou moins cargneulisées.

Les formations d'indice 2 incluent des amas de gypse présents localement, souvent injectés dans les accidents tectoniques. Ils correspondent assez souvent à l'étage du Muschelkalk surtout dans le sud de la région (Var, sud des Bouches-du-Rhône). Dans

la zone alpine ce terme est un niveau cargneulisé contenant sporadiquement du gypse.

Les formations les moins susceptibles de présenter des cavités de dissolution de gypse sont les formations triasiques contenant des niveaux cargneulisés (ce processus implique l'altération des dolomies par des eaux chargées en sulfate). Dans le département du Var, ce niveau correspond au Muschelkalk inférieur dolomitique (Anhydritgruppe) constitué de dolomies cargneulisées et marnes dolomitiques. Par ailleurs, il s'agit souvent de cargneules en contact avec les niveaux gypseux (d'où la cargneulisation).

4.2. CAPACITE DE DISSOLUTION DU GYPSE

Il est difficile, à l'échelle régionale, d'avoir accès aux mécanismes d'écoulements souterrains. Dans la majorité des formations gypseuses du Trias, la circulation de l'eau se fait principalement via la fracturation (le Trias étant souvent très tectonisé et donc très fracturé).

Souvent, les formations gypseuses du Trias constituent des domaines hydrogéologiques par opposition avec les systèmes aquifères (Illustration 22). Ces domaines ne génèrent pas de véritables écoulements exploitables mais permettent tout de même une circulation d'eau notable. Dans le département du Var par exemple, le Keuper - principale formation gypseuse du département - est une formation constituée de marnes et de gypse qui présente une perméabilité de fissures principalement dans les horizons très superficiels (roche quasi imperméable).

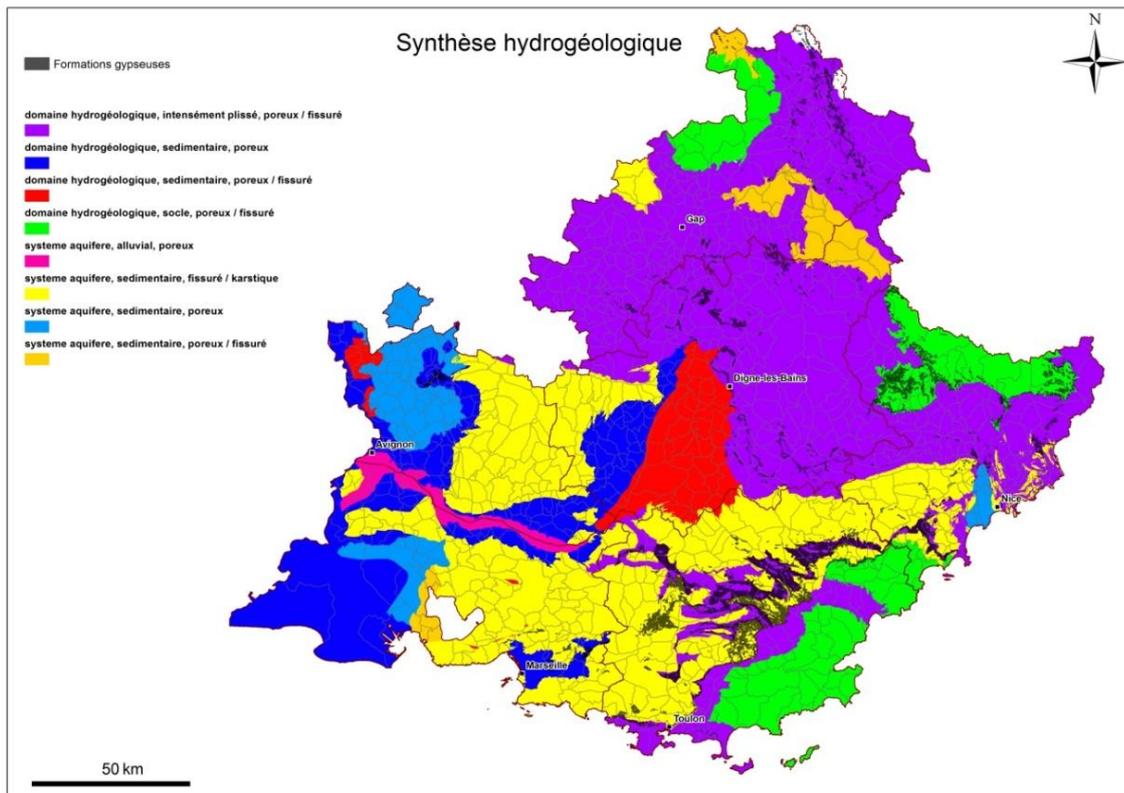


Illustration 22 : Synthèse hydrogéologique sur la région PACA (BRGM, 2011)

Par ailleurs, l'eau de surface (pluie, fonte des neiges) peut s'infiltrer dans le sol de manière plus ou moins intense, notamment suivant la topographie. L'Indice De Persistance du Réseau (IDPR) décrit précédemment, permet de rendre compte indirectement de la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface. À l'aplomb d'une formation gypseuse triasique, les zones à infiltration majoritaire favoriseront la dissolution de gypse (Illustration 23).

Du fait de la faible densité du gypse, celui-ci a tendance à migrer notamment dans les accidents (axes de plis, fractures) ; des fortes concentrations de gypse peuvent s'y retrouver. De plus, la fracturation favorise la circulation d'eau au sein de la formation gypseuse et donc la dissolution du gypse. La densité de fracturation est ainsi un critère intéressant pour évaluer la susceptibilité de présence de cavités formées par dissolution de gypse (Illustration 24). Les valeurs de l'IDPR sont regroupées en quatre niveaux auxquels sont associés des indices 1, 2, 3 et 4 (4 correspondant à l'intervalle d'indices IDPR pour lesquels l'infiltration est majoritaire).

La densité de fracturation est calculée à partir des cartes géologiques au 1/50 000^e (Illustration 24). Elle est ensuite classée en quatre catégories auxquelles sont associés des indices allant de 1 à 4 (4 étant le cas de figure le plus défavorable, c'est-à-dire la densité de fracturation la plus forte).

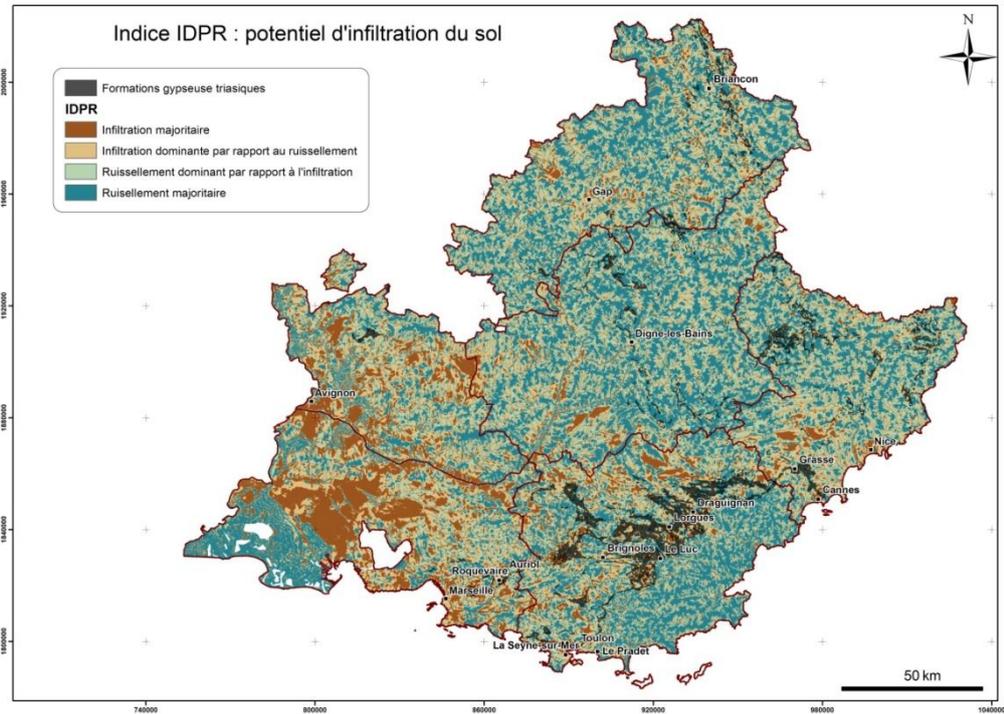


Illustration 23 : Carte de l'IDPR et regroupement en classes

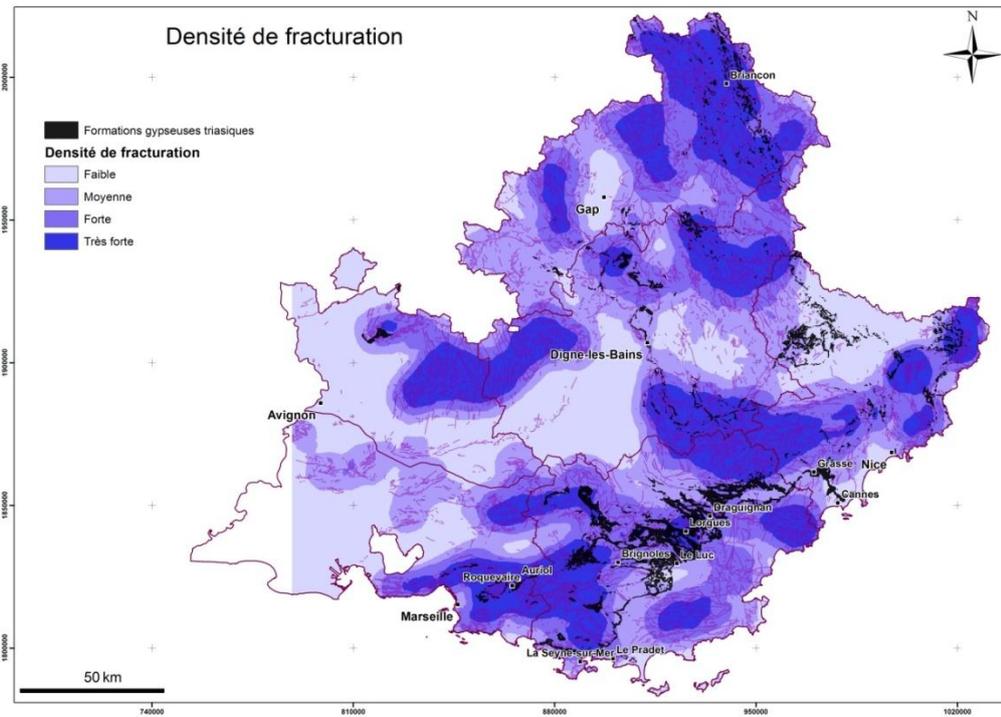


Illustration 24 : Carte de densité de fracturation (exploitation des cartes géologiques au 1/50 000^e)

4.3. FACTEURS AGGRAVANTS

4.3.1. Précipitations

La présence d'eau est indispensable pour dissoudre le gypse dans le sol. L'intensité de cette dissolution est directement dépendante du renouvellement de l'apport pluvial en eau.

Météo France a fourni des données dites normales "AURELHY" (Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie) qui correspondent en fait aux moyennes annuelles des cumuls de précipitations en millimètres (période de 1971 à 2000). La maille de la grille est de 1*1 km.

Afin de pouvoir être comparée aux autres données, cette grille a été interpolée par krigeage afin d'obtenir un raster au pas de 50 m. Les données de pluviométrie ne sont pas réellement continues, elles dépendent du relief ; cependant, pour les besoins de l'étude l'hypothèse de continuité entre les bornes espacées de 1 km a été faite. Toutefois, le variogramme du krigeage n'est pas disponible, aussi nous n'avons pas d'indicateurs sur la précision des résultats.

Le raster « précipitations » a été reclassé en quatre catégories suivant les quartiles de pluviométrie (Illustration 25).

Classe 1	< 1 ^{er} quartile	490-725 mm
Classe 2	1 ^{er} quartile au 2 ^{ème} quartile	725-890 mm
Classe 3	2 ^{ème} quartile au 3 ^{ème} quartile	890-1025 mm
Classe 4	>3 ^{ème} quartile	> 1025 mm

Illustration 25 : Définition de classes de hauteur d'eau (mm)

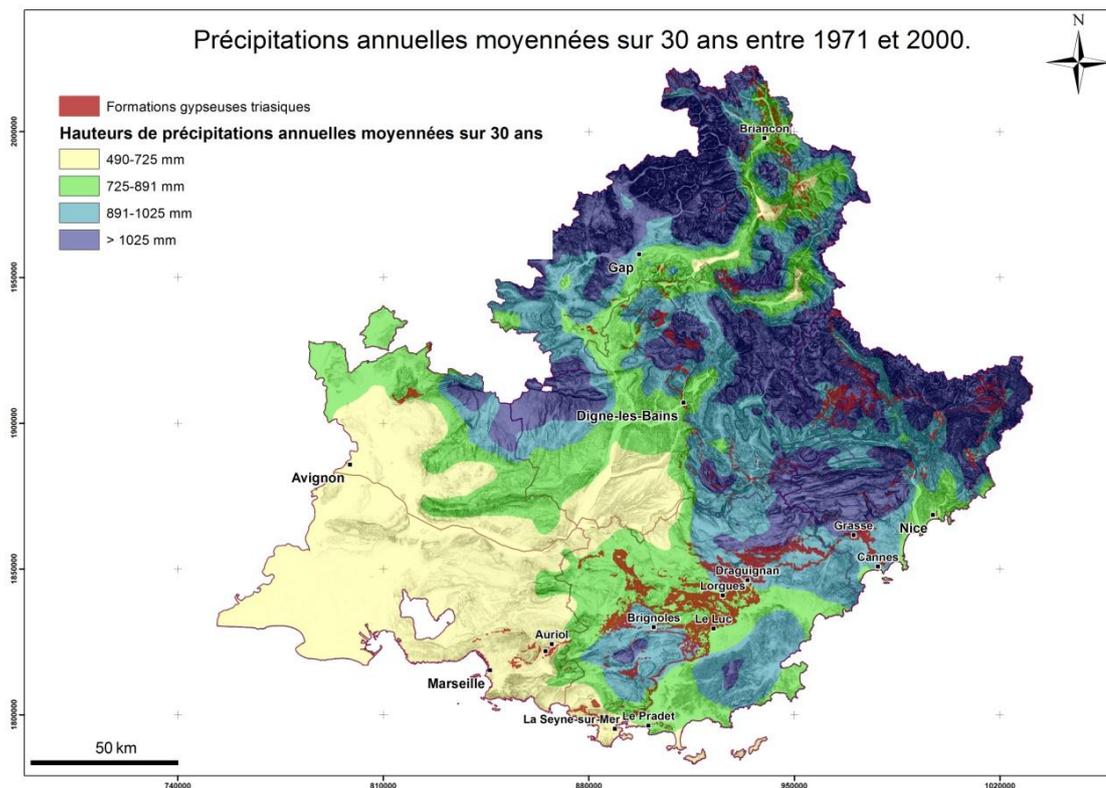


Illustration 26: Carte des précipitations annuelles en mm, moyennées sur 30 ans (d'après les données AURELHY 1971-2000 de Météo France)

4.3.2. Activité sismique

L'activité sismique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur est loin d'être négligeable (Illustration 27). La zone où l'aléa est le plus fort correspond à la zone alpine et subalpine avec un niveau d'aléa moyen (zone de sismicité 4). Néanmoins, en Provence l'aléa présente tout de même un niveau faible à modéré (zones de sismicité 2 à 3).

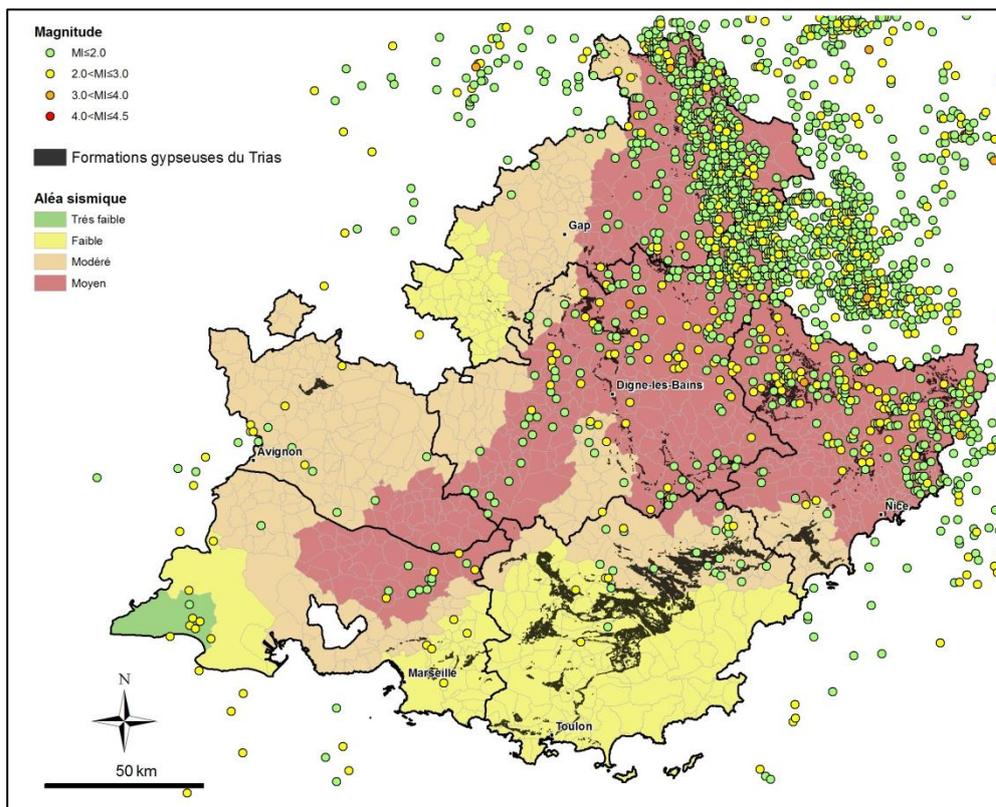


Illustration 27: Extrait du zonage sismique national sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et localisation des séismes issus du catalogue du RénASS de 2004 à 2009

D'après la carte de l'illustration 27, les sollicitations sismiques sont principalement concentrées à l'est, le long de grands accidents structuraux : au nord le long de la zone alpine interne où a lieu une déformation distensive (failles de Haute Durance, Serennes, Mercantour, Barcelonette), et au sud au niveau de l'Arc de Nice et du Bassin ligure où les failles jouent en décrochement (faille de Saorge-Taggia) et en chevauchement (Argentera). Les cavités souterraines situées dans les formations gypseuses dans les zones en aléa moyen et où les enregistrements de séismes sont nombreux sont soumises à des sollicitations sismiques qui impactent la stabilité de la cavité. C'est le cas notamment de la vallée de la Vésubie, de la Roya, de l'Esteron, des gorges du Cians.

Pour caractériser l'aggravation de l'aléa effondrement lié à la sismicité, la carte d'aléa sismique est traduite en indices de 1 à 4, 4 correspondant à l'aléa sismique moyen.

4.4. SUSCEPTIBILITE A L'EFFONDREMENT AU NIVEAU REGIONAL

Chacun des critères décrits précédemment est classé en quatre catégories qui correspondent à un degré plus ou moins élevé de susceptibilité. Un indice (1, 2, 3, 4) est associé à chaque degré : plus cet indice sera élevé plus on sera en situation défavorable (Illustration 28).

Les couches correspondant aux critères d'évaluation sont rastérisées (transformées en grille) au pas de 50 m si elles se présentent initialement sous forme de vecteur (polygones). En effet, le traitement est beaucoup plus rapide, et le procédé de rastérisation plus précis que celui de la vectorisation.

		Degrés de susceptibilité pour chaque critère			
Facteurs permanents	Formations gypseuses	1 = cargneules et/ou très peu de gypse	2 = minces niveaux gypseux	3 = épais niveaux gypseux	4 = gypse presque exclusivement
	Densité de fracturation	1 = densité de fracturation faible	2 = densité de fracturation moyenne	3 = densité de fracturation forte	4 = densité de fracturation très forte
	IDPR	1 = 1 500-2 000 : ruissellements majoritaires	2 = 1 000-1 500 ruissellements plus forts que l'infiltration	3 = 500-1 000 infiltrations plus fortes que ruissellement	4 = infiltrations majoritaires
Facteurs aggravants	Précipitations : hauteurs annuelles moyennées sur 30 ans	1 = 490-725 mm	2 = 725-891 mm	3 = 891-1025 mm	4 >1025 mm
	Activité sismique	1 = activité sismique très faible	2 = activité sismique faible	3 = activité sismique modérée	4 = activité sismique moyenne

Illustration 28 : Scores attribués à chaque critère permettant d'évaluer la susceptibilité régionale à l'effondrement dans les terrains triasiques gypseux.

Ces indices sont ensuite sommés géographiquement, sans pondération : les critères sont considérés d'égale importance. La carte avec les scores bruts arbitraires fait l'objet de l'illustration 29.

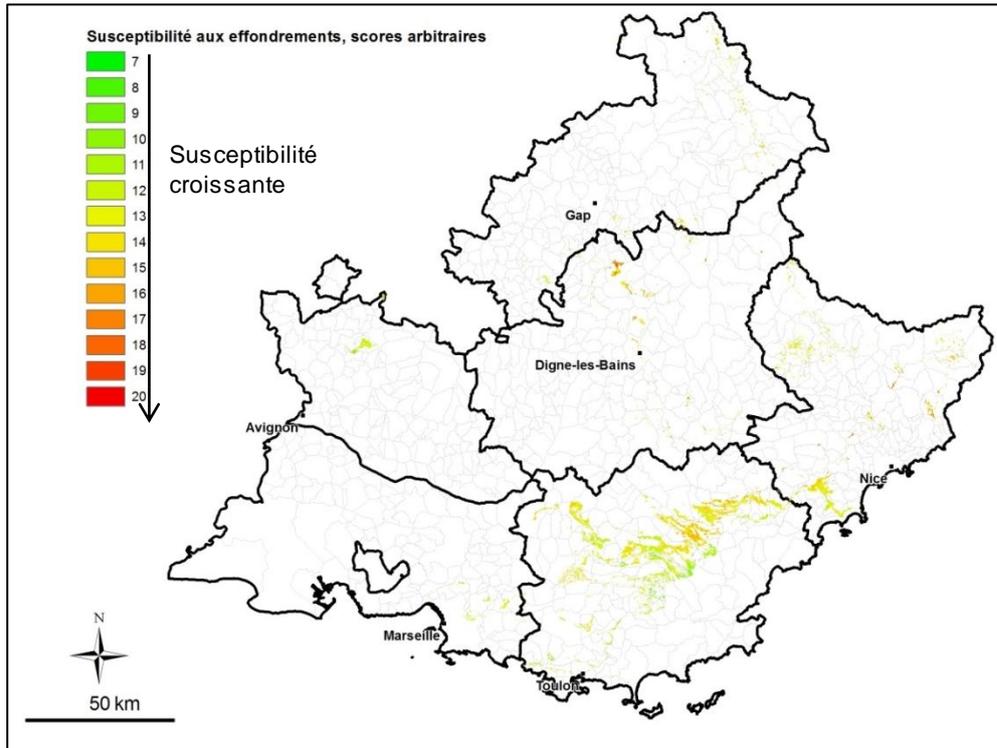


Illustration 29 : Susceptibilité régionale aux effondrements liés aux cavités formées par dissolution du gypse triasique, scores arbitraires

Pour optimiser l'analyse des résultats, il est nécessaire de regrouper les scores et de les classer, cela permet de hiérarchiser les zones en fonction du niveau de susceptibilité (faible, moyen, fort). Le regroupement des scores est effectué à dire d'expert en se basant sur la connaissance du contexte géologique, des cartes régionales de l'aléa mouvements de terrain (Provence calcaire, Zone alpine et Provence cristalline¹), ainsi que sur les phénomènes d'effondrements recensés sur le territoire régional (issus de la BDMVT complétés par la cartographie régionale de l'aléa mouvements de terrain¹). Toutes ces informations vont permettre de guider l'interprétation, pour que la carte de susceptibilité finale (indices classés) soit cohérente. Finalement, les classes retenues sont les suivantes (Illustration 30 et Illustration 31) :

Score	Niveau de susceptibilité
7 à 11	faible
12 à 16	moyen
16 à 20	fort

Illustration 30 : Définition des niveaux de susceptibilité aux effondrements liés aux cavités formées par dissolution de gypse

¹ BRGM/RP-55710-FR, BRGM/RP-56762-FR, BRGM/RP-59163-FR

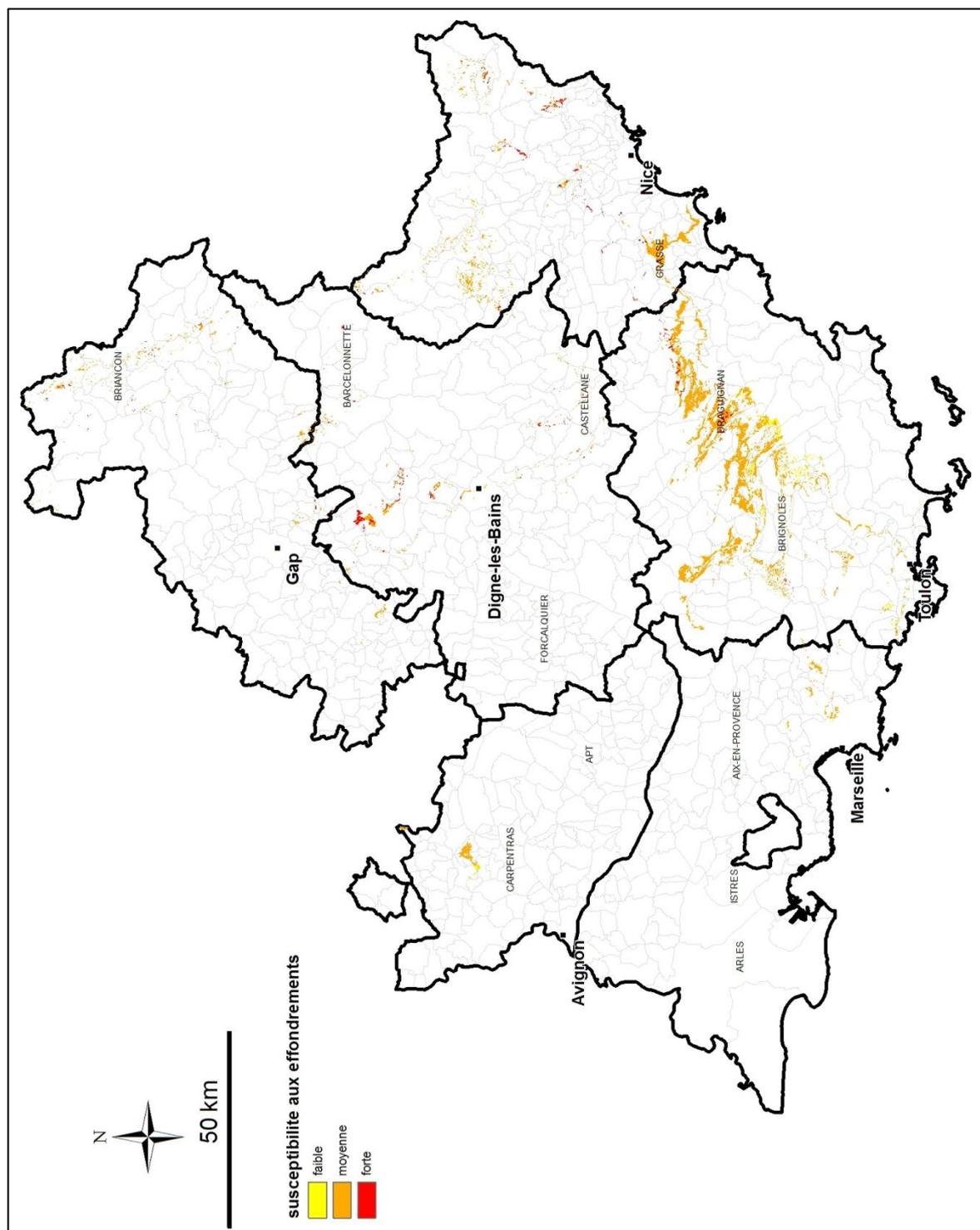


Illustration 31 : Carte régionale de la susceptibilité des formations aux effondrements liés à la présence de cavités formées par dissolution du gypse triasique

L'exposition des enjeux vis-à-vis des zones sensibles aux effondrements est abordée dans le chapitre 6. Le tableau de l'illustration 32 présente les résultats par département.

Les secteurs à susceptibilité forte vis-à-vis des phénomènes d'effondrement liés à la présence de gypse sont principalement situés au nord-est du département : Flayosc, Draguignan, Bargemon, Seillans. Cependant, les secteurs classés en susceptibilité moyenne dominent sur le département : Dracénie, cœur du Var, nord de Saint-Maximin. Dans la région de Toulon également : La Garde, La Farlède, Méounes-les-Montrieux sont des secteurs concernés par des formations sensibles aux effondrements.

Dans les Alpes-Maritimes, le Pays de Grasse, la vallée de la Roya (Breil-sur-Roya), la vallée de la Vésubie (Lantosque), les gorges du Cians (Guillaumes), vallée de l'Estéron (Bonson).

Dans les Alpes de Haute-Provence, c'est le secteur de la Motte-du-Caire, Bayon, à l'est de Sisteron qui est le plus concerné. Cependant, les zones affectées restent peu urbanisées.

Dans les Hautes-Alpes, les formations présentes sont classées en susceptibilité moyenne, et affleurent sur des surfaces restreintes sur les reliefs (vallée du Queyras, Clarée).

Dans le Vaucluse, les formations gypseuses sont localisées à l'ouest du Mont Ventoux, au pied des dentelles de Montmirail : Suzette, Lafare. Elles sont classées en susceptibilité moyenne principalement.

Dans les Bouches-du-Rhône, les secteurs situés à l'est de Marseille, Allauch, Roquevaire, Auriol, sont concernés par les phénomènes d'effondrements avec un niveau de susceptibilité moyen. Une partie a notamment été exploitée en carrière souterraine pour la fabrication du plâtre.

Département	Superficie (km ²)	Formation en susceptibilité faible vis-à-vis des effondrements (km ²)	Formation en susceptibilité moyenne vis-à-vis des effondrements (km ²)	Formation en susceptibilité forte vis-à-vis des effondrements (km ²)	Pourcentage de surface exposée au risque d'effondrement (%)
Var	6038	22,03	306,17	11,74	5,63
Alpes-Maritimes	4295	0,48	76,37	12,01	2,07
Alpes de Haute-Provence	6994	0,10	21,92	13,41	0,51
Hautes-Alpes	5686	0,09	22,47	4,41	0,47
Vaucluse	3578	1,35	10,78	0,00	0,34
Bouches-du-Rhône	5095	0,55	9,54	0,00	0,20

Illustration 32 : Surfaces départementales concernées par des formations sensibles aux effondrements liés à la présence de gypse triasique

5. Evaluation de l'aléa glissement de terrain dans des formations gypseuses du Trias à l'échelle régionale

Dans le cadre de la présente étude, le gypse présent dans les formations gypseuses impliquées dans les phénomènes de glissement doit être un facteur déterminant dans ces instabilités. Ses propriétés mécaniques et sa capacité à se dissoudre seront donc des facteurs décisifs.

Il est à noter, par ailleurs, que ce type de glissement peut être parfois associé voire provoqué par des effondrements liés à des cavités formées par dissolution du gypse (exemple du glissement de l'Estuve près de Bargemon dans le Var).

5.1. FACTEURS PERMANENTS ET AGGRAVANTS

Tout d'abord, la déstabilisation d'un versant se fait par l'action de la pesanteur. La pente est donc le premier facteur déterminant quant à la possibilité d'apparition d'un glissement. À l'échelle du 1/50 000^e, compte tenu de l'imprécision du MNT et des regroupements opérés au sein des formations géologiques contenant du gypse, la détermination des seuils de pente ne peut résulter d'analyses procédant des modèles conceptuels habituels de la mécanique des sols, mais de rétro-analyses et dires d'expert. Dans la carte régionale aléa mouvements de terrain², les auteurs évaluent, pour trois zones de la région (Provence calcaire, Provence cristalline et Zone alpine), les seuils de pentes pour chaque lithologie sensible, au-delà desquels le glissement est possible. Sur le tableau de l'illustration 33, la classe de sensibilité 1 correspond à une sensibilité non-négligeable et 0 une sensibilité négligeable (BRGM, 2011).

Zone	Stratigraphie/Lithologie	Classes de pentes par classe de sensibilité (0 ou 1)	
		0	1
Provence calcaire	Trias/ cargneules gypseuses-complexe gypseux	0-11°	>11°
Provence cristalline	Trias/Argile, gypse, dolomies, cargneules	0-14°	>14°
Zone Alpine	Argile, marne, gypse et dolomies	0-21°	>21°

Illustration 33 : Sensibilité au glissement de terrain des formations gypseuses du Trias en fonction des classes de pentes par zone

La carte des pentes limites au-delà desquelles les glissements sont possibles est représentée sur l'illustration 34.

² Rapport BRGM/RP-59584-FR

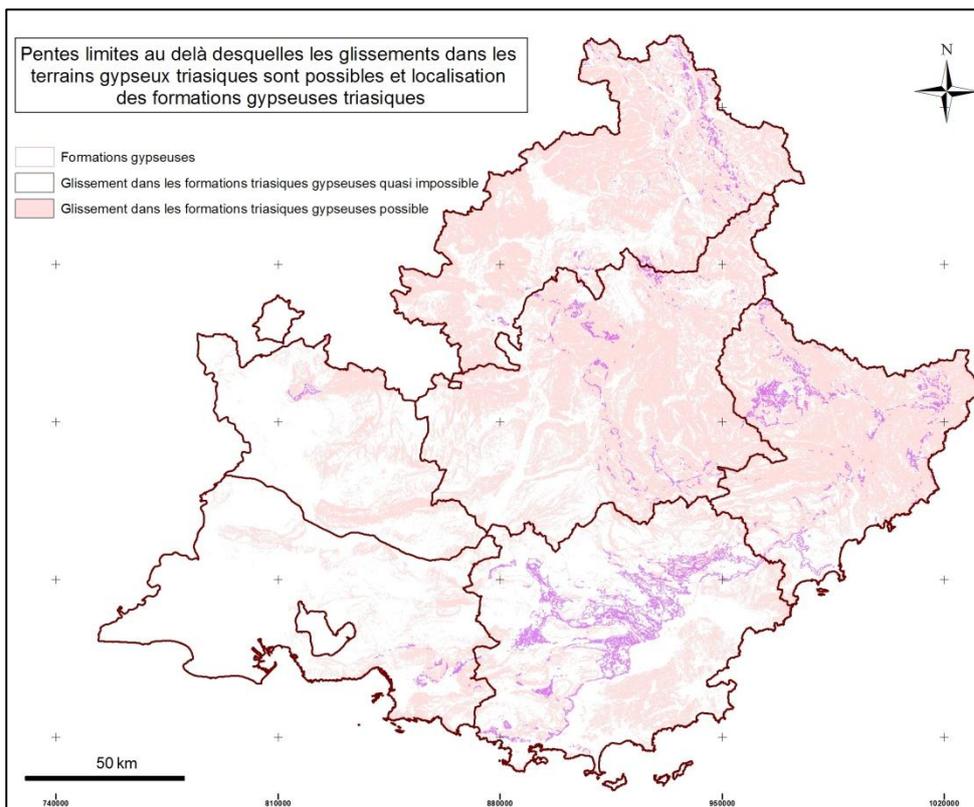


Illustration 34 : Pentes limites au-delà desquelles les glissements dans les terrains gypseux triasiques sont possibles

Comme dans le cas des effondrements, les glissements sont provoqués par la dissolution du gypse. Ainsi, certains facteurs permanents vont être favorables à des glissements de terrains tels que :

- la lithologie : les formations gypseuses du Trias à l’affleurement vont être notées selon la quantité de gypse qu’elles contiennent (cf. chapitre 4.1)
- la densité de fracturation favorisera les écoulements et donc la dissolution au sein des versants (cf. chapitre 4.1)

Enfin les facteurs aggravants seront les mêmes que dans le cas des effondrements (cf. chapitre 4.3).

5.2. SUSCEPTIBILITE REGIONALE AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN

De la même façon que pour la susceptibilité aux effondrements, l’évaluation de la susceptibilité des terrains aux glissements passe par une analyse des facteurs permanents / aggravant favorisant l’apparition des glissements. Ainsi, chacun des critères décrits précédemment - lithologie, densité de fracturation, pente, précipitations (hauteur annuelles moyennées sur 30 ans), activité sismique - est classé en quatre

catégories qui correspondent à un degré plus ou moins élevé de susceptibilité : l'indice 1, 2, 3, 4 est associé à chaque degré : plus cet indice sera élevé plus on sera en situation défavorable (Illustration 35). Le tableau des critères est semblable à celui de l'illustration 28 concernant les phénomènes d'effondrement, à ceci près que l'IDPR n'est pas pris en compte pour évaluer la susceptibilité au glissement, mais plutôt la pente qui joue un rôle majeur dans la stabilité des terrains.

		Degrés de susceptibilité pour chaque critère			
Facteurs permanents	Formations gypseuses	1 = cargneules et/ou très peu de gypse	2 = minces niveaux gypseux	3 = épais niveaux gypseux	4 = gypse presque exclusivement
	Densité de fracturation	1 = densité de fracturation faible	2 = densité de fracturation moyenne	3 = densité de fracturation forte	4 = densité de fracturation très forte
	Pente	Selon les limites de pente de l'illustration 34, le glissement est possible ou non, seules les zones où le glissement est possible sont représentées			
Facteurs aggravants	Précipitations (hauteurs annuelles moyennées sur 30 ans)	1 = 490-725 mm	2 = 725-891 mm	3 = 891-1025 mm	4 >1025 mm
	Activité sismique	1 = activité sismique très faible	2 = activité sismique faible	3 = activité sismique modérée	4 = activité sismique moyenne

Illustration 35 : Scores attribués à chaque critère permettant d'évaluer la susceptibilité régionale au glissement dans les terrains triasiques gypseux

Lorsque l'on somme la valeur des scores des différents critères, on obtient la carte de l'illustration 36, qui correspond aux scores « bruts » arbitraires, sans pondération de tel ou tel critère.

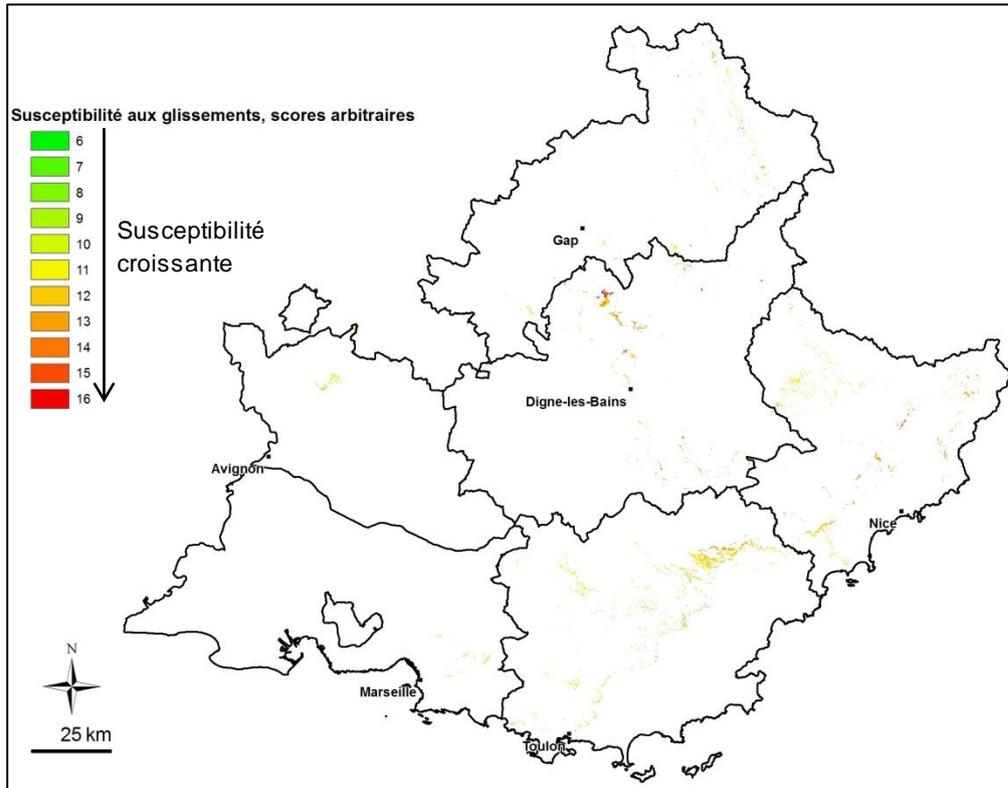


Illustration 36 : Susceptibilité aux glissements de terrain liés aux formations triasiques gypseuses, scores arbitraires

L'analyse de ces scores arbitraires et le regroupement en classes : susceptibilité faible, moyenne et forte, est effectué à dire d'expert de la même façon que pour l'évaluation de la susceptibilité aux effondrements, notamment en se basant sur les phénomènes de glissements liés à la présence de gypse triasique recensés sur le territoire régional (issus de la BDMVT complétés par la cartographie régionale de l'aléa mouvements de terrain¹). Finalement, les classes retenues sont les suivantes (Illustration 30 et Illustration 31) :

Score	Niveau de susceptibilité
6 à 8	faible
9 à 11	moyen
12 à 16	fort

Illustration 37 : Définition des niveaux de susceptibilité vis-à-vis des glissements de terrain liés à la présence de gypse triasique

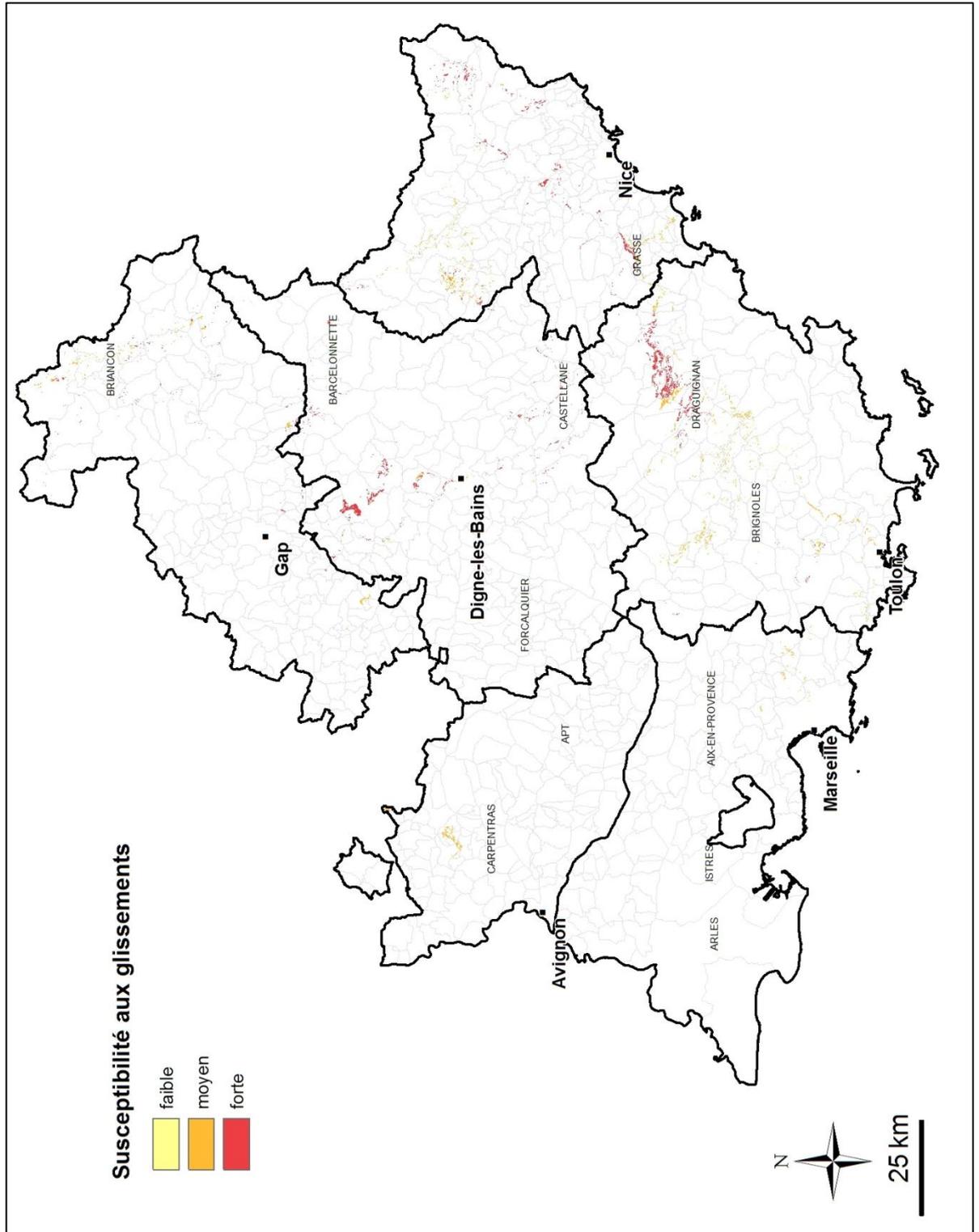


Illustration 38 : Carte régionale de la susceptibilité des formations aux glissements de terrain liés à la présence de gypse triasique

Cette carte montre que les secteurs concernés par l'aléa glissements de terrain lié à la présence de gypse sont très localisés.

Les formations classées en susceptibilité forte sont bien représentées dans le haut-Var, sur les communes de la Dracénie : Draguignan, Ampus, Bargemon, Claviers, Montferrat, et du Pays de Fayence : Seillans, Fayence, Tourrettes. Chateaudouble et Figanières étant concernées par des surfaces classées en susceptibilité moyenne.

Depuis Grasse jusqu'à Cannes, les surfaces exposées aux glissements de terrain dans les formations gypseuses sont classées en susceptibilité moyenne à forte (notamment à Grasse et Bar-sur-Loup). On trouve également des susceptibilités fortes dans la vallée de l'Esteron (à Bonson) et de la Vésubie (Lantosque) ainsi que dans la Roya.

Au nord de Digne, sur les communes de Bayons et de Barles, les formations gypseuses sont fortement susceptibles de produire des glissements de terrain.

Le tableau ci-dessous (Illustration 39) reprend les surfaces d'affleurements des formations gypseuses triasiques classées vis-à-vis de leur susceptibilité aux glissements de terrain, pour chaque département.

Département	Formation en susceptibilité faible vis-à-vis des glissements (km ²)	Formation en susceptibilité moyenne vis-à-vis des glissements (km ²)	Formation en susceptibilité forte vis-à-vis des glissements (km ²)	Pourcentage de surface exposée au risque de glissement (%)
Var	1,28	40,81	35,78	1,29
Alpes-Maritimes	0	21,45	24,37	1,06
Alpes de Haute-Provence	0	2,12	28,46	0,44
Hautes-Alpes	0	10,54	8,32	0,33
Vaucluse	0	6,45	0,00	0,18
Bouches-du-Rhône	0	3,81	0,00	0,07

Illustration 39 : Surfaces départementales concernées par des formations sensibles aux glissements liés à la présence de gypse triasique

6. Interprétation

Les cartes d'aléa obtenues permettent d'approcher le risque lié à la présence de gypse. Les enjeux considérés sont les enjeux présents sur le territoire et caractérisables à l'échelle du 1/50 000 : les intercommunalités (surface et zones urbanisées) et les communes (surfaces et zones urbanisées). Rappelons qu'en raison de l'échelle de l'étude qui est celle de la région (1/50 000), les cartes d'aléa obtenues concernent les secteurs où les formations gypseuses triasiques sont affleurantes ou subaffleurantes. En effet, la prise en compte de l'extension totale de ces formations nécessiterait une étude approfondie des données disponibles localement, type sondages (identification des terrains traversés) qui n'est pas envisageable au 1/50 000 sur un territoire aussi vaste.

6.1. CROISEMENT DES ZONES DE SUSCEPTIBILITE AVEC LES INTERCOMMUNALITES

Il est intéressant d'analyser plus en détail l'exposition des intercommunalités présentes sur le territoire régionale à l'aléa effondrement/glissement lié au gypse triasique. Plusieurs croisements ont été réalisés : croisement surface d'aléa/surface intercommunale et surface d'aléa/surface intercommunale urbanisée (Illustration 40, Illustration 41 et Illustration 42). L'analyse du risque sur la surface totale de l'intercommunalité permet d'avoir une vision de l'exposition des enjeux existant (zones urbanisées) mais également sur les enjeux à venir (surfaces urbanisables). Pour chaque croisement, les 10 intercommunalités les plus exposées sont mises en évidence.

Ces cartes montrent que les surfaces exposées à l'aléa glissement sont moins étendues que celles concernées par l'aléa effondrement. D'autre part, que ce soit pour l'aléa effondrement ou glissement, et que l'on considère les surfaces totales ou urbanisées, certaines intercommunalités apparaissent toujours dans la liste des 10 intercommunalités les plus exposées. Il s'agit de : Pôle Azur Provence (Grasse), le Pays de Fayence, l'aire Dracénoise. L'intercommunalité de Pôle Azur Provence est particulièrement touchée avec près de 31 % de sa surface urbanisée et 19 % de sa surface totale exposées à une susceptibilité moyenne vis-à-vis des effondrements, et près de 7 % de sa surface urbanisée fortement exposée aux glissements de terrain. La Vallée de l'Esteron est la plus concernée par l'aléa glissement de terrain lié au gypse triasique, avec presque 21 % de sa surface urbanisée en susceptibilité forte.

Nom	Suscept. moy (%)	Suscept. forte (%)
Pôle Azur Provence	19	0,46
Dracénoise	15	1,15
Comté de Provence	14	0,16
Cœur du Var	8	0,00
Provence d'Argens en Verdon	9	0,01
Fayence	8	0,64
La Motte du Caire-Turriers	3	1,93
Verdon-Mont Major	4	0,01
Sophia-Antipolis	4	0,23
Cians Var	4	0,12

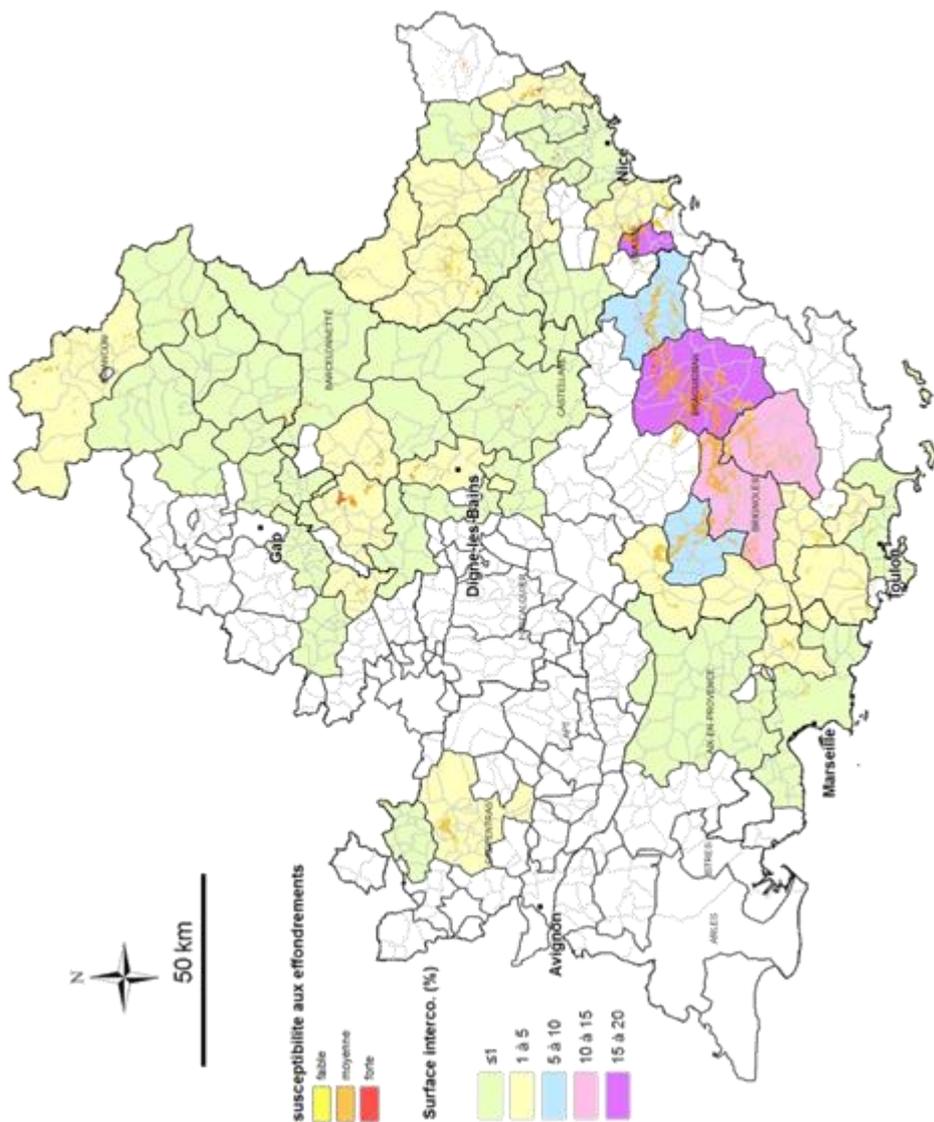


Illustration 40 : Pourcentage de surface intercommunale exposée à l'aléa effondrement lié au gypse triasique

Nom	Suscept. moy (%)	Suscept. forte (%)	Surface urbanisée exposée (%)
Pôle Azur Provence	30,8	1,0	31,8
Fayence	23,5	1,2	24,8
Dracénoise	18,0	3,1	22,0
Vallée de l'Estéron	20,0	1,0	21,0
Verdon-Mont Major	15,9	0,3	16,1
Comté de Provence	13,8	0,0	14,0
Cœur du Var	10,2	0,0	13,3
Cians Var	13,2	0,0	13,2
Vésubie-Mercantour	6,1	1,6	7,7
Sophia-Antipolis	6,4	0,2	6,6

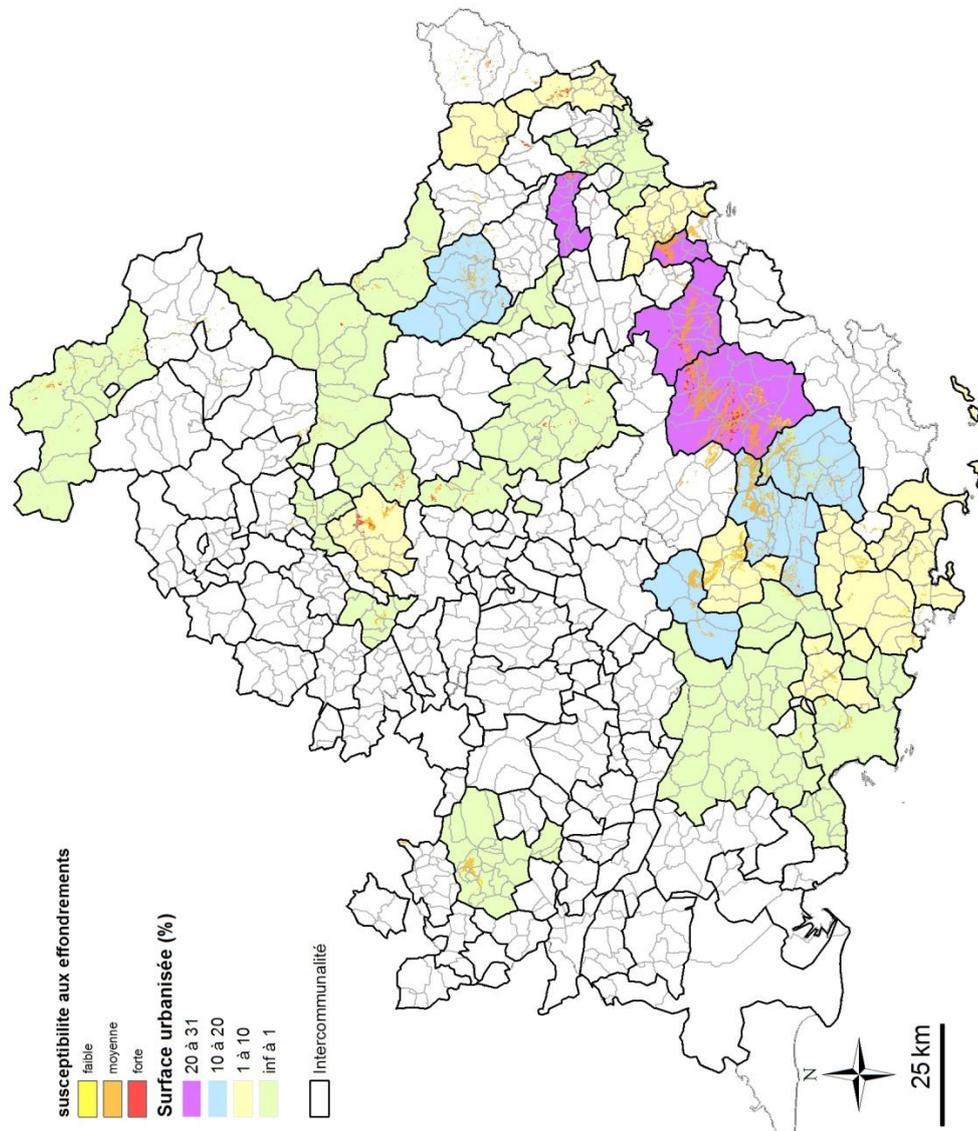


Illustration 41 : Pourcentage de surface intercommunale urbanisée exposée à l'aléa effondrement lié au gypse triasique

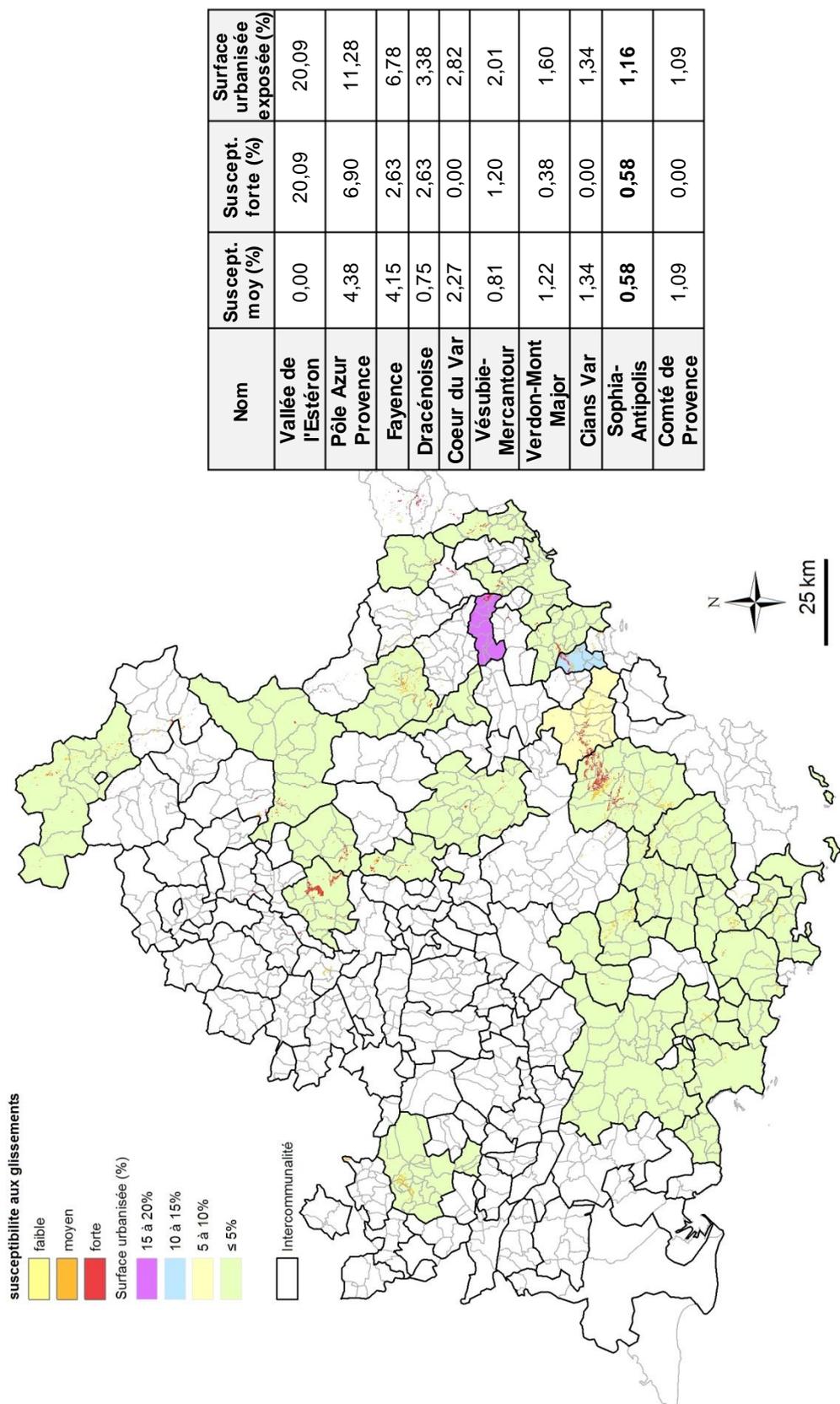


Illustration 42 : Pourcentage de surface intercommunale urbanisée exposée à l'aléa glissement lié au gypse triasique

6.2. CROISEMENT DES ZONES SENSIBLES AVEC LES COMMUNES

Une quinzaine de croisements a été testée afin d'illustrer l'exposition des communes à l'aléa glissement/effondrement lié à la présence de gypse. Les surfaces communales totales/urbanisées ont été croisées avec les cartes d'aléa moyen/fort de chaque aléa, glissement et effondrement. Pour chaque carte, les 10 communes les plus affectées ont été identifiées. Les résultats figurent en annexe 2.

La carte de l'illustration 43 est l'une de ses cartes. La classe moyenne est la plus représentée sur la carte de susceptibilité aux effondrements. Certaines communes sont affectées sur plus de 50 % de leur surface urbanisée par une susceptibilité moyenne ; toutes sont situées dans le Var. C'est le cas de Bargemon, Lorgues ou encore La Verdière au nord.

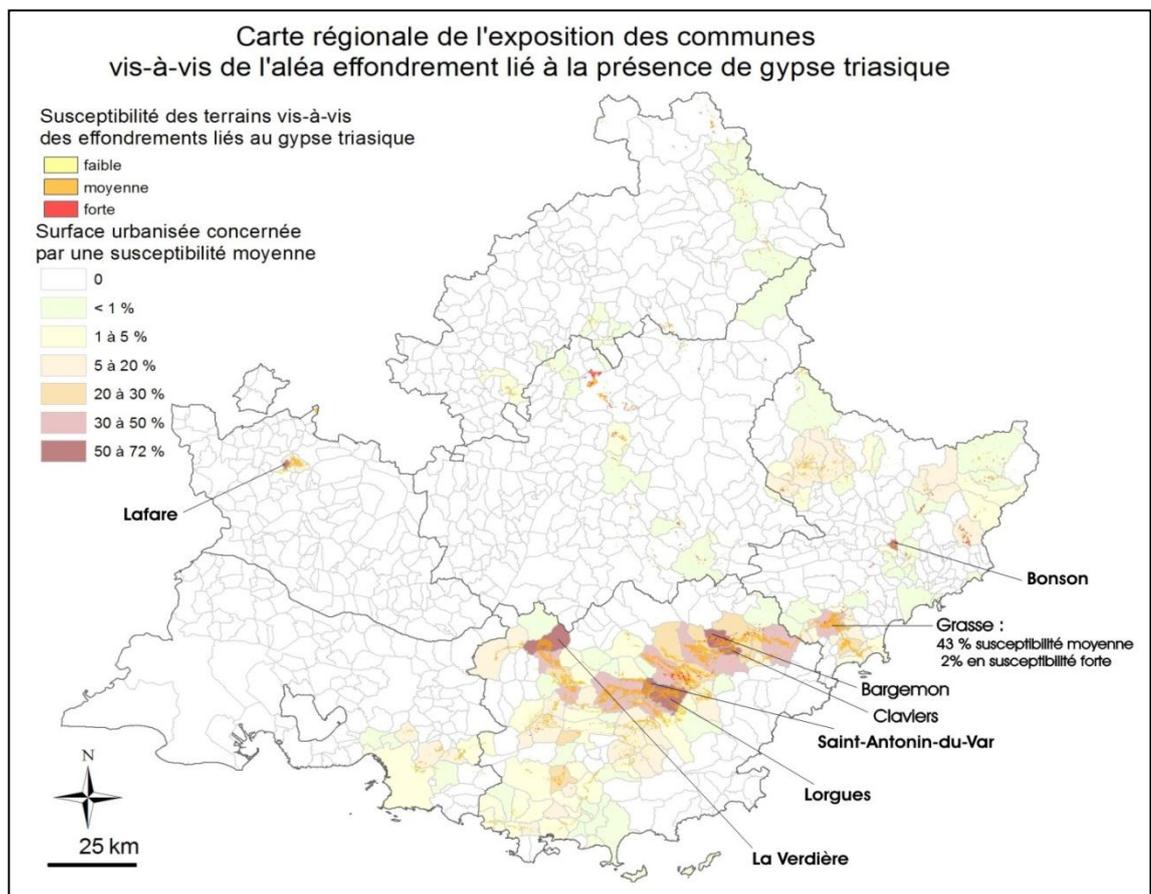


Illustration 43 : Exposition des communes vis-à-vis de l'aléa effondrement lié à la présence de gypse

Il ressort de l'analyse de toutes les cartes qu'un ensemble de communes se distingue dans la liste des 10 communes les plus concernées, que ce soit par l'aléa effondrement ou glissement, sur les surfaces urbanisées ou communales. Ces communes sont les communes de :

- dans le Var : Bargemon, Clapiers, Draguignan, Seillans,
- dans les Alpes-Maritimes : Grasse, Bonson
- dans les Alpes de Haute-Provence : Bayons
- dans le Vaucluse : Lafare

7. Rédaction de fiches techniques

A l'issue de l'étude, et au vu de l'analyse simplifiée du risque réalisée, il est apparu pertinent de proposer des modèles de fiches d'aide à la gestion du risque de mouvements de terrain (type effondrement ou glissement) lié à la présence de gypse triasique. Ces fiches ont pour but de répondre aux questions que sont amenées à se poser les collectivités lorsqu'elles sont confrontées à un tel événement. Une des caractéristiques des effondrements est qu'ils apparaissent souvent de façon brutale, sans qu'aucun signe annonciateur n'ait pu être détecté en surface.

Deux communes ont été choisies pour faire l'objet d'une fiche. Le choix s'est basé sur l'exposition de la commune vis-à-vis de l'aléa effondrement/glisement, mais également sur les caractéristiques géologiques. C'est ainsi que les communes de Grasse et Brignoles ont été choisies.

Sur Grasse, les deux phénomènes - glissements et effondrements - liés à la présence de gypse sont présents et se produisent fréquemment, les formations gypseuses affleurent largement. Le secteur fait notamment l'objet de travaux de recherche menés par Géoazur sur les mouvements de terrain de grande ampleur (cf. paragraphe 2.2.1). De nombreuses données sur les mouvements de terrain sont disponibles, et ce secteur fortement urbanisés présente des enjeux conséquents.

Sur Brignoles, les surfaces d'affleurement du gypse sont moins étendues car le gypse est recouvert par les formations superficielles de type alluvions. Or l'urbanisation est en expansion, et le risque est bien présent bien que moins évident.

Les fiches proposées sont en annexe 3. Pour chaque fiche les items proposés sont les suivants :

1. présentation de l'aléa effondrement/glisement lié à la présence de gypse et de son étendue sur le territoire régional ;
2. illustration des phénomènes observés sur la commune ;
3. moyens permettant de détecter les cavités souterraines : recensement des événements, les cartes d'aléa, les investigations ponctuelles (quelles méthodes ? Leurs limites, leurs coûts...);
4. mesures à prendre en cas d'évènement ;
5. intégration possible du risque dans les documents d'urbanisme ;
6. éléments de bibliographie et sites internet utiles.

L'étude régionale ainsi que les projets de fiches ont été présentés aux services techniques des communes concernées. Une réunion et avec les services en charge de l'urbanisme sur la commune de Grasse a été menée en collaboration avec Géoazur qui a présenté l'avancée des travaux de recherche sur les mouvements gravitaires présents sur la commune et les problématiques soulevées. Les retours sur le contenu

des fiches ont été positifs, et des compléments ont été apportés suite aux remarques des services. Ces fiches peuvent apporter une première aide précieuse auprès des communes et pourraient servir de base à un guide plus complet.

8. Conclusion

Les mouvements de terrain liés à la présence de gypse triasique se produisent de façon récurrente sur le territoire régional Provence-Alpes-Côte d'Azur. Même si certains secteurs sont plus touchés que d'autres, il apparaît que des évènements peuvent se produire soudainement à des endroits que l'on ne soupçonnait pas. Une analyse bibliographique poussée sur les caractéristiques des phénomènes a permis de bien comprendre les phénomènes glissements et effondrements liés à la présence de gypse triasique et d'illustrer ces phénomènes sur la région. Ce premier travail a également mis en évidence les facteurs physiques naturels favorisant l'apparition des évènements. Une méthodologie basée sur la caractérisation des facteurs à l'échelle régionale a été élaborée. Les facteurs pris en compte sont la probabilité de présence du gypse (lithologie, accidents tectoniques), les facteurs permettant la dissolution du gypse (mode de circulation des eaux souterraines dans le gypse, taux d'infiltration des eaux superficielles), et les facteurs aggravant la dissolution (précipitations, activité sismique). Dans le cadre de l'évaluation de l'aléa glissement, la pente des versants a également été prise en compte.

A l'issue de cette première phase, des cartes d'aléa glissement et effondrement ont été tracées et une analyse de l'exposition des enjeux, tels que les intercommunalités ou les communes, a été réalisée. Il ressort que des intercommunalités telles que la communauté de commune du Pôle Azur Provence, l'aire Dracénoise, le Pays de Fayence ou encore la vallée de l'Estéron sont particulièrement touchées, que l'on considère la surface intercommunale totale ou leurs surfaces urbanisées. Parmi ces intercommunalités, les communes de Bonson (Alpes-Maritimes), Bayons (Alpes de Haute-Provence), Draguignan (Var) ou encore Grasse (Alpes-Maritimes) sont exposées à l'aléa effondrement/glissement de terrain lié au gypse triasique.

Des modèles de fiches d'aide à la gestion du risque ont été proposés et présentés aux communes de Grasse et Brignoles. Ces fiches abordent les problèmes que peuvent se poser les communes vis-à-vis de ces phénomènes : comment détecter les cavités (quelles méthodes ? Limites ? Coût ?), quelles mesures à prendre en cas d'évènement ? Comment intégrer ce risque dans l'urbanisme ? Ces fiches, bien qu'elles soient encore incomplètes, ont le mérite d'apporter une première aide précieuse pour les communes, et posent également les bases de départ de ce que pourrait être un guide régional sur la gestion du risque mouvements de terrain lié à la présence de gypse triasique.

9. Bibliographie

Bénévent E., Maury E. (1927). Les grandes pluies de l'automne 1926 et la catastrophe de Roquebillière (Alpes-Maritimes). *Revue de géographie alpine*. Tome 15 N°1. pp. 151-157.

Brotto M. (1986). Karst de gypse et accumulations de tufs en Queyras. Méditerranée, Troisième série, Tome 57, 1-2-1986. Travertins LS et évolution des paysages holocènes dans le domaine méditerranéen. pp. 118-125.

Chardon (1996). La mesure de l'érosion dans le gypse/anhydrite des Alpes françaises du Nord. Méthodes et état des connaissances. *Revue de géographie alpine*. Tome 84 N°2. pp. 45-56.

Des Garets E., Mathon C. (2001) – Cavités souterraines naturelles et anthropiques associées au gypse dans les départements des Bouches-du-Rhône et du Var – 223 pages, 81 figures, 6 annexes, 41 planches.

Dessene J.L. (1978). Falaise bordant, à l'ouest, le lac de Besse-sur-Issole (Var). Etude des risques d'effondrement et définition des travaux de confortement. Rapport final 78SGN433PRC, 29 pages, 3 illustrations, 1 annexe.

Fiolet F. (2000). L'étude de l'instabilité d'un versant en milieu méditerranéen, l'exemple du versant de Bargemon (Var) - Mémoire de maîtrise. Université de Picardie Jules Vernes, 174 p., 11 ill., 43 photographies, 11 cartes, 5 annexes.

Julian M., Rossi G. (1971). Recherches géomorphologiques dans la région de Sospel (Alpes-Maritimes). *Revue de géographie alpine*. Tome 59 N°4. pp. 543-564.

Julian M., Nicod J. (1990). Catastrophes naturelles et risques afférents aux terrains gypseux (Alpes et Provence). *Revue de géographie alpine*. Tome 78 N°1-3. pp. 157-173.

LCPC/INERIS (2002). Guide technique pour l'évaluation des aléas liés aux cavités souterraines. Collection environnement, les risques naturels. 170 p.

LCPC (2004). Guide technique pour la détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques. Collection environnement, les risques naturels. 130 p.

Marie S., Barchi P., Caous J.Y., Schomburgk S., Vinchon C. (2004). Cartographie préliminaire de l'aléa « mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines, suite à de fortes pluviosités ». Arrondissement de Cambrai (Nord). Rapport final BRGMRP-52959-FR, 73 pages, 36 ill., 1 CD-Rom, 1 planche hors-texte.

Marçot N., de Michele M. avec la collaboration de F. Rivet (2011) - Mise en évidence d'indices d'effondrements potentiels sur la zone de Draguignan (Var) suite

aux intempéries du 15 juin 2010, par analyse interférométrie radar. Rapport final BRGM/RP-59323-FR - 69 pages, 39 ill.

Nicod J. (1967). Recherches morphologiques en Basse-Provence calcaire. Thèse. Faculté des Lettres et des Sciences Humaines d'Aix-en-Provence. 559 p, 138 ill.

Nicod J. (1976). Annales géographiques. Karsts des gypses et des évaporites associées. Annales de Géographie. T. 85, n°471. pp. 513-554.

Nicod J. (1985). Instabilité du fond des petites dépressions karstiques. Annales de la Société géologique de Belgique, T. 108, pp 65-68.

Nicod J. (2007). Deux lacs à problèmes du centre-Var : le Grand Loucien de la Roquebrussanne et le lac de Besse-sur-Issole. Etude de géographie physique, n°XXXIV, pp 43-51.

Nicod J. (2008). Toujours les problèmes du lac de Besse-sur-Issole. Etude de géographie physique, n°XXXIV, pp 45-50.

Perriaux L. (1927). Les mouvements de terrain dans les Alpes niçoises, en novembre 1926. Annales de Géographie. T. 36, n°200. pp. 115-124.

Pomerol C, Lagabrielle Y., Renard M. (2000). Eléments de géologie, édition Masson, 746 pages.

Potherat P. (1996). Etude photo-interprétative appliquée à la détection de zones à effondrements potentiels, Le Trias Provençal de Fayence à Draguignan (Var) - CETE Méditerranée et LCPC. 8 p.

Quémart P., Pothérat P., De La Chapelle M. (1997). Détection par photo-interprétation de zones potentielles d'effondrements liées aux cavités souterraines dans le gypse. CETE Méditerranée et LCPC. 38 p, 6 ill., 2 annexes

Rivet F. avec la collaboration de Mathon C., Brevot P.-A. (2007) - Cartographie régionale de l'aléa mouvements de terrain au 1/100 000 – Année 1 : Etude de la Provence calcaire et rhodanienne. Rapport BRGM/RP-55710-FR, 97 p., 84 illustrations, 1 annexe, 12 cartes hors-texte.

Rivet F. avec la collaboration de Mathon C. et Draperi N. (2009) - Cartographie régionale de l'aléa mouvements de terrain au 1/100 000 – Année 2 : Etude de la Zone alpine. Rapport BRGM/RP-56762-FR, 140 p., 56 illustrations, 1 annexe, 8 cartes hors-texte.

Rivet F. avec la collaboration de C. Mirgon, A. Navarro (2011) – Cartographie régionale de l'aléa mouvements de terrain au 1/100 000 – Année 3 : Etude de la Provence cristalline. Rapport BRGM/RP-59163-FR, 130 p., 54 ill. 8 cartes hors-texte.

Rovera G. (1993). Instabilité des versants et dissolution des évaporites dans les Alpes internes : l'exemple de la montagne de Friolin (Peisey-Nancroix, Savoie). *Revue de géographie alpine*. 1993, Tome 81 N°1. pp. 71-84.

Sedan O., Terrier M. avec la collaboration de Mirgon C. (1999) – Cartographie à 1/1 000 000 de l'aléa aux mouvements de terrain de la région PACA (Provence-Alpes-Côte-D'azur). Rapport BRGM R-40702, 22 p., 8 fig., 1 annexe.

Zerathe S., Lebourg, T. (2011). Evolution stages of large deep-seated landslides at the front of a subalpine meridional chain (Maritime-Alps, France), *Geomorphology*, doi:10.1016/j.geomorph.2011.10.006

Annexe 1

Définition de l'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR)

L'IDPR (Indice de développement et de persistance des réseaux)

L'idée que sous-tend l'IDPR découle des observations suivantes : l'organisation du réseau hydrographique est dépendante des formations géologiques qui le supportent. Dans l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène, de perméabilité nulle, seule la pente et la morphologie des reliefs guident la mise en place des cours d'eau. La recherche des talwegs ou lignes de plus grande pente qui par la gravité, rassemblent les eaux de ruissellement, doit donc conduire à la reproduction du réseau hydrographique. Or dans la réalité, ce réseau hydrographique théorique diffère du réseau naturel et cette différence traduit la complexité du milieu naturel. Les structures géologiques et la composition lithologique du sous-sol ont en effet une influence significative sur l'établissement des réseaux hydrographiques. La nature des surfaces des bassins a un rôle primordial sur le comportement hydrologique de ceux-ci, notamment en fonction de la lithologie, de la pédologie et de la couverture végétale. Ces paramètres influencent grandement la perméabilité et la rugosité de la surface, qui conditionnent à leur tour la vitesse du ruissellement et le rapport de l'écoulement sur l'infiltration, appelé aussi coefficient d'écoulement. La densité de drainage est donc un indicateur révélateur des propriétés des formations géologiques. Un bassin formé de matériaux très perméables aura en général une densité de drainage faible. A l'inverse, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodibles, comme des marnes ou des argiles, va souvent présenter une densité de drainage élevée. L'IDPR devient ainsi le moyen de quantifier ce rôle en comparant un réseau théorique établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène (indice de développement ID), au réseau naturel mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (de persistance des réseaux PR). L'indice de développement et de persistance des réseaux présente une métrologie de l'écart constaté entre les deux réseaux (BRGM, 2004).

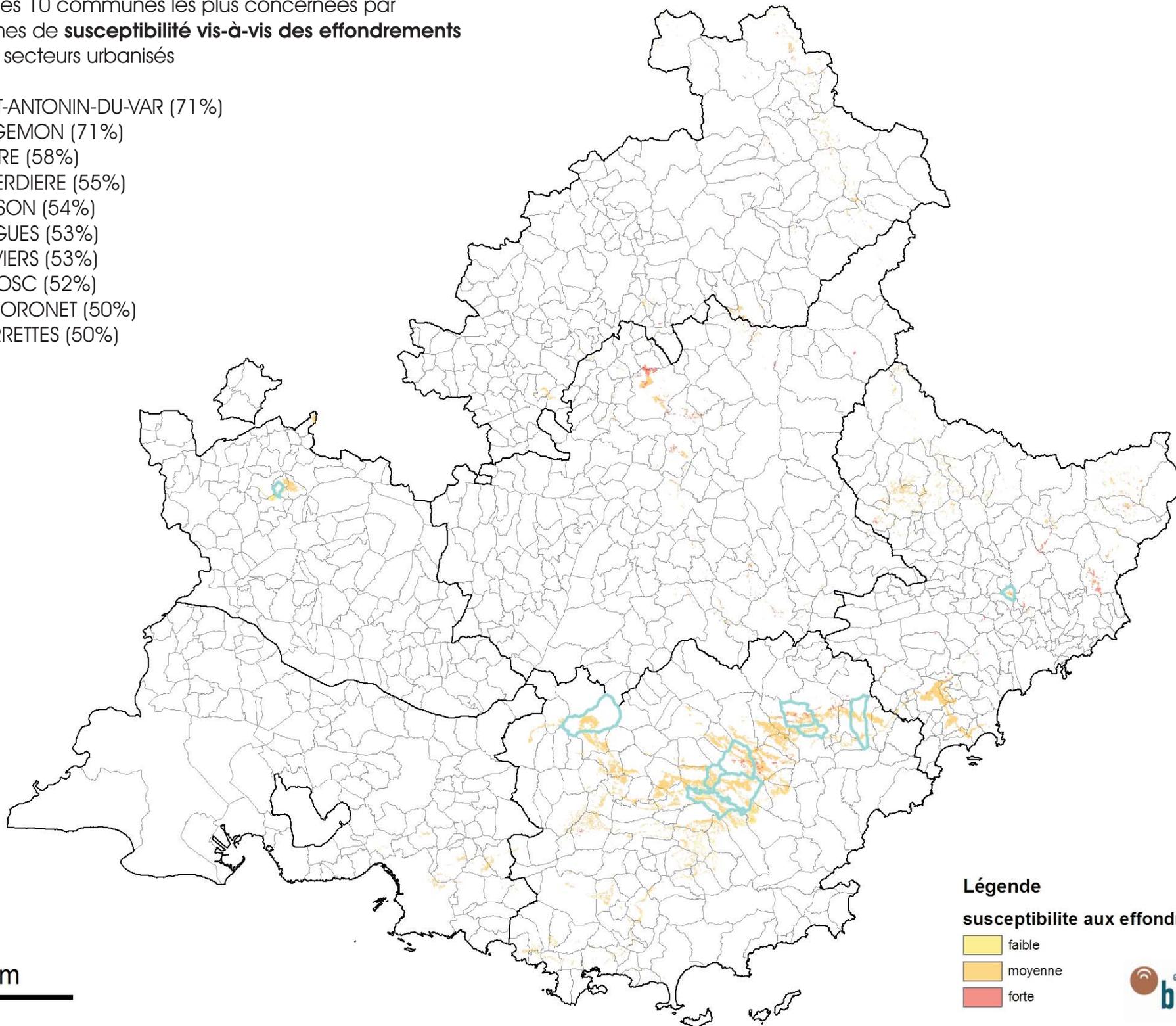
Annexe 2

Analyse du risque effondrement/glissement lié à la présence de gypse sur les communes



Liste des 10 communes les plus concernées par
les zones de **susceptibilité vis-à-vis des effondrements**
sur les secteurs urbanisés

- SAINT-ANTONIN-DU-VAR (71%)
- BARGEMON (71%)
- LAFARE (58%)
- LA VERDIERE (55%)
- BONSON (54%)
- LORGUES (53%)
- CLAVIERS (53%)
- FLAYOSC (52%)
- LE THORONET (50%)
- TOURRETTES (50%)



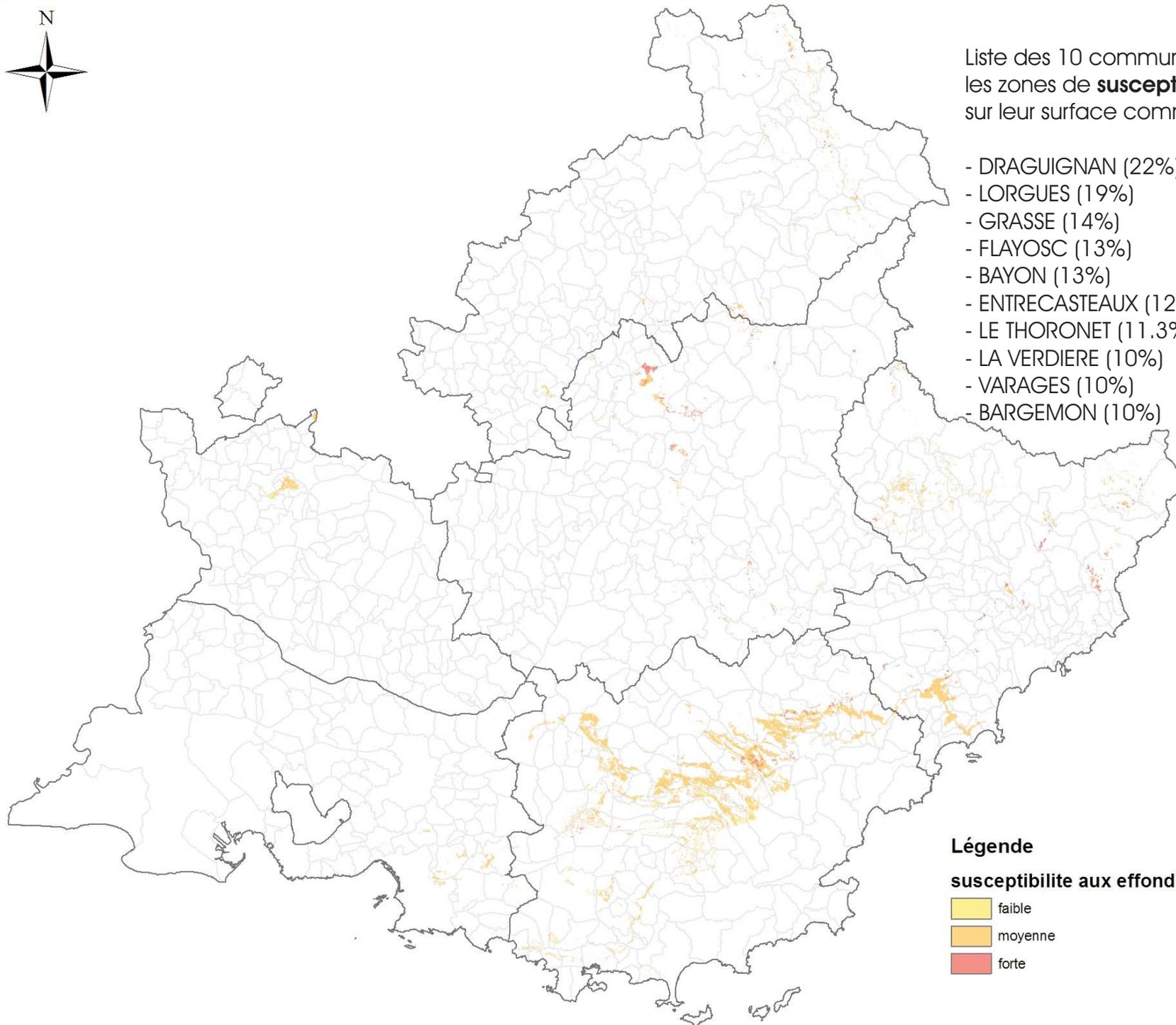
Légende
susceptibilité aux effondrements

	faible
	moyenne
	forte



Liste des 10 communes les plus concernées par les zones de **susceptibilité vis-à-vis des effondrements** sur leur surface communale

- DRAGUIGNAN (22%)
- LORGUES (19%)
- GRASSE (14%)
- FLAYOSC (13%)
- BAYON (13%)
- ENTRECASTEAUX (12.5%)
- LE THORONET (11.3%)
- LA VERDIERE (10%)
- VARAGES (10%)
- BARGEMON (10%)

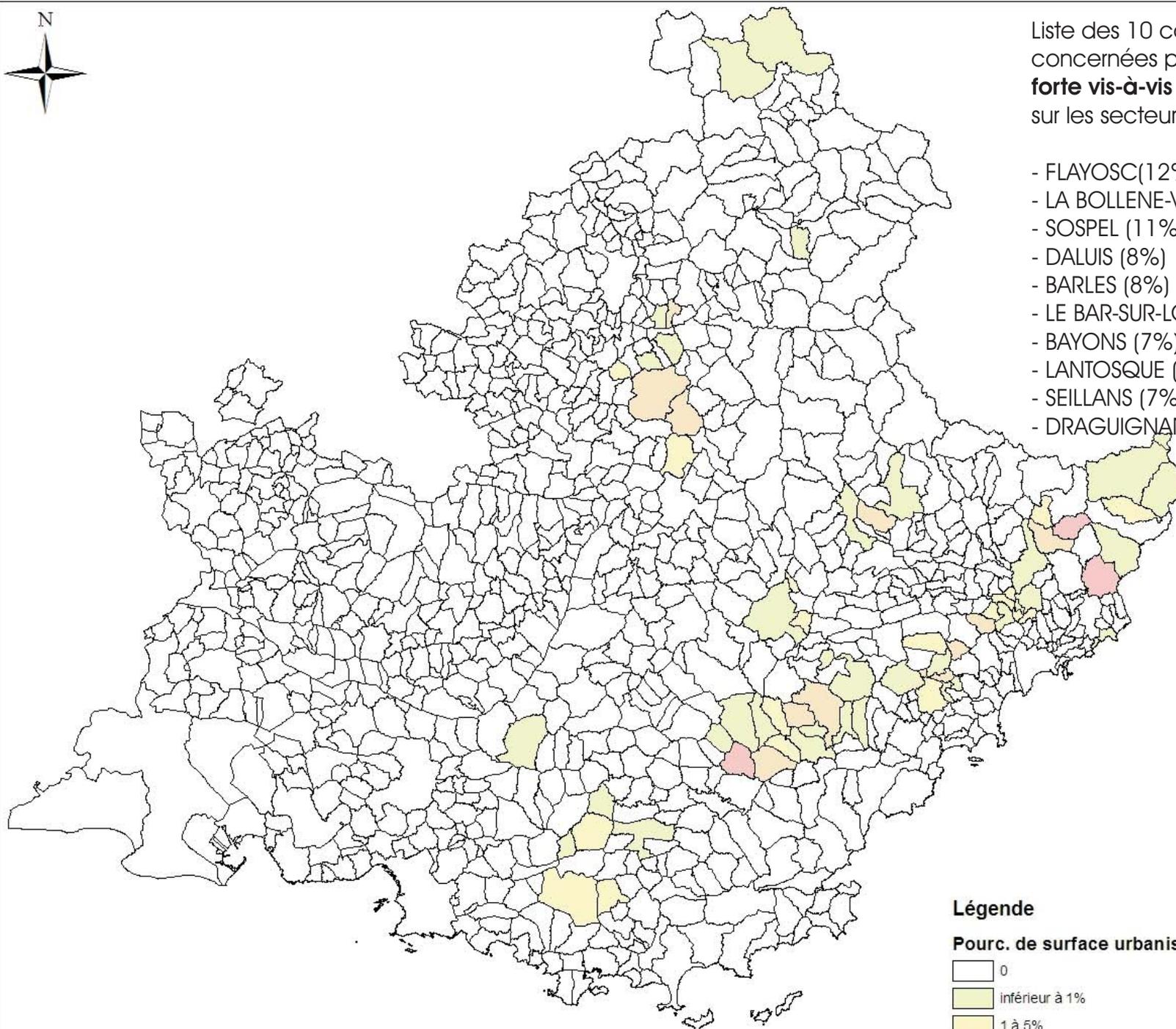


Légende

susceptibilite aux effondrements

-  faible
-  moyenne
-  forte

50 km



Liste des 10 communes les plus concernées par les zones de **susceptibilité forte vis-à-vis des effondrements** sur les secteurs urbanisés

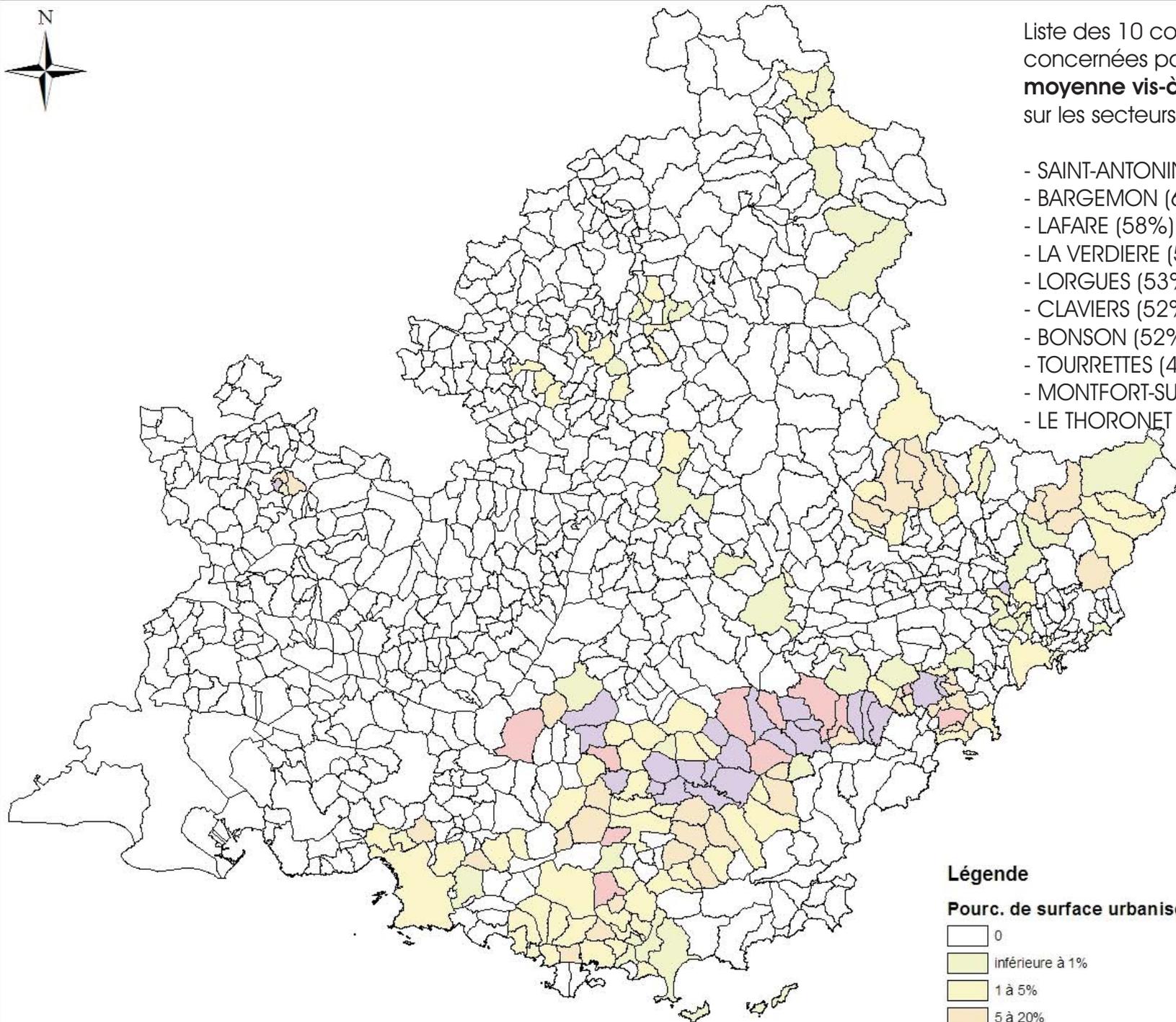
- FLAYOSC (12%)
- LA BOLLENE-VESUBIE (11%)
- SOSPEL (11%)
- DALUIS (8%)
- BARLES (8%)
- LE BAR-SUR-LOUP (8%)
- BAYONS (7%)
- LANTOSQUE (7%)
- SEILLANS (7%)
- DRAGUIGNAN (6%)

Légende

Pourc. de surface urbanisée concernée par une suscept. forte



50 km



Liste des 10 communes les plus concernées par les zones de **susceptibilité moyenne vis-à-vis des effondrements** sur les secteurs urbanisés

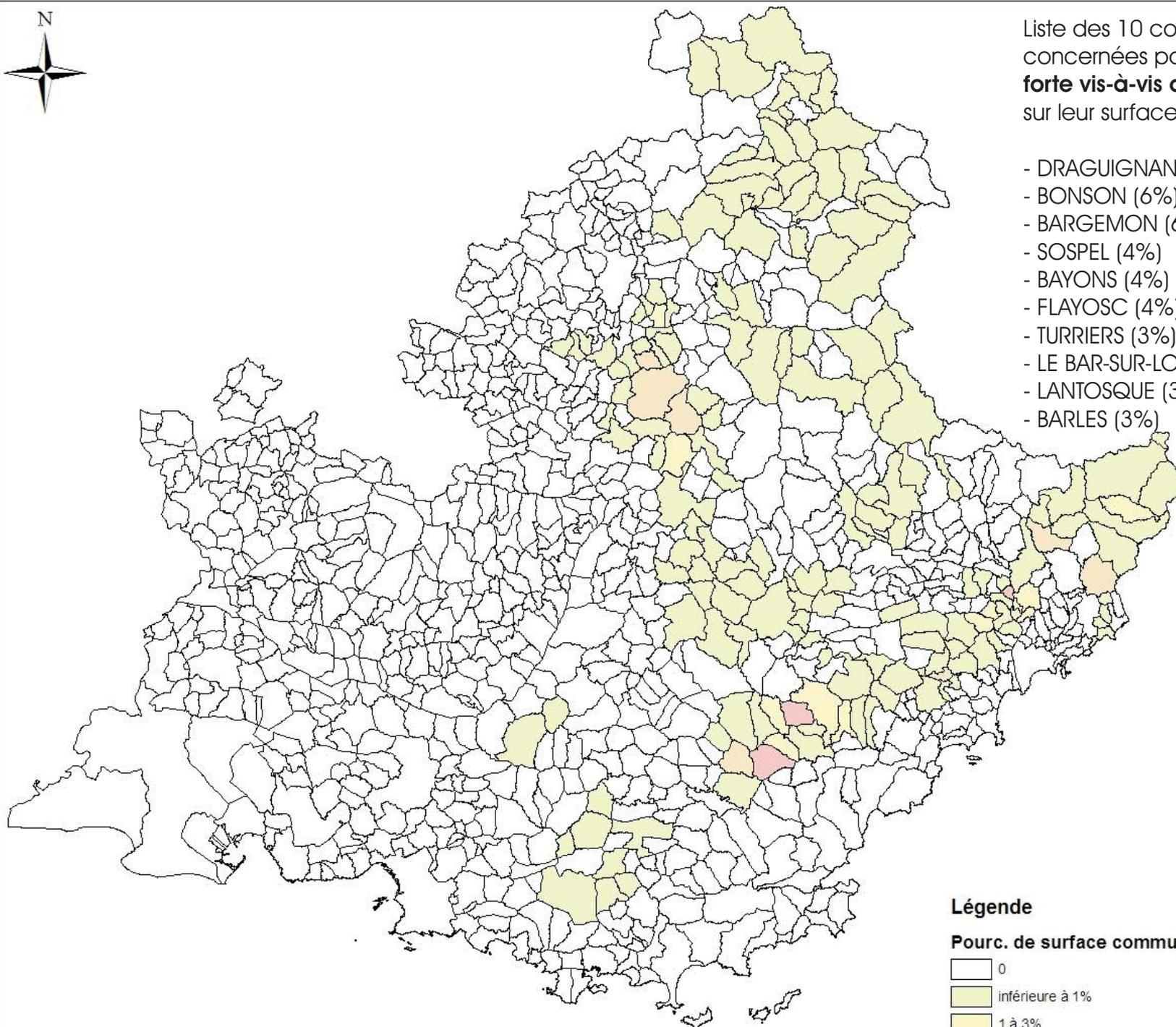
- SAINT-ANTONIN-DU-VAR (71%)
- BARGEMON (65%)
- LAFARE (58%)
- LA VERDIERE (55%)
- LORGUES (53%)
- CLAVIERS (52%)
- BONSON (52%)
- TOURRETTES (49%)
- MONTFORT-SUR-ARGENS (49%)
- LE THORONET (45%)

Légende

Pourc. de surface urbanisée concernée par une suscept. moyenne



50 km



Liste des 10 communes les plus concernées par les zones de **susceptibilité forte vis-à-vis des effondrements** sur leur surface communale

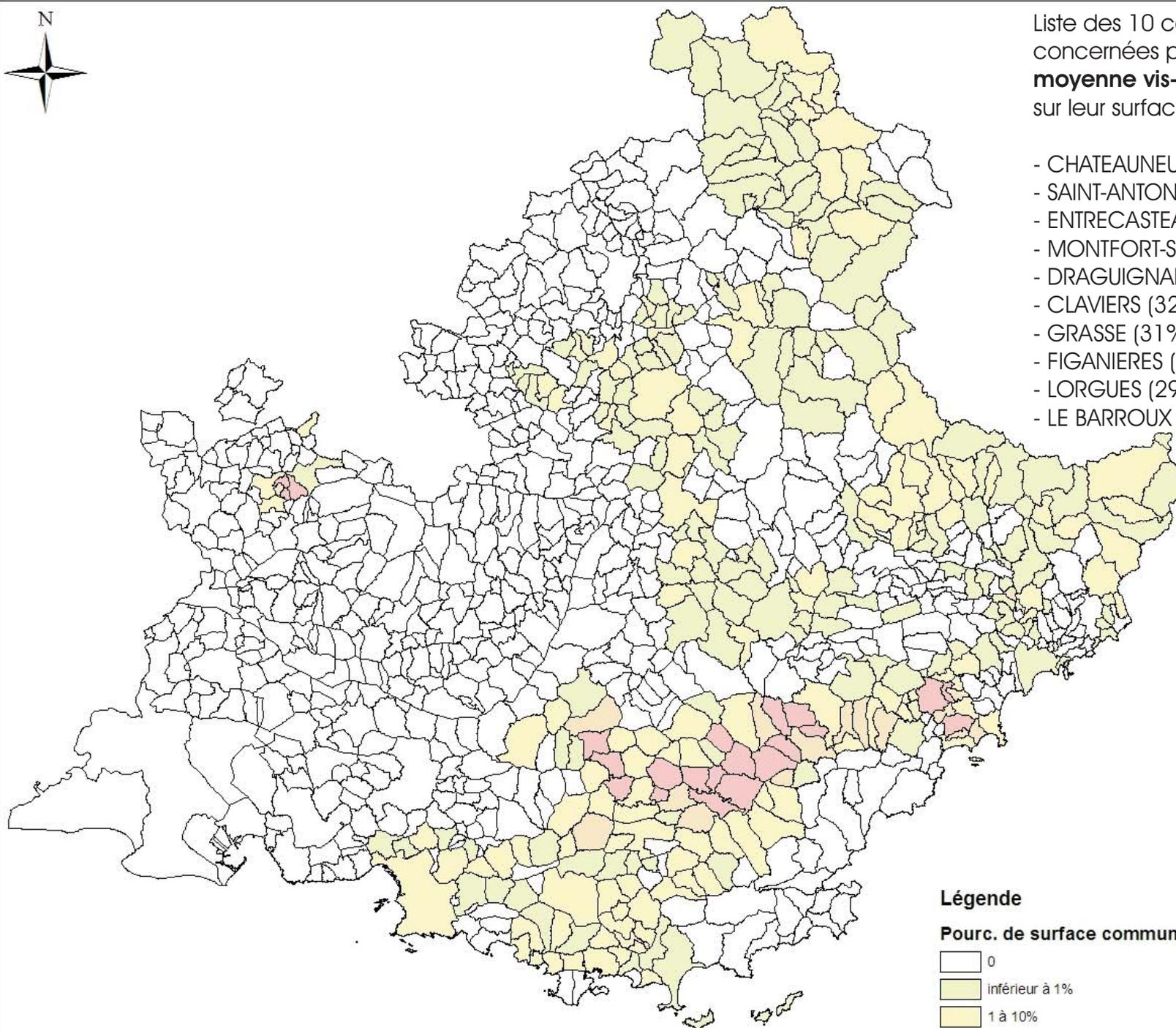
- DRAGUIGNAN (6%)
- BONSON (6%)
- BARGEMON (6%)
- SOSPEL (4%)
- BAYONS (4%)
- FLAYOSC (4%)
- TURRIERS (3%)
- LE BAR-SUR-LOUP (3%)
- LANTOSQUE (3%)
- BARLES (3%)

Légende

Pourc. de surface communale concernée par une suscept. forte



50 km



Liste des 10 communes les plus concernées par les zones de **susceptibilité moyenne vis-à-vis des effondrements** sur leur surface communale

- CHATEAUNEUF-GRASSE (50%)
- SAINT-ANTONIN-DU-VAR (50%)
- ENTRECASTEAUX (38%)
- MONTFORT-SUR-ARGENS (35%)
- DRAGUIGNAN (34%)
- CLAVIERS (32%)
- GRASSE (31%)
- FIGANIERES (30%)
- LORGUES (29%)
- LE BARROUX (29%)

Légende

Pourc. de surface communale concernée par une suscept. moyenne

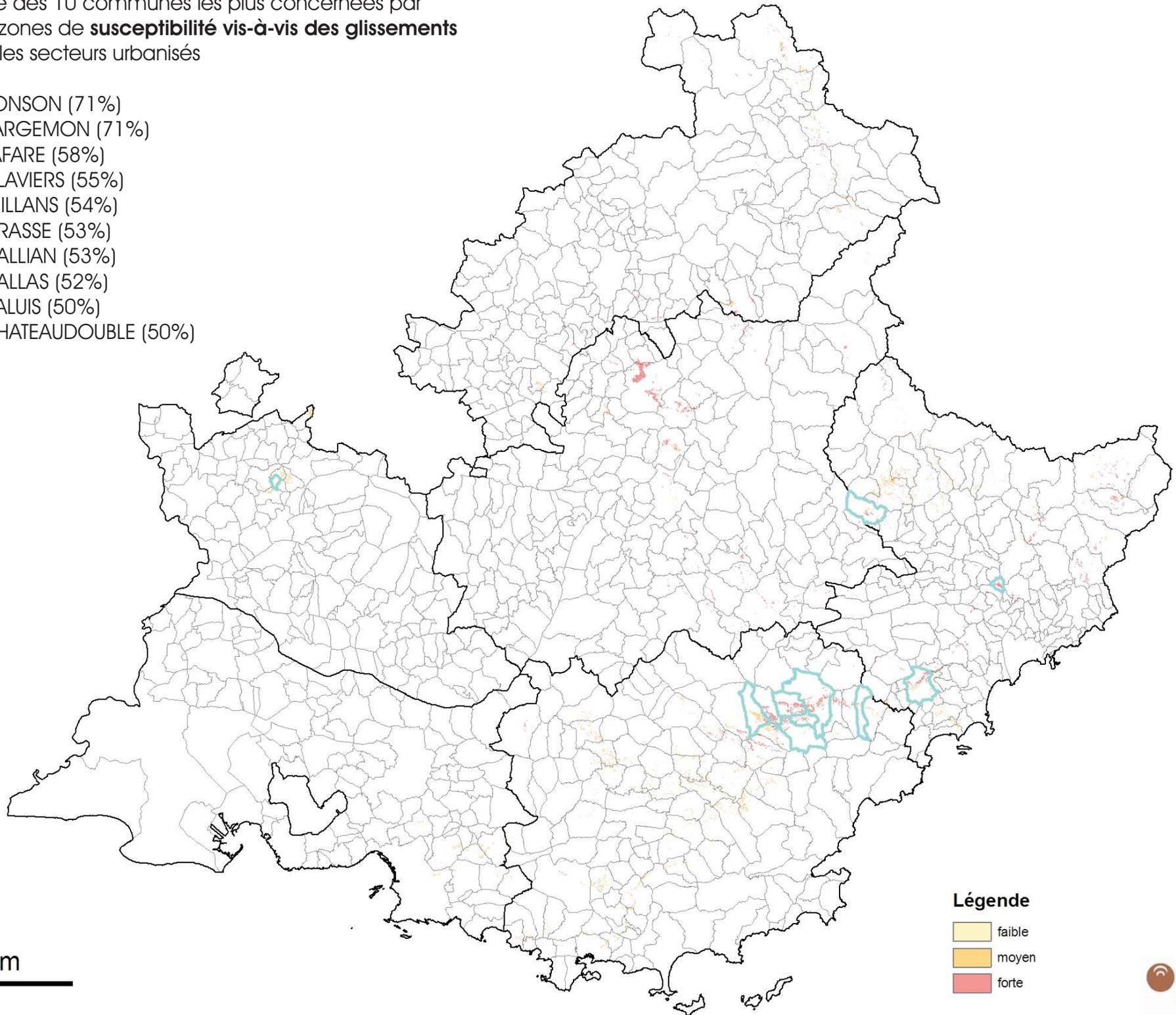


50 km



Liste des 10 communes les plus concernées par
les zones de **susceptibilité vis-à-vis des glissements**
sur les secteurs urbanisés

- BONSON (71%)
- BARGEMON (71%)
- LAFARE (58%)
- CLAVIERS (55%)
- SEILLANS (54%)
- GRASSE (53%)
- CALLIAN (53%)
- CALLAS (52%)
- DALUIS (50%)
- CHATEAUDOUBLE (50%)



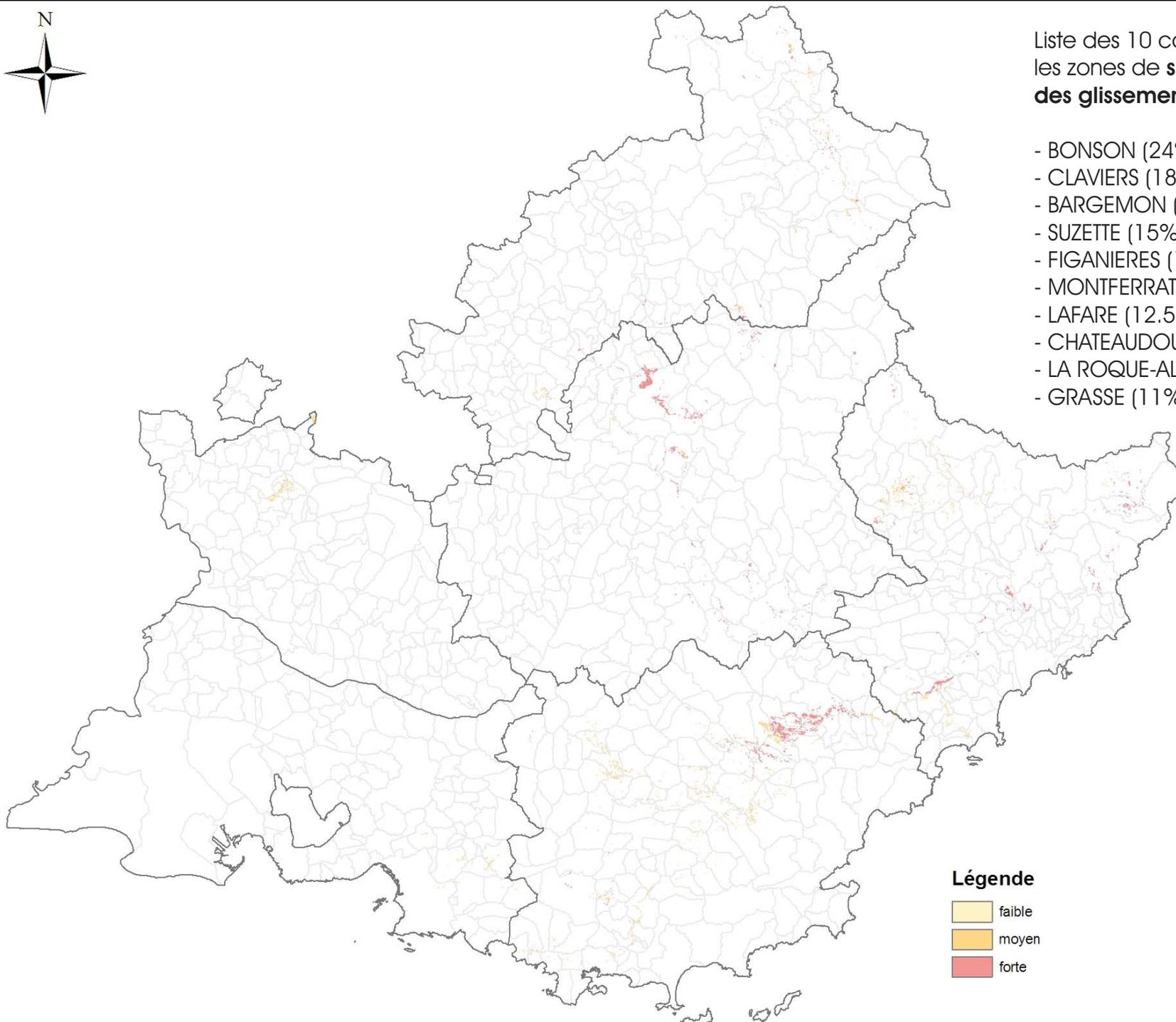
Légende

- faible
- moyen
- forte



Liste des 10 communes les plus concernées par les zones de **susceptibilité vis-à-vis des glissements** sur la surface communale totale

- BONSON (24%)
- CLAVIERS (18%)
- BARGEMON (15%)
- SUZETTE (15%)
- FIGANIERES (14%)
- MONTFERRAT (13%)
- LAFARE (12.5%)
- CHATEAUDOUBLE (12%)
- LA ROQUE-ALRIC (12%)
- GRASSE (11%)



Légende

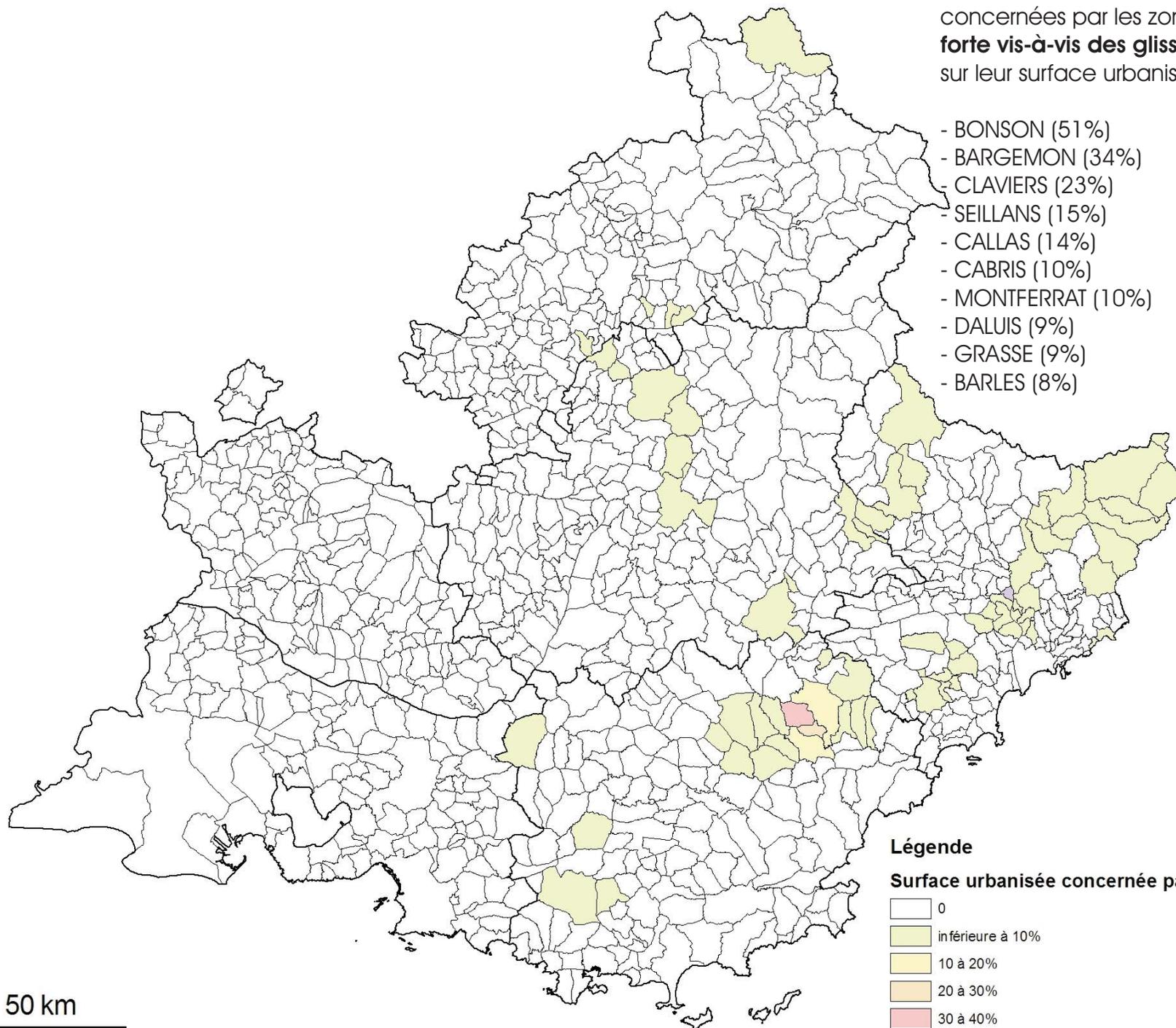
- faible
- moyen
- forte

50 km



Liste des 10 communes les plus concernées par les zones de **susceptibilité forte vis-à-vis des glissements** sur leur surface urbanisée

- BONSON (51%)
- BARGEMON (34%)
- CLAVIERS (23%)
- SEILLANS (15%)
- CALLAS (14%)
- CABRIS (10%)
- MONTFERRAT (10%)
- DALUIS (9%)
- GRASSE (9%)
- BARLES (8%)



Légende

Surface urbanisée concernée par une suscept. GL moy. (%)

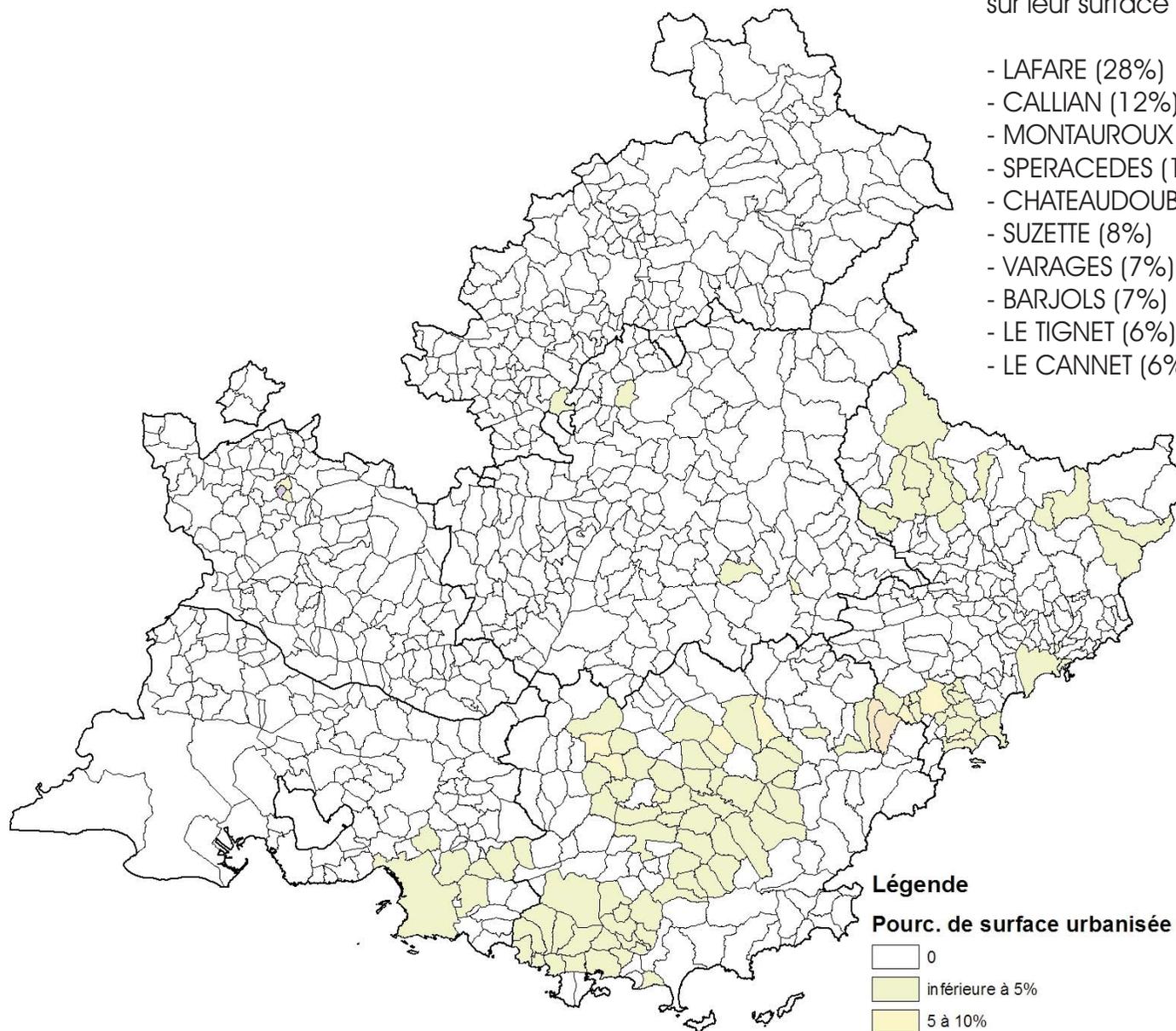
- 0
- inférieure à 10%
- 10 à 20%
- 20 à 30%
- 30 à 40%
- 40 à 50%

50 km



Liste des 10 communes les plus concernées par les zones de **susceptibilité moyenne vis-à-vis des glissements** sur leur surface urbanisée

- LAFARE (28%)
- CALLIAN (12%)
- MONTAUROUX (12%)
- SPERACEDES (11%)
- CHATEAUDOUBLE (9%)
- SUZETTE (8%)
- VARAGES (7%)
- BARJOLS (7%)
- LE TIGNET (6%)
- LE CANNET (6%)

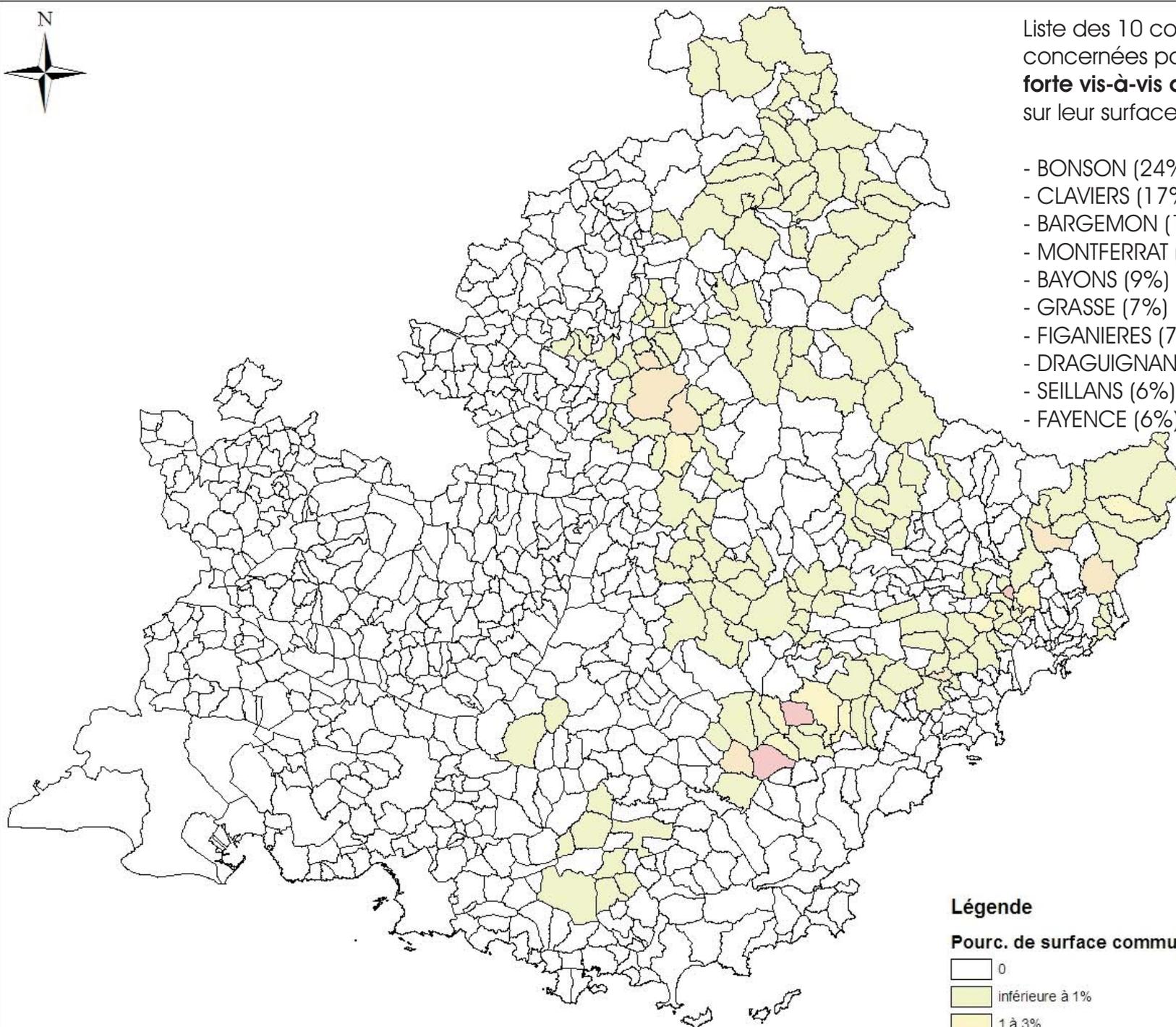


Légende

Pourc. de surface urbanisée concernée par une suscept. GL moy.

- 0
- inférieure à 5%
- 5 à 10%
- 10 à 15%
- 15 à 20%
- 20 à 30%

50 km



Liste des 10 communes les plus concernées par les zones de **susceptibilité forte vis-à-vis des glissements** sur leur surface communale

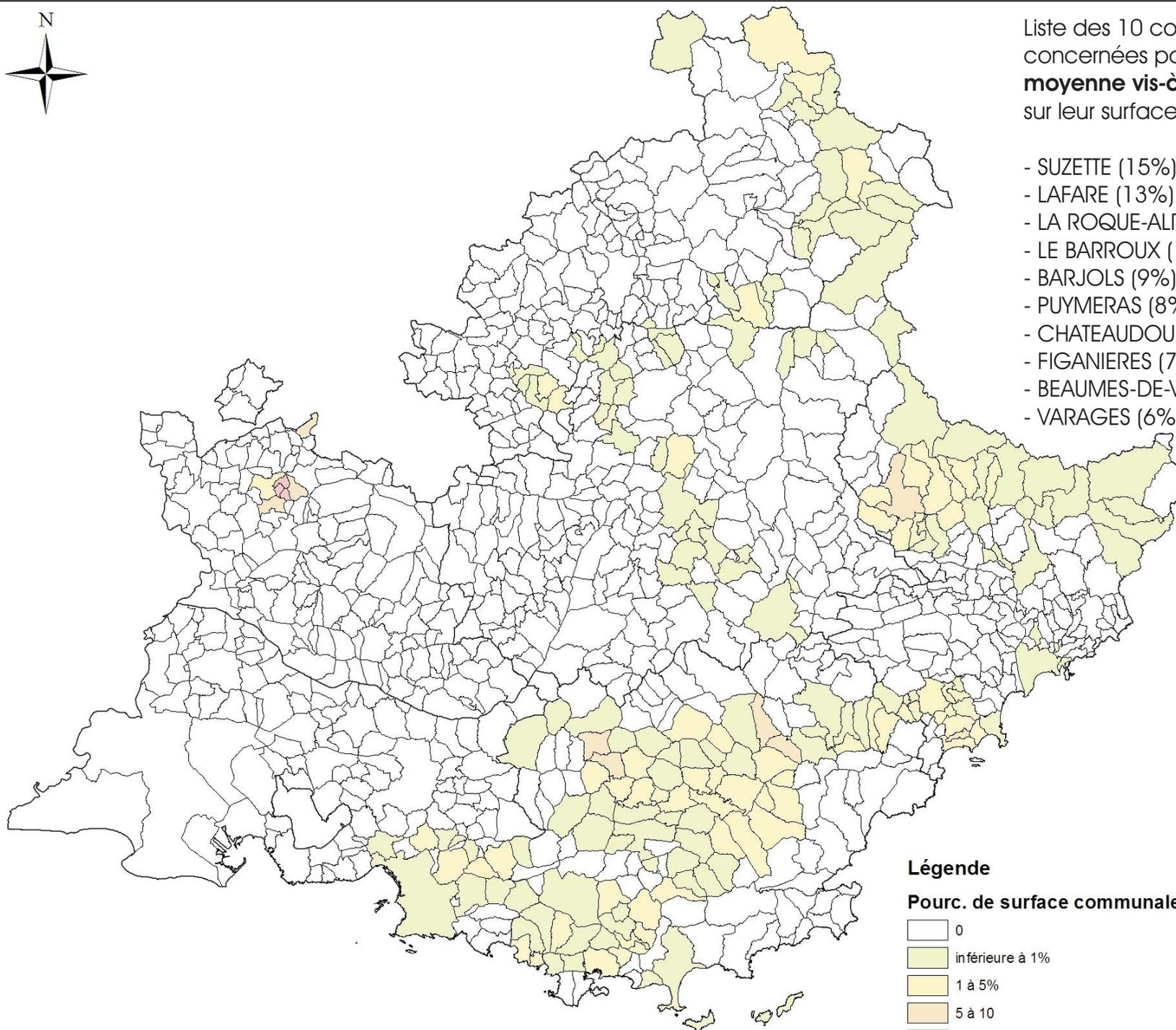
- BONSON (24%)
- CLAVIERS (17%)
- BARGEMON (15%)
- MONTFERRAT (13%)
- BAYONS (9%)
- GRASSE (7%)
- FIGANIERES (7%)
- DRAGUIGNAN (6%)
- SEILLANS (6%)
- FAYENCE (6%)

Légende

Pourc. de surface communale concernée par une suscept. forte



50 km

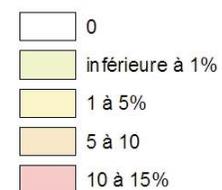


Liste des 10 communes les plus concernées par les zones de **susceptibilité moyenne vis-à-vis des glissements** sur leur surface communale

- SUZETTE (15%)
- LAFARE (13%)
- LA ROQUE-ALRIC (12%)
- LE BARROUX (10%)
- BARJOLS (9%)
- PUYMERAS (8%)
- CHATEAUDOUBLE (8%)
- FIGANIERES (7%)
- BEAUMES-DE-VENISE (6%)
- VARAGES (6%)

Légende

Pourc. de surface communale concernée par une suscept. GL moy

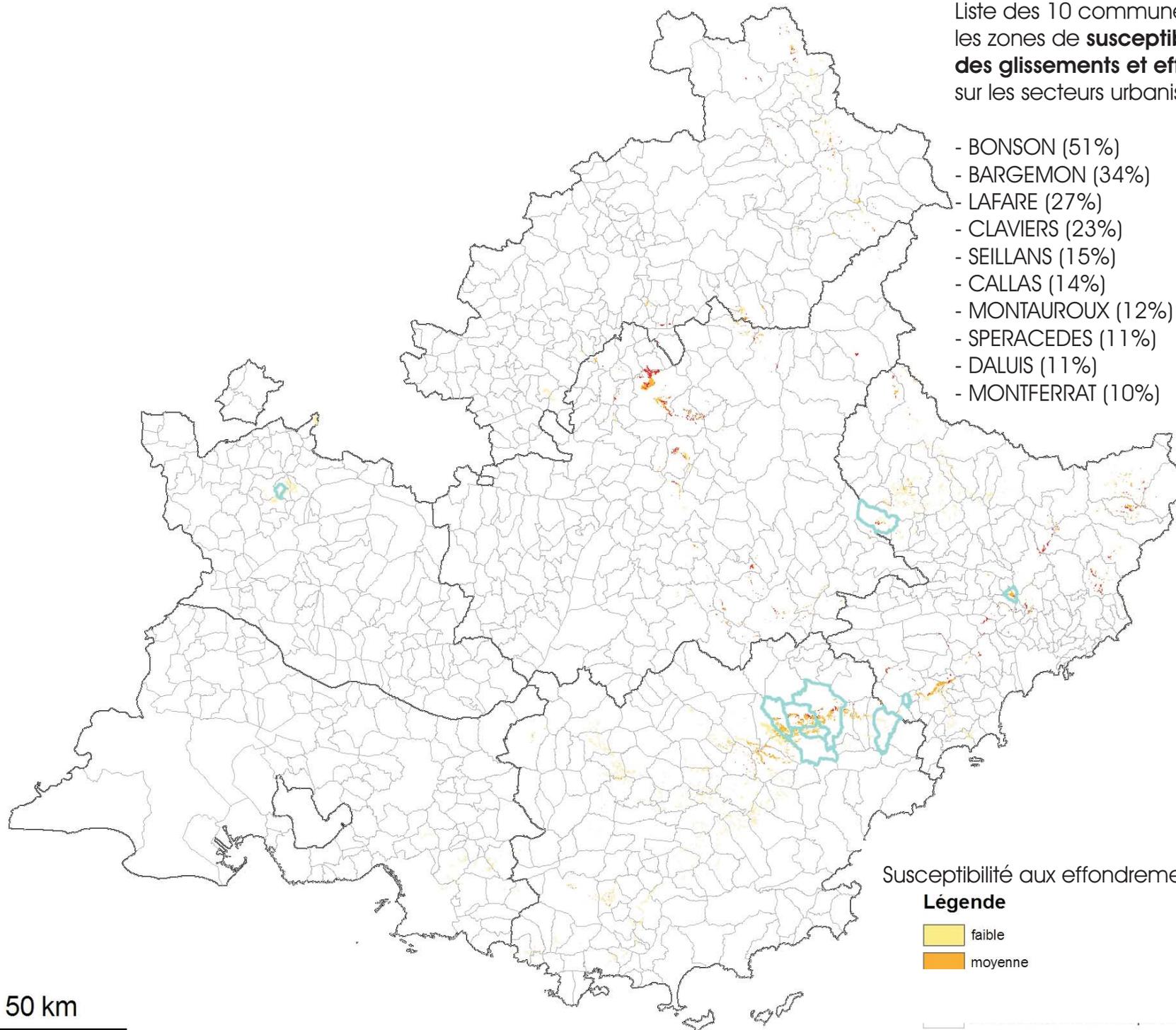


50 km



Liste des 10 communes les plus concernées par les zones de **susceptibilité vis-à-vis des glissements et effondrements** sur les secteurs urbanisés

- BONSON (51%)
- BARGEMON (34%)
- LAFARE (27%)
- CLAVIERS (23%)
- SEILLANS (15%)
- CALLAS (14%)
- MONTAUROUX (12%)
- SPERACEDES (11%)
- DALUIS (11%)
- MONTFERRAT (10%)



Susceptibilité aux effondrement et aux glissements

Légende

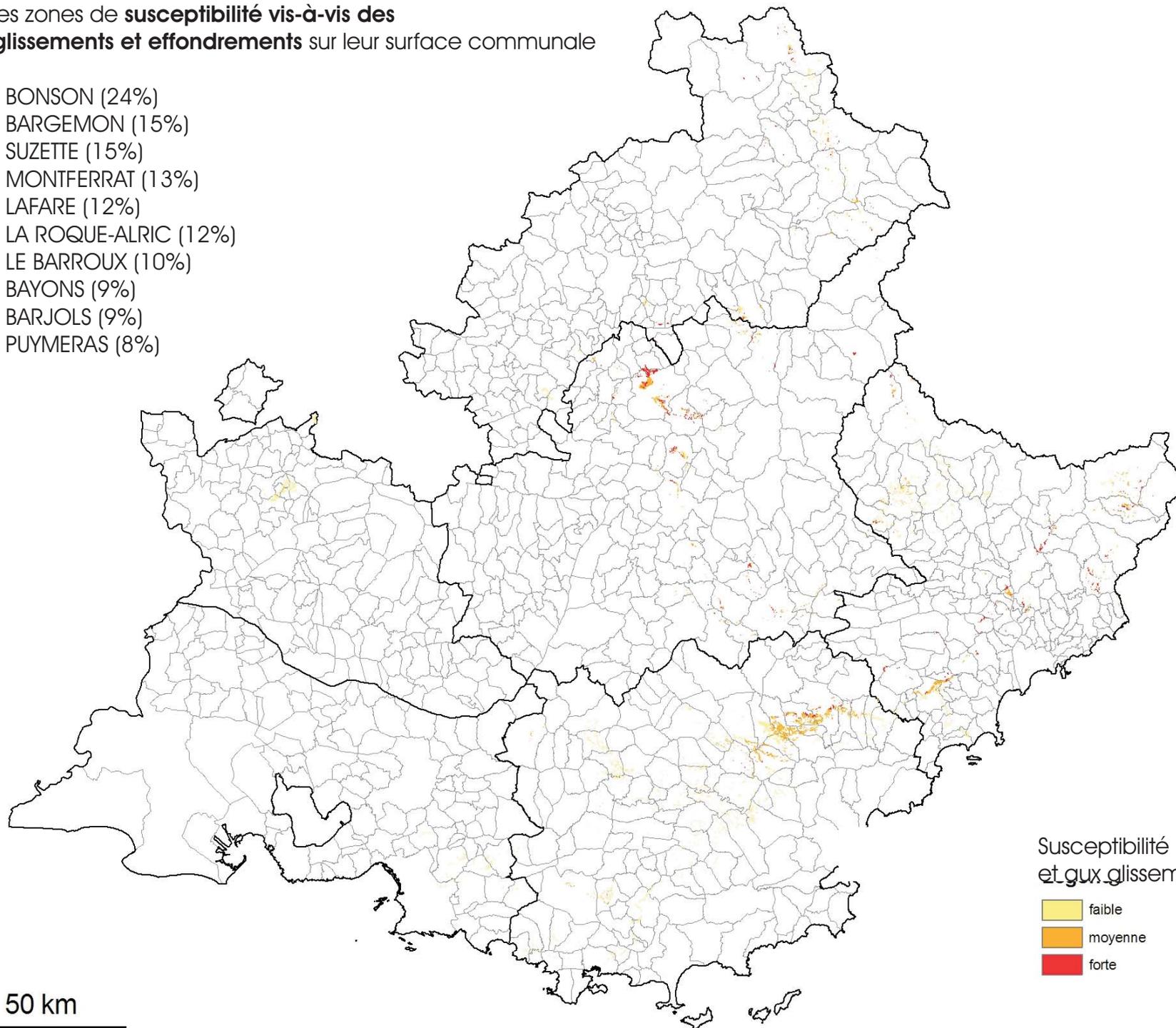
- faible
- moyenne

50 km



Liste des 10 communes les plus concernées par les zones de **susceptibilité vis-à-vis des glissements et effondrements** sur leur surface communale

- BONSON (24%)
- BARGEMON (15%)
- SUZETTE (15%)
- MONTFERRAT (13%)
- LAFARE (12%)
- LA ROQUE-ALRIC (12%)
- LE BARROUX (10%)
- BAYONS (9%)
- BARJOLS (9%)
- PUYSMERAS (8%)



Susceptibilité aux effondrements et aux glissements

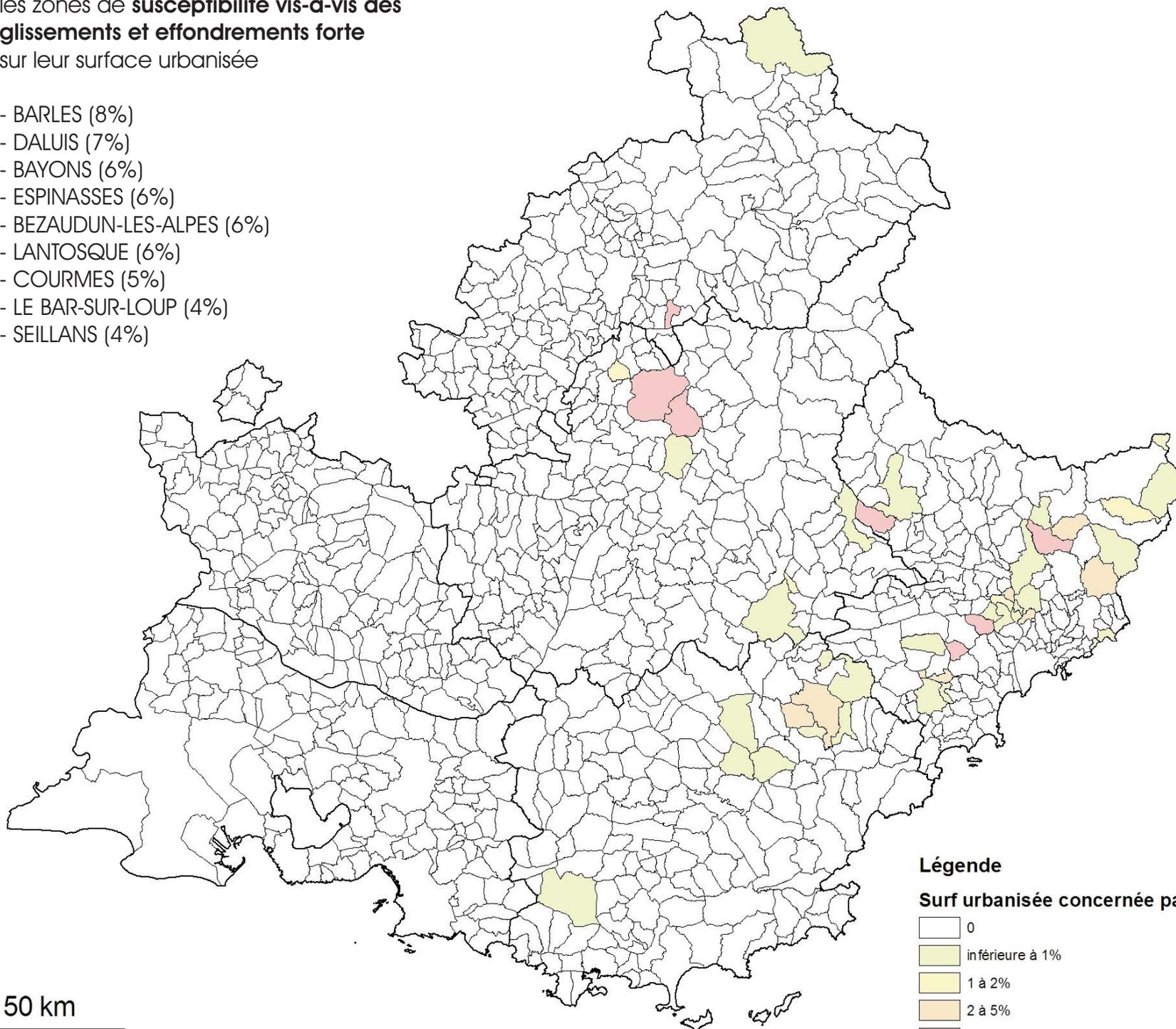
- faible
- moyenne
- forte

50 km



Liste des 10 communes les plus concernées par les zones de **susceptibilité vis-à-vis des glissements et effondrements forte** sur leur surface urbanisée

- BARLES (8%)
- DALUIS (7%)
- BAYONS (6%)
- ESPINASSES (6%)
- BEZAUDUN-LES-ALPES (6%)
- LANTOSQUE (6%)
- COURMES (5%)
- LE BAR-SUR-LOUP (4%)
- SEILLANS (4%)



Légende

Surf urbanisée concernée par une susc forte GL et GY

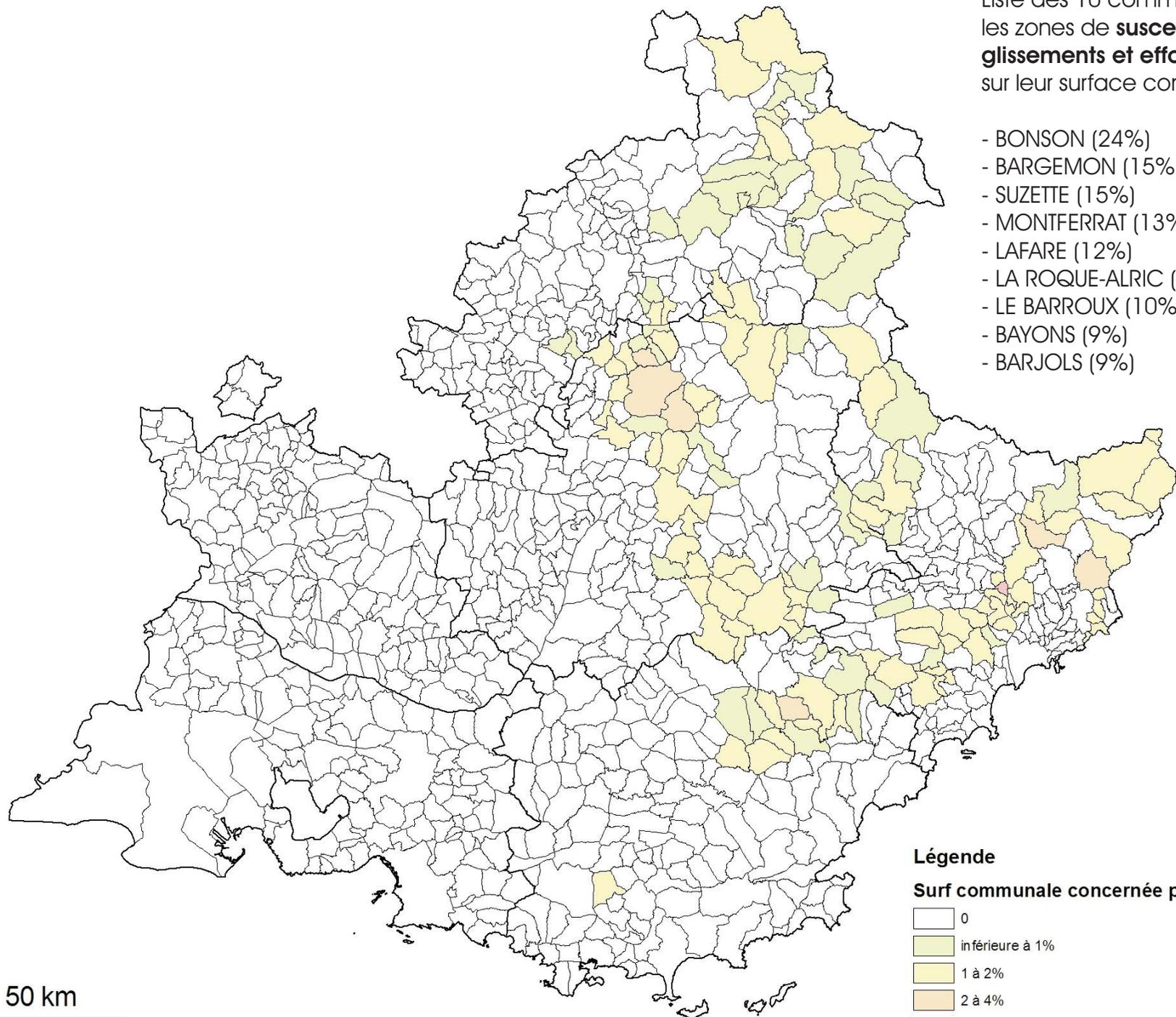
- 0
- inférieure à 1%
- 1 à 2%
- 2 à 5%
- 5 à 9%

50 km



Liste des 10 communes les plus concernées par les zones de **susceptibilité forte vis-à-vis des glissements et effondrements** sur leur surface communale

- BONSON (24%)
- BARGEMON (15%)
- SUZETTE (15%)
- MONTFERRAT (13%)
- LAFARE (12%)
- LA ROQUE-ALRIC (12%)
- LE BARROUX (10%)
- BAYONS (9%)
- BARJOLS (9%)



Légende

Surf communale concernée par une susc forte GL et GY

- 0
- inférieure à 1%
- 1 à 2%
- 2 à 4%
- 4 à 6%

50 km



Communes proposées

Lafare

Bonson

Grasse

Seillans

Claviers

Bargemon

Draguignan

Légende

susceptibilité aux effondrements

faible

moyenne

forte

Surf urbanisée concernée par une su:

50 km

Annexe 3

Fiches techniques sur deux communes pilotes :

- Grasse**

- Brignoles**

Le risque de mouvements de terrain lié au gypse triasique Fiche technique - BRIGNOLES -

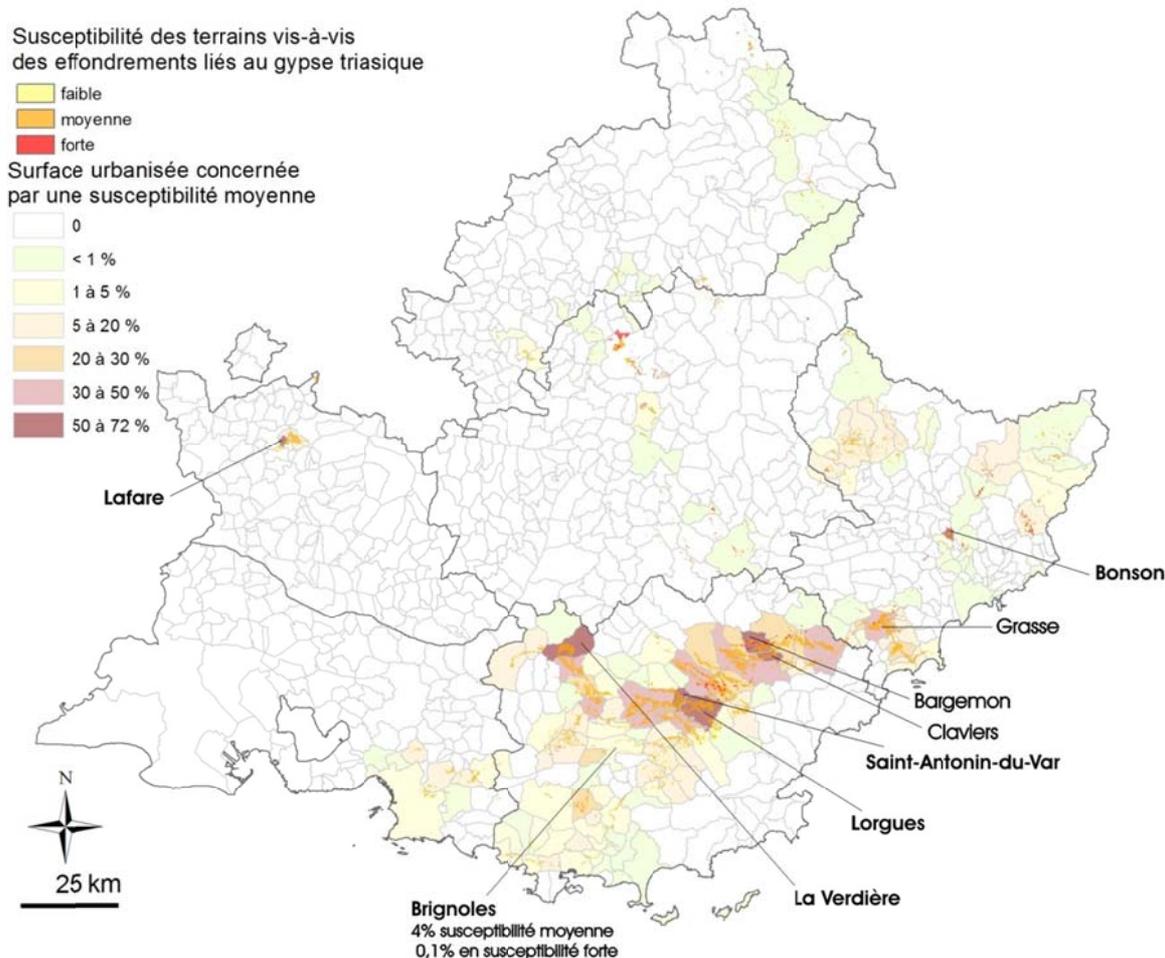
Les cavités de dissolution du gypse : phénomène régional

Le gypse et les formations qui lui sont généralement associées, dans le Trias de la région PACA, sont des matériaux qui présentent des propriétés particulières : roches tendres et facilement érodables par l'eau, haut degré de solubilité, mobiles car peu denses, avec un seuil de plasticité très bas leur donnant de fortes aptitudes à migrer verticalement ou latéralement. Une forte instabilité est dévolue aux affleurements d'évaporites, les formations superficielles sus-jacentes étant en outre souvent impliquées dans les mouvements de terrain. Localisés de manière parfois insolite vu la variété des modes de genèse, les terrains gypseux avec leurs roches associées, doivent faire l'objet d'une attention particulière car les instabilités qu'ils génèrent sont des menaces permanentes pour la sécurité des personnes et des biens : lorsqu'il s'agit de mouvements de terrain verticaux (fontis), ils se produisent le plus souvent sans signes avant-coureurs.

La présence de gypse au niveau des versants accentue leur instabilité naturelle liée à la pente et à la circulation de l'eau souterraine et/ou superficielle. Ces instabilités peuvent se traduire notamment par des glissements de terrain.

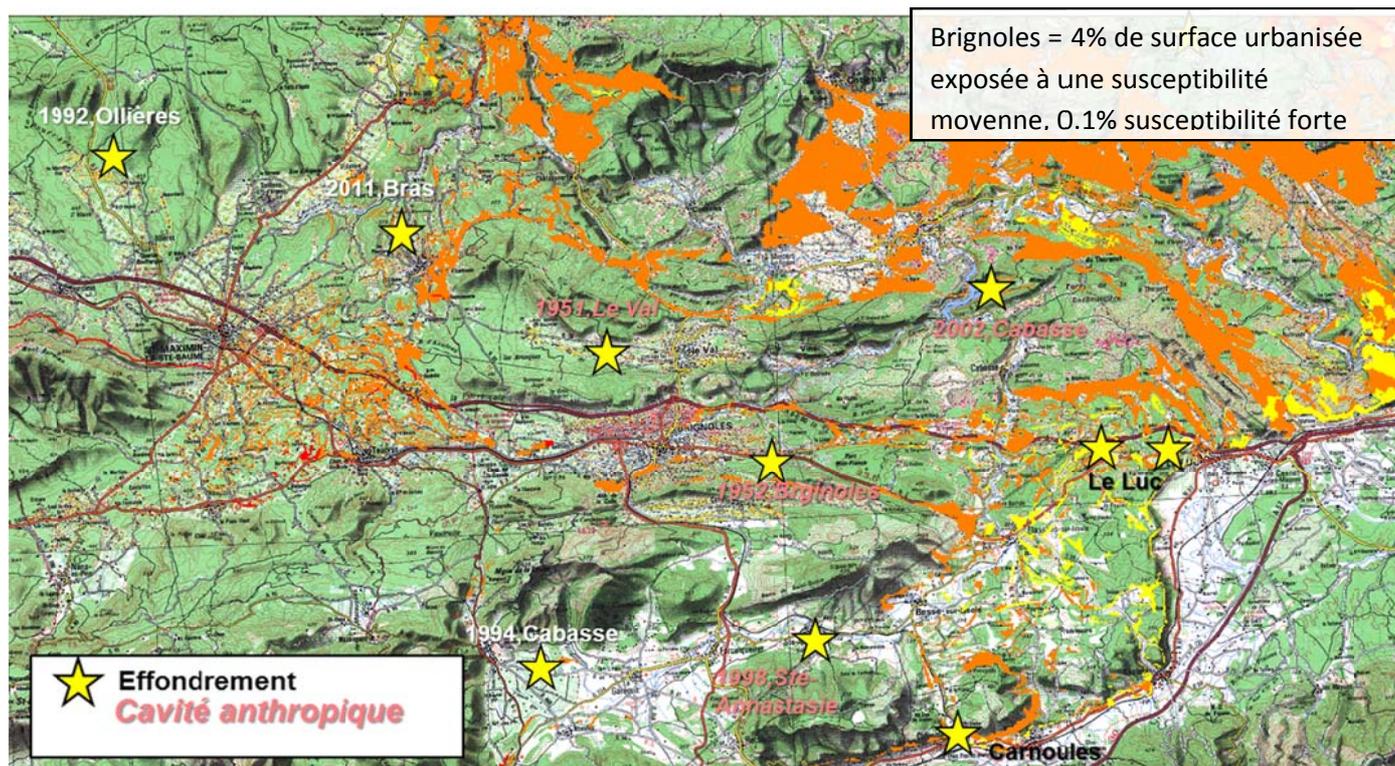
Sur la région PACA, le gypse triasique est présent dans tous les départements, mais sur des surfaces plus étendues dans le Var et le sud-ouest des Alpes-Maritimes. Seules les formations gypseuses affleurantes sont représentées sur la carte ci-dessous mais l'aléa concerne également les formations meubles qui les recouvrent (effondrement/soutirage).

Carte régionale de l'exposition des communes
vis-à-vis de l'aléa effondrement lié à la présence de gypse triasique



Carte issue de l'étude régionale sur l'aléa mouvements de terrain lié à la présence de gypse triasique, échelle de validité 1/50 000^e - Conseil Régional, DREAL, BRGM. Carte obtenue à partir des facteurs favorisant l'apparition des effondrements : probabilité de présence de gypse (formations géologiques, présence d'accidents tectoniques), facteurs permettant la dissolution du gypse (mode de circulation des eaux souterraines, taux d'infiltration des eaux superficielles), facteur aggravant la dissolution : précipitations, facteurs aggravant la survenue d'un effondrement : activité sismique.

Phénomènes observés sur la commune de Brignoles



Extrait de la carte de susceptibilité régionale sur Brignoles et identification des événements passés

Le gypse du Trias affleure sur des surfaces limitées sur la ville de Brignoles, et aucun événement mouvement de terrain lié de type effondrement lié à cette formation n'est recensé sur la commune.

Néanmoins, lorsque l'on place la commune dans un contexte régional, ces événements ne sont pas rares : fontis du Luc, de Bras en 2011. L'évolution de la cavité est fortement liée au contexte hydrogéologique et les circulations d'eau souterraines sont très développées sur le secteur. Les formations gypseuses sont recouvertes par des formations superficielles, et il est très difficile de cartographier précisément les zones soumises à cet aléa sans une étude hydrogéologique plus approfondie.

Comment détecter les cavités

Le recensement des cavités souterraines

En 2001, le Ministère en charge de l'environnement a lancé un vaste inventaire portant sur le recensement de l'ensemble des cavités souterraines abandonnées (hors mine) sur le territoire métropolitain. Dans les Alpes-Maritimes l'inventaire a été réalisé en 2003. Il s'agissait de recenser, localiser et caractériser les principales cavités souterraines du département d'origine naturelle (karst, gouffre, aven, grottes...) ou d'origine anthropique (caves, carrières souterraines, ...). Les données ont été intégrées à la base de données nationale sur les cavités BDCavités (www.cavites.fr) gérée par le BRGM. La base est instruite en collaboration avec le Laboratoire des Ponts et Chaussées, les services de Restauration des Terrains en Montagne, la Fédération Française de Spéléologie, et l'INERIS.

Le recensement des mouvements de terrain

La base de données nationale sur les mouvements de terrain BD Mvt (www.mouvementsdeterrain.fr) intègre, comme la BDCavités, les résultats des inventaires départementaux systématisés depuis 2001 (financement Ministère en charge de l'Environnement/BRGM), mais également des données issues d'inventaires plus ponctuels et opportunistes, alimentés principalement par les services RTM, les laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées et les Centres d'Etudes Techniques de l'Équipement ainsi que les Services Géologiques Régionaux du BRGM.

PROJET - PROJET - PROJET

Les cartes d'aléa

Les cartes d'aléa mouvements de terrain représentent les secteurs exposés à un risque d'effondrement. Le niveau d'information et de précision est différent selon l'échelle. A l'échelle régionale (1/50 000), la carte intègre des paramètres influant sur la présence de cavités tels que la géologie (présence de gypse ou non), la fracturation régionale (bourrage possible de gypse le long des axes de plis), les circulations d'eau souterraine (contexte hydrogéologique), l'activité sismique (déstabilisation de la cavité)... Ces paramètres sont considérés à l'échelle régionale, et la carte d'aléa permettra d'avoir une vue générale des territoires exposés au risque d'effondrement. Les territoires particulièrement exposés sont mis en évidence sur la carte régionale. Cette dernière peut être déclinée à l'échelle locale (1/5000 à 1/25000) où les paramètres vont être affinés en réalisant des investigations *in situ* (observation de zones d'affaissement) et en analysant des données supplémentaires : analyse des photos aériennes, sondages (profondeur du toit de la formation gypseuse), caractérisation hydrogéologique précise, estimation du volume de gypse potentiellement dissous... Les résultats des projets de recherche sur la caractérisation des phénomènes peuvent être également introduits dans la carte locale. Les cartes d'aléa locales sont destinées à aider à la planification de l'urbanisation sur une commune ou sur un territoire.

Les investigations ponctuelles

Les investigations ponctuelles sont menées sur un périmètre bien identifié où la probabilité d'existence de cavités est forte. Le périmètre peut être déterminé à partir de la carte d'aléa locale, sur une zone où l'on observe des désordres sur les constructions (fissuration, affaissement)... Les investigations sont réalisées à l'aide de méthodes géophysiques (méthodes croisées) ou de sondages. Les méthodes les plus efficaces pour détecter les vides sont surlignées en rouge : mesures micro-gravimétriques et sismiques haute-résolution. Les coûts approximatifs affichés pour chaque méthode sont indiqués à titre informatif, et peuvent varier fortement selon le contexte : type de machine utilisées, accessibilité de la zone à investiguer... Ces coûts seront à préciser lors d'éventuelles consultations avec des bureaux d'étude spécialisés.

		Paramètre mesuré	Domaine d'application	Profondeur d'investigation	Dimension de la zone d'étude	Limites	Coût approximatif
Méthodes géo-physiques	Mesures micro-gravimétriques	Mesure des variations du champ de pesanteur créées par la répartition des masses du sous-sol. Résultat sous la forme de carte d'anomalies gravimétriques.	Tous types de cavités et de zones décomprimées	Fonction de la taille, du contraste de densité et du niveau de bruit (généralement 15 à 30 m)	Zone métrique à décamétrique	Forte topographie, bâtiment, cuves enterrées, vibrations	Le coût de mise en œuvre de cette méthode est fonction du nombre de stations de mesures. Il faut compter en moyenne entre 33 et 45 € TTC le point de mesure (la station). Pour réaliser une étude devant couvrir 1ha (400 stations), cela fera un coût global compris entre 14 000 € et 18 000 € TTC ¹

¹ inclut l'acquisition terrain + traitement en bureau et rapport

PROJET - PROJET - PROJET

	Sondages carottés	Paramètres mécaniques sur échantillons prélevés (essais laboratoire)	Tous types de cavités et de zones décomprimées	Jusqu'à 100m	Ponctuelle	Coût élevé, implanté suite à mesures géophysiques et résultats des sondages destructifs	On compte environ 60 € TTC par mètre de profondeur pour réaliser un sondage carotté, à cela s'ajoute l'interprétation des logs prélevés par un géologue.
--	--------------------------	----------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------	--------------	------------	-----------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Quelles mesures prendre en cas d'effondrement ?

Le maire prescrit les mesures de sûreté exigées par les circonstances sur les domaines privés et publics du territoire communal : il prescrit les travaux, interdit l'accès aux propriétés menacées, ordonne l'évacuation des immeubles sinistrés. Il peut engager la procédure de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.

Prescription de mesures de sûreté

- Le maire informe le préfet et le président du Département des cavités souterraines dont il a connaissance sur sa commune (article L563-6 du code de l'environnement)
- Le maire prescrit les mesures de sûreté exigées par les circonstances : en cas d'effondrement ou d'affaissement de terrains, les pouvoirs de police du maire relèvent du code général des collectivités territoriales (article L.2212-2 5° du code général des collectivités territoriales) Le maire prescrit les mesures de sûreté qu'exigent les circonstances au moyen d'un arrêté municipal. Ces mesures peuvent être : l'interdiction d'accès à la propriété, la prescription de travaux.
- Le maire informe des mesures qu'il a prescrites (article 2212-4° du code général des collectivités territoriales)
- Intervention en urgence d'un géotechnicien auprès du maire, pour l'aider à prendre les mesures de sauvegarde les mieux adaptées. Le géotechnicien doit informer sur la nature du phénomène constaté, le contexte de survenue de l'évènement, la description du phénomène et de ses conséquences, la caractérisation du risque résiduel et faire les premières recommandations.
- Lorsqu'un effondrement se produit sur la voirie, le maire doit immédiatement veiller à la sécurité des personnes en s'assurant que le gestionnaire de la voirie a fait le nécessaire pour prévenir les usager et/ou pour interdire l'accès au secteur de voirie affecté. La prise en charge des travaux nécessaires à la remise en état de la chaussée relève du gestionnaire de la voirie : la commune pour les routes communales, chemins ruraux, places ; le département pour les routes départementales, l'Etat pour les routes nationales.

Déclaration de l'état de reconnaissance de catastrophe naturelle

L'effondrement d'une cavité souterraine est considéré comme un risque naturel majeur conformément aux dispositions de l'article 159 du titre IV de la loi n°2002-276 relative à la démocratie de proximité, modifiant l'article L561-1 du code de l'environnement. Le maire peut ainsi solliciter pour sa commune la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle afin de permettre aux victimes de bénéficier de la garantie catastrophe naturelle instituée par la loi n°82600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles.

Pour que l'état de catastrophe naturelle soit reconnu sur la commune, le maire doit faire parvenir un dossier de demande de constatation de l'état de catastrophe naturelle à la Préfecture. La demande doit comporter : une lettre adressée au préfet sollicitant la constatation de l'état de catastrophe naturelle, une fiche de renseignement, l'arrêté de péril éventuellement pris par le maire, le rapport établi par un géotechnicien spécialiste du sol et du sous-sol.

Le préfet, après examen, transmet la demande au ministre de l'Intérieur. La commission interministérielle chargée d'apprécier le caractère de catastrophe naturelle émet ensuite un avis. En cas de décision favorable, la victime dispose de 10 jours à compter de la publication de l'arrêté sur le journal officiel (J.O.) pour se manifester auprès de son assureur. En cas d'avis défavorable, les communes disposent d'un délai de deux mois à compter de la réception du courrier du préfet pour contester le refus.

PROJET - PROJET - PROJET

Les aides accordées pour les opérations de reconnaissance et de confortement des cavités souterraines : le fonds Barnier

Le préfet dispose dans le cadre du Fonds de prévention des risques naturels majeurs (fonds Barnier) d'une enveloppe déconcentrée permettant de faire face aux situations les plus graves. Ces financements concernent des opérations très diverses telles que des indemnités d'expropriation et d'acquisition amiable des biens exposés, des travaux de reconnaissance (études géologiques/géotechniques) et des travaux de prévention (aide plafonnée à hauteur de 50% des études et 40% des travaux), les évacuations temporaires et le relogement des personnes. Ce fond permet également de subventionner les particuliers pour les travaux de reconnaissance et de confortement de cavités souterraines (aide plafonnée à hauteur maximum de 30% des sommes engagées). Toute demande de subvention doit s'accompagner d'un dossier et répondre à des règles d'éligibilité bien définies. La condition principale étant que les biens doivent être assurés et doivent être exposés à un risque menaçant gravement des vies humaines.

Intégration du risque dans l'urbanisme

La connaissance d'un risque doit être traduite dans les documents d'urbanisme c'est-à-dire les documents de planification (à l'exception des SCOT) : PLU, carte communale, les documents d'autorisation d'occuper le sol : permis de construire, autorisations de lotir, certificats d'urbanisme.

Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT)

C'est un document qui fixe les grandes opérations en matière d'aménagement et détermine la destination générale des sols. Le code l'urbanisme prévoit dans son article L.121 qu'il doit prendre en compte l'existence des risques naturels prévisibles. Constitué d'un rapport de présentation et d'un document d'orientation comprenant des documents graphiques, le SCOT est établi sur le territoire de plusieurs communes. Il ne peut donc comporter une carte de localisation précise des cavités souterraines.

Plan Local d'Urbanisme (PLU)

Les codes de l'urbanisme et de l'environnement fixent un certain nombre d'obligations liées aux risques naturels prévisibles dans les PLU. Ainsi, en matière de recueil d'information, les articles L.563-3 et 6 du code de l'environnement obligent les communes à établir des cartes délimitant les sites où sont situées des cavités souterraines et des marnières susceptibles de provoquer l'effondrement du sol. En outre le règlement du PLU doit faire apparaître les secteurs à risque et les prescriptions réglementaires associées (article R123-11 du code de l'urbanisme).

Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR)

Le PPR est un outil réglementaire instauré par la loi du 2 février 1995. Son objectif est de délimiter sur une commune donnée, les zones exposées à des risques ou non directement exposés et de définir :

- Les interdictions ou conditions de construction des projets nouveaux ;
- Les mesures sur les biens et activités existants ;
- Les mesures générales de prévention, de protection et de sauvegarde.

Le PPR est une servitude d'utilité publique annexée aux documents d'urbanisme. C'est un document de prévention spécifique et unique qui remplace toutes les anciennes procédures.

Eléments de bibliographie et sites internet

Base de données nationales sur les mouvements de terrain BD MVT : www.mouvementsdeterrain.fr

Base de données nationales sur les cavités souterraines : www.cavites.fr

Classeur « Le risque mouvements de terrain en Provence-Alpes-Côte d'Azur », coédition BRGM, Région et DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur, janvier 2011.

« Gestion et prévention des risques liés à la présence de cavités souterraines en Seine-Maritime - Guide à l'usage des maires », Conseil Général de Seine-Maritime et Préfecture de Seine-Maritime. Février 2007.

Rivet F., Girard A. avec la collaboration de Mathon C. (2012). Amélioration de la connaissance sur les risques d'effondrement/glisement liés à la présence de terrains gypseux triasiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Rapport final BRGM/RP-60896-FR -

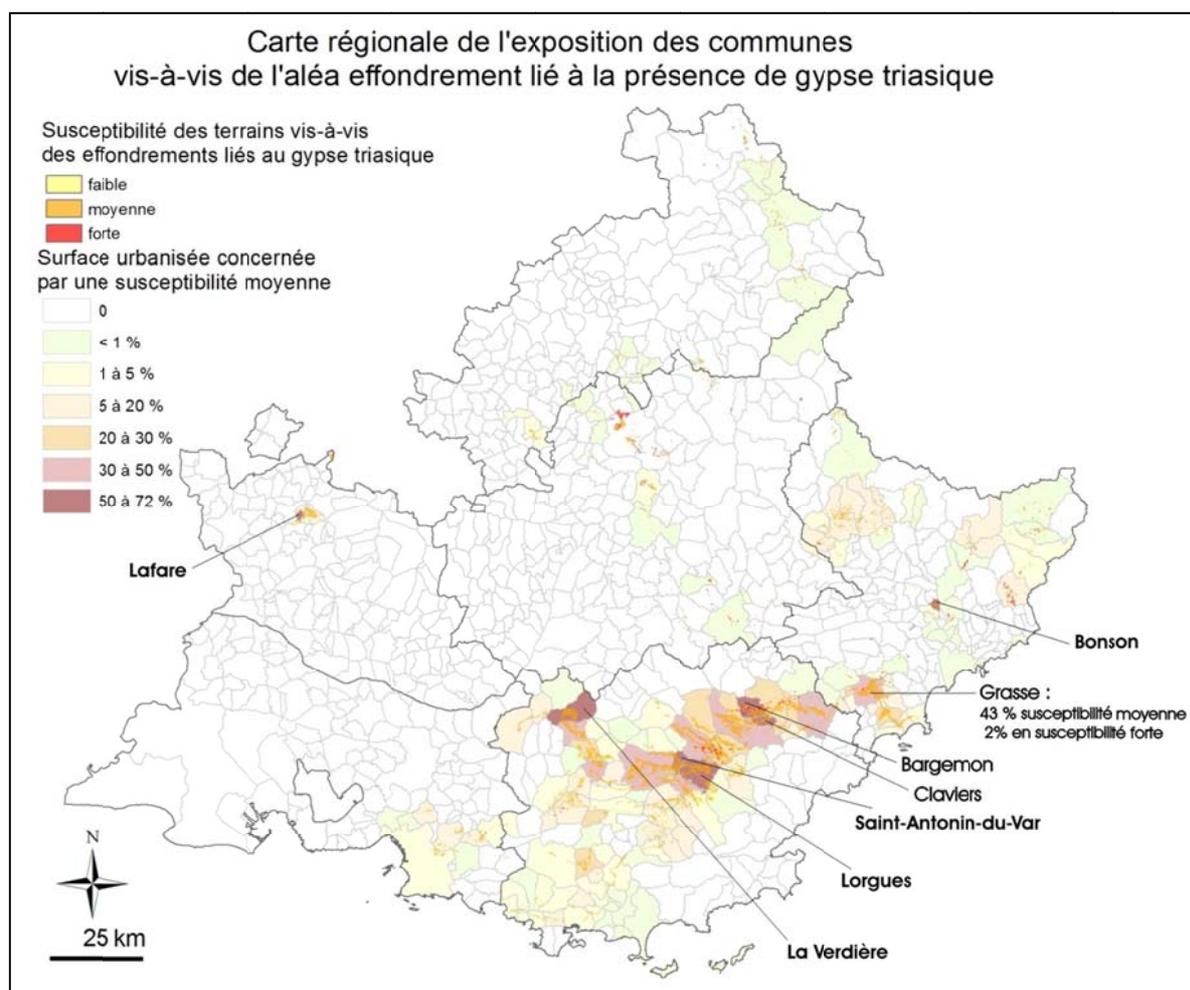
Le risque de mouvements de terrain lié au gypse triasique Fiche technique - GRASSE -

Les cavités de dissolution du gypse : phénomène régional

Le gypse et les formations qui lui sont généralement associées, dans le Trias de la région PACA, sont des matériaux qui présentent des propriétés particulières : roches tendres et facilement érodables par l'eau, haut degré de solubilité, mobiles car peu denses, avec un seuil de plasticité très bas leur donnant de fortes aptitudes à migrer verticalement ou latéralement. Une forte instabilité est dévolue aux affleurements d'évaporites, les formations superficielles sus-jacentes étant en outre souvent impliquées dans les mouvements de terrain. Localisés de manière parfois insolite vu la variété des modes de genèse, les terrains gypseux avec leurs roches associées, doivent faire l'objet d'une attention particulière car les instabilités qu'ils génèrent sont des menaces permanentes pour la sécurité des personnes et des biens : lorsqu'il s'agit de mouvements de terrain verticaux (fontis), ils se produisent le plus souvent sans signes avant-coureurs.

La présence de gypse au niveau des versants accentue leur instabilité naturelle liée à la pente et à la circulation de l'eau souterraine et/ou superficielle. Ces instabilités peuvent se traduire notamment par des glissements de terrain.

Sur la région PACA, le gypse triasique est présent dans tous les départements, mais sur des surfaces plus étendues dans le Var et le sud-ouest des Alpes-Maritimes. Seules les formations gypseuses affleurantes sont représentées sur la carte ci-dessous mais l'aléa concerne également les formations meubles qui les recouvrent (effondrement/soutirage).

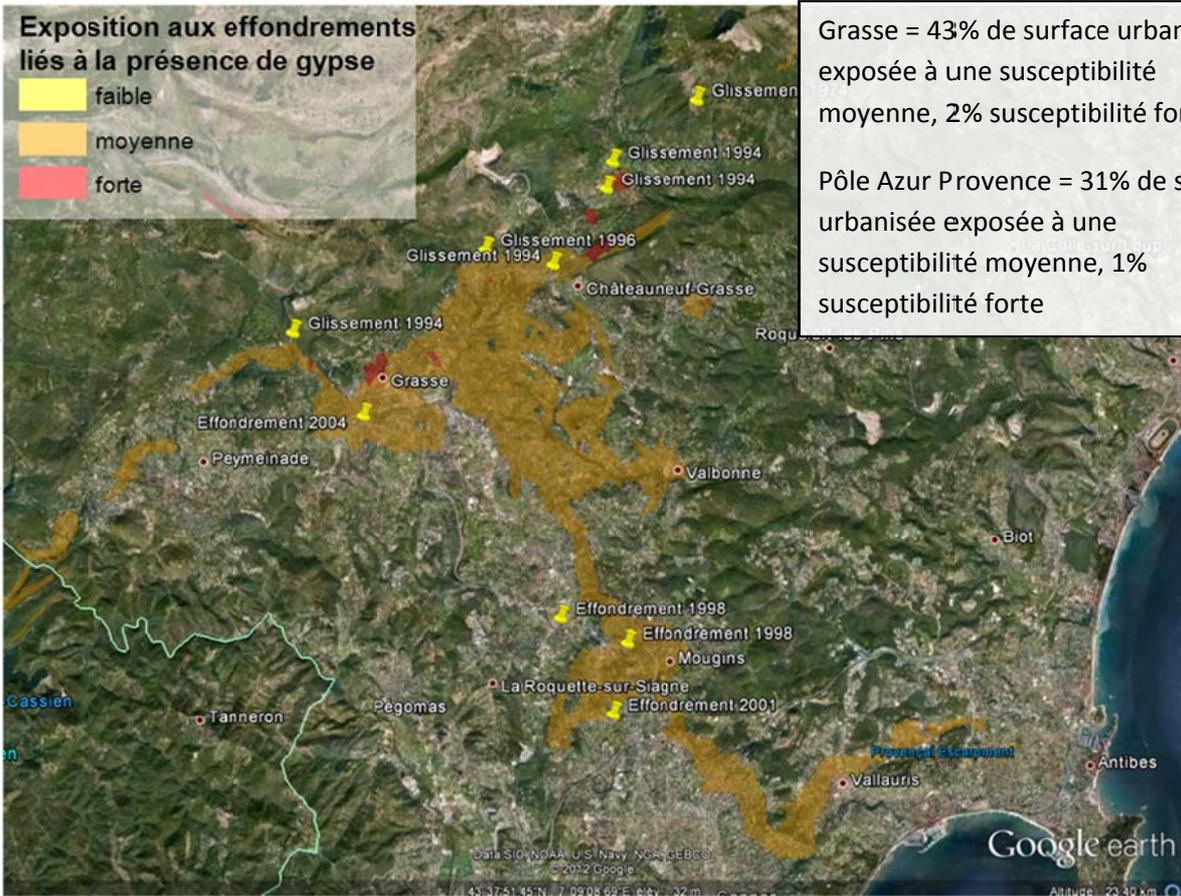


Carte issue de l'étude régionale sur l'aléa mouvements de terrain lié à la présence de gypse triasique, échelle de validité 1/50 000^e - Conseil Régional, DREAL, BRGM. Carte obtenue à partir des facteurs favorisant l'apparition des effondrements : probabilité de présence de gypse (formations géologiques, présence d'accidents tectoniques), facteurs permettant la dissolution du gypse (mode de circulation des eaux souterraines, taux d'infiltration des eaux superficielles), facteur aggravant la dissolution : précipitations, facteurs aggravant la survenue d'un effondrement : activité sismique.

PROJET - PROJET - PROJET

Phénomènes observés sur la commune de Grasse

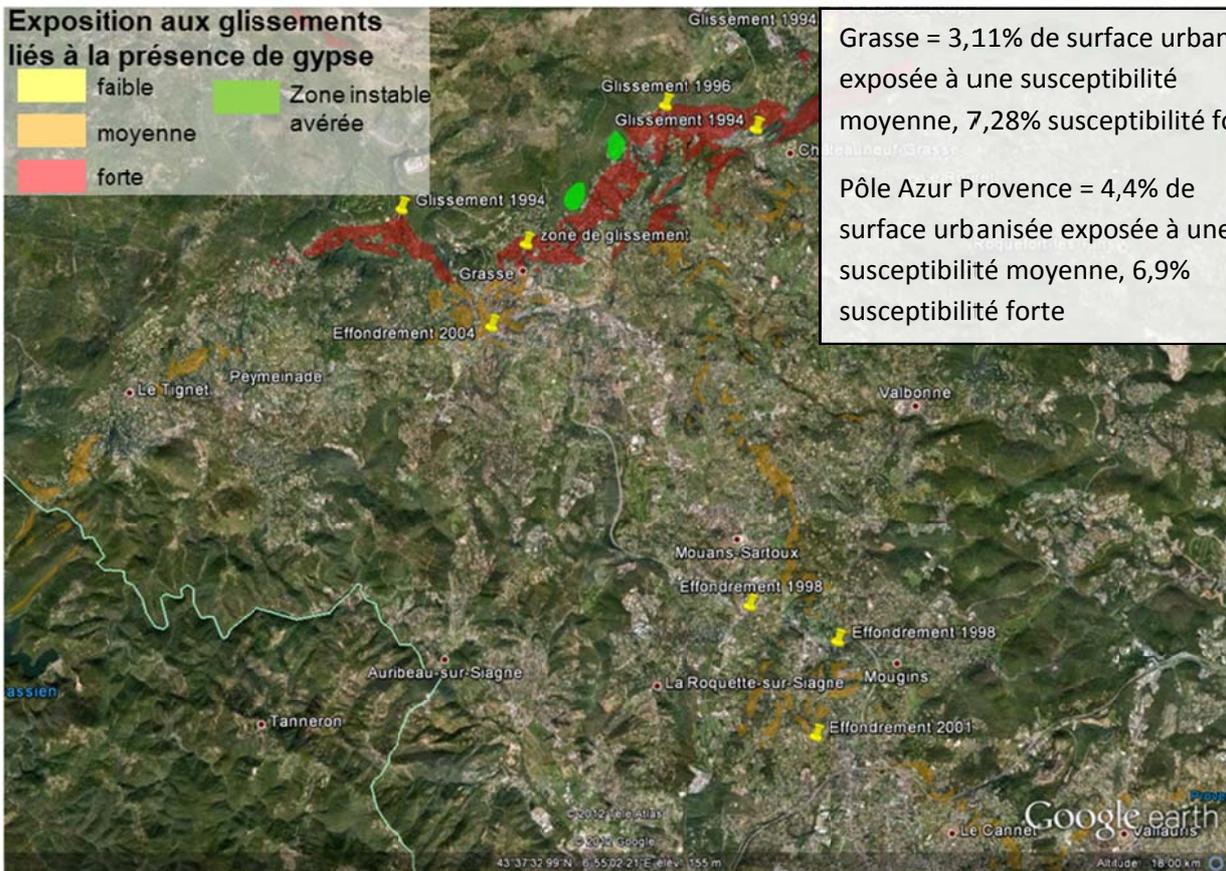
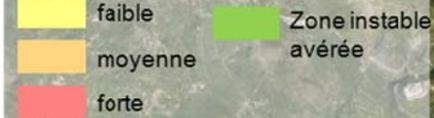
Exposition aux effondrements liés à la présence de gypse



Grasse = 43% de surface urbanisée exposée à une susceptibilité moyenne, 2% susceptibilité forte

Pôle Azur Provence = 31% de surface urbanisée exposée à une susceptibilité moyenne, 1% susceptibilité forte

Exposition aux glissements liés à la présence de gypse



Grasse = 3,11% de surface urbanisée exposée à une susceptibilité moyenne, 7,28% susceptibilité forte

Pôle Azur Provence = 4,4% de surface urbanisée exposée à une susceptibilité moyenne, 6,9% susceptibilité forte

PROJET - PROJET - PROJET

La ville de Grasse et ses environs se situent sur du Trias riche en gypse (Keuper). La tectonique a énormément affecté cette formation qui peut par endroit être très épaisse (jusqu'à 150 m à l'ouest). Le gypse se présente sous diverses formes (fibreuse, saccharoïde, mélangé avec de l'argile). Par ailleurs, la ville est construite à flanc de relief, et en amont les pentes peuvent atteindre plus de 30°. Ce contexte géomorphologique favorise l'apparition d'instabilités gravitaires telles que les glissements. Des effondrements peuvent également se produire dans les cavités formées suite à la dissolution du gypse. L'eau joue un rôle prépondérant dans les phénomènes de dissolution. Le sous-sol de la région de Grasse est drainé par de nombreuses sources, et les écoulements souterrains sont complexes. De plus, les fuites d'un réseau d'anciennes galeries creusées pour alimenter en eau les moulins à huile, peuvent créer des zones de dissolution complémentaires, hors zones d'écoulements et/ou d'infiltration naturelle.

En 2004, un effondrement s'est produit en plein centre-ville, due à l'apparition d'un fontis à la surface. Le trou apparu en surface mesurait 13 m de long sur 6 m de large, et présentait une profondeur de 7 m, dont 4 m était rempli d'eau.

Des grands glissements de terrain affectent les terrains en amont de Grasse (versant de la Marbrière). Ces mouvements sont dus aux dolomies de l'Hettangien et aux calcaires du Jurassique qui glissent sur une semelle de trias gypseux (site web Geoazur : <http://gravitaire.oca.eu/>). Un de ces glissements a été instrumenté par le laboratoire de Geoazur (tomographie électrique, géophones, inclinomètres). Cette instrumentation a été faite après la découverte d'une grande crevasse très pénétrante permettant le détachement d'une grosse masse susceptible de glisser.

Comment détecter les cavités

Le recensement des cavités souterraines

En 2001, le Ministère en charge de l'environnement a lancé un vaste inventaire portant sur le recensement de l'ensemble des cavités souterraines abandonnées (hors mine) sur le territoire métropolitain. Dans les Alpes-Maritimes l'inventaire a été réalisé en 2003. Il s'agissait de recenser, localiser et caractériser les principales cavités souterraines du département d'origine naturelle (karst, gouffre, aven, grottes...) ou d'origine anthropique (caves, carrières souterraines, ...). Les données ont été intégrées à la base de données nationale sur les cavités BDCavités (www.cavites.fr) gérée par le BRGM. La base est instruite en collaboration avec le Laboratoire des Ponts et Chaussées, les services de Restauration des Terrains en Montagne, la Fédération Française de Spéléologie, et l'INERIS.

Le recensement des mouvements de terrain

La base de données nationale sur les mouvements de terrain BD Mvt (www.mouvementsdeterrain.fr) intègre, comme la BDCavités, les résultats des inventaires départementaux systématisés depuis 2001 (financement Ministère en charge de l'Environnement/BRGM), mais également des données issues d'inventaires plus ponctuels et opportunistes, alimentés principalement par les services RTM, les laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées et les Centres d'Etudes Techniques de l'Équipement ainsi que les Services Géologiques Régionaux du BRGM.

Les cartes d'aléa

Les cartes d'aléa mouvements de terrain représentent les secteurs exposés à un risque d'effondrement. Le niveau d'information et de précision est différent selon l'échelle. A l'échelle régionale (1/50 000), la carte intègre des paramètres influant sur la présence de cavités tels que la géologie (présence de gypse ou non), la fracturation régionale (bourrage possible de gypse le long des axes de plis), les circulations d'eau souterraine (contexte hydrogéologique), l'activité sismique (déstabilisation de la cavité)... Ces paramètres sont considérés à l'échelle régionale, et la carte d'aléa permettra d'avoir une vue générale des territoires exposés au risque d'effondrement. Les territoires particulièrement exposés sont mis en évidence sur la carte régionale. Cette dernière peut être déclinée à l'échelle locale (1/5000 à 1/25000) où les paramètres vont être affinés en réalisant des investigations *in situ* (observation de zones d'affaissement) et en analysant des données supplémentaires : analyse des photos aériennes, sondages (profondeur du toit de la formation gypseuse), caractérisation hydrogéologique précise, estimation du volume de gypse potentiellement dissous... Les résultats des projets de recherche sur la caractérisation des phénomènes peuvent être également introduits dans la carte locale. Les cartes d'aléa locales sont destinées à aider à la planification de l'urbanisation sur une commune ou sur un territoire.

PROJET - PROJET - PROJET

Les investigations ponctuelles

Les investigations ponctuelles sont menées sur un périmètre bien identifié où la probabilité d'existence de cavités est forte. Le périmètre peut être déterminé à partir de la carte d'aléa locale, sur une zone où l'on observe des désordres sur les constructions (fissuration, affaissement)...Les investigations sont réalisées à l'aide de méthodes géophysiques (méthodes croisées) ou de sondages. Les méthodes les plus efficaces pour détecter les vides sont surlignées en rouge : mesures micro-gravimétriques et sismiques haute-résolution. Les coûts approximatifs affichés pour chaque méthode sont indiqués à titre informatif, et peuvent varier fortement selon le contexte : type de machine utilisées, accessibilité de la zone à investiguer...Ces coûts seront à préciser lors d'éventuelles consultations avec des bureaux d'étude spécialisés.

		Paramètre mesuré	Domaine d'application	Profondeur d'investigation	Dimension de la zone d'étude	Limites	Coût approximatif
Méthodes géophysiques	Mesures micro-gravimétriques	Mesure des variations du champ de pesanteur créées par la répartition des masses du sous-sol. Résultat sous la forme de carte d'anomalies gravimétriques.	Tous types de cavités et de zones décomprimées	Fonction de la taille, du contraste de densité et du niveau de bruit (généralement 15 à 30 m)	Zone métrique à décamétrique	Forte topographie, bâtiment, cuves enterrées, vibrations	Le coût de mise en œuvre de cette méthode est fonction du nombre de stations de mesures. Il faut compter en moyenne entre 33 et 45 € TTC le point de mesure (la station). Pour réaliser une étude devant couvrir 1ha (400 stations), cela fera un coût global compris entre 14 000 € et 18 000 € TTC ¹
	Mesures sismiques haute-résolution	Etude de la propagation des ondes réfléchies et de la dispersion des ondes de surface. Les résultats sont présentés sous la forme de coupes sismique (distance parcourues par les ondes en fonction de la profondeur)	Détection de vides par effet de masquage, caractérisation des zones décomprimées	De l'ordre de 10 à 100m si la fréquence et le dispositif sont adaptés	Zone métrique à décamétrique	Trafic automobile et ferroviaire important, terrain de surface meuble, fortes variations latérales des structures superficielles.	On compte entre 600 à 700 € TTC ¹ pour 100 m linéaire. Pour couvrir une surface d'un hectare par exemple, on pourra réaliser 10 profils de 100 m linéaire.
	Mesures électromagnétiques par géoradar	Etude de la propagation des ondes électromagnétiques hautes fréquences (20-2500MHz)	Cavités, puits, descenderies	De l'ordre de 1 à 10m, fonction de la résistivité des terrains et de la fréquence utilisée	Zone métrique à décamétrique	Terrains de surface conducteurs (argileux), conduite métallique, réseaux téléphoniques et électriques	L'acquisition par géoradar est relativement rapide. Il faut compter environ 200€ TTC ¹ pour couvrir 100 ml.

¹ inclut l'acquisition terrain +traitement en bureau et rapport

PROJET - PROJET - PROJET

	Mesures électriques	Mesure des variations de la résistivité, propriété physique caractéristique d'une roche qui y conditionne la circulation d'un courant .Les cavités, lorsqu'elles sont vides, sont caractérisées par une résistivité très importante (en théorie la résistivité de l'air est infinie) par rapport aux résistivités des terrains environnants.	Faille, pendage, stratigraphie, karst	De l'ordre de 1 à 30 m	Zone métrique à décamétrique	Mise en œuvre limitée en milieu urbanisé (fortes perturbations par réseau électrique), interprétation des résultats complexe	Il faut compter entre 600 à 700 € TTC ¹ pour couvrir 100 m linéaire
Sondages mécaniques	Sondages destructifs	Vitesse d'avancement, pression sur l'outil, sonar (volume de la cavité noyée), laser (volume de la cavité hors d'eau), photo, video	Tous types de cavités et de zones décomprimées	Jusqu'à 100m	Ponctuelle	Faible diamètre, nécessité de faire plusieurs sondages	Le coût de réalisation d'un sondage destructif est d'environ 30 € TTC par mètre de profondeur, il faut ajouter à cela l'interprétation des logs géologiques par un géologue.
	Sondages carottés	Paramètres mécaniques sur échantillons prélevés (essais laboratoire)	Tous types de cavités et de zones décomprimées	Jusqu'à 100m	Ponctuelle	Coût élevé, implanté suite à mesures géophysiques et résultats des sondages destructifs	On compte environ 60 € TTC par mètre de profondeur pour réaliser un sondage carotté, à cela s'ajoute l'interprétation des logs prélevés par un géologue.

Quelles mesures prendre en cas d'effondrement ?

Le maire prescrit les mesures de sûreté exigées par les circonstances sur les domaines privés et publics du territoire communal : il prescrit les travaux, interdit l'accès aux propriétés menacées, ordonne l'évacuation des immeubles sinistrés. Il peut engager la procédure de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.

Prescription de mesures de sûreté

- Le maire informe le préfet et le président du Département des cavités souterraines dont il a connaissance sur sa commune (article L563-6 du code de l'environnement)
- Le maire prescrit les mesures de sûreté exigées par les circonstances : en cas d'effondrement ou d'affaissement de terrains, les pouvoirs de police du maire relèvent du code général des collectivités territoriales (article L.2212-2 5° du code général des collectivités territoriales) Le maire prescrit les mesures de sûreté qu'exigent les circonstances au moyen d'un arrêté municipal. Ces mesures peuvent être : l'interdiction d'accès à la propriété, la prescription de travaux.
- Le maire informe des mesures qu'il a prescrites (article 2212-4° du code général des collectivités territoriales)

PROJET - PROJET - PROJET

- Intervention en urgence d'un géotechnicien auprès du maire, pour l'aider à prendre les mesures de sauvegarde les mieux adaptées. Le géotechnicien doit informer sur la nature du phénomène constaté, le contexte de survenue de l'évènement, la description du phénomène et de ses conséquences, la caractérisation du risque résiduel et faire les premières recommandations.
- Lorsqu'un effondrement se produit sur la voirie, le maire doit immédiatement veiller à la sécurité des personnes en s'assurant que le gestionnaire de la voirie a fait le nécessaire pour prévenir les usager et/ou pour interdire l'accès au secteur de voirie affecté. La prise en charge des travaux nécessaires à la remise en état de la chaussée relève du gestionnaire de la voirie : la commune pour les routes communales, chemins ruraux, places ; le département pour les routes départementales, l'Etat pour les routes nationales.

Déclaration de l'état de reconnaissance de catastrophe naturelle

L'effondrement d'une cavité souterraine est considéré comme un risque naturel majeur conformément aux dispositions de l'article 159 du titre IV de la loi n°2002-276 relative à la démocratie de proximité, modifiant l'article L561-1 du code de l'environnement. Le maire peut ainsi solliciter pour sa commune la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle afin de permettre aux victimes de bénéficier de la garantie catastrophe naturelle instituée par la loi n°82600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles.

Pour que l'état de catastrophe naturelle soit reconnu sur la commune, le maire doit faire parvenir un dossier de demande de constatation de l'état de catastrophe naturelle à la Préfecture. La demande doit comporter : une lettre adressée au préfet sollicitant la constatation de l'état de catastrophe naturelle, une fiche de renseignement, l'arrêt de péril éventuellement pris par le maire, le rapport établi par un géotechnicien spécialiste du sol et du sous-sol. Le préfet, après examen, transmet la demande au ministre de l'Intérieur. La commission interministérielle chargée d'apprécier le caractère de catastrophe naturelle émet ensuite un avis. En cas de décision favorable, la victime dispose de 10 jours à compter de la publication de l'arrêté sur le journal officiel (J.O.) pour se manifester auprès de son assureur. En cas d'avis défavorable, les communes disposent d'un délai de deux mois à compter de la réception du courrier du préfet pour contester le refus.

Les aides accordées pour les opérations de reconnaissance et de confortement des cavités souterraines : le fonds Barnier

Le préfet dispose dans le cadre du Fonds de prévention des risques naturels majeurs (fonds Barnier) d'une enveloppe déconcentrée permettant de faire face aux situations les plus graves. Ces financements concernent des opérations très diverses telles que des indemnités d'expropriation et d'acquisition amiable des biens exposés, des travaux de reconnaissance (études géologiques/géotechniques) et des travaux de prévention (aide plafonnée à hauteur de 50% des études et 40% des travaux), les évacuations temporaires et le relogement des personnes. Ce fond permet également de subventionner les particuliers pour les travaux de reconnaissance et de confortement de cavités souterraines (aide plafonnée à hauteur maximum de 30% des sommes engagées). Toute demande de subvention doit s'accompagner d'un dossier et répondre à des règles d'éligibilité bien définies. La condition principale étant que les biens doivent être assurés et doivent être exposés à un risque menaçant gravement des vies humaines.

Intégration du risque dans l'urbanisme

La connaissance d'un risque doit être traduite dans les documents d'urbanisme c'est-à-dire les documents de planification (à l'exception des SCOT) : PLU, carte communale, les documents d'autorisation d'occuper le sol : permis de construire, autorisations de lotir, certificats d'urbanisme.

Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT)

C'est un document qui fixe les grandes opérations en matière d'aménagement et détermine la destination générale des sols. Le code l'urbanisme prévoit dans son article L.121 qu'il doit prendre en compte l'existence des risques naturels prévisibles. Constitué d'un rapport de présentation et d'un document d'orientation comprenant des documents graphiques, le SCOT est établi sur le territoire de plusieurs communes. Il ne peut donc comporter une carte de localisation précise des cavités souterraines.

Plan Local d'Urbanisme (PLU)

Les codes de l'urbanisme et de l'environnement fixent un certain nombre d'obligations liées aux risques naturels prévisibles dans les PLU. Ainsi, en matière de recueil d'information, les articles L.563-3 et 6 du code de l'environnement obligent les communes à établir des cartes délimitant les sites où sont situées des cavités

PROJET - PROJET - PROJET

souterraines et des marnières susceptibles de provoquer l'effondrement du sol. En outre le règlement du PLU doit faire apparaître les secteurs à risque et les prescriptions réglementaires associées (article R123-11 du code de l'urbanisme).

Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR)

Le PPR est un outil réglementaire instauré par la loi du 2 février 1995. Son objectif est de délimiter sur une commune donnée, les zones exposées à des risques ou non directement exposés et de définir :

- Les interdictions ou conditions de construction des projets nouveaux ;
- Les mesures sur les biens et activités existants ;
- Les mesures générales de prévention, de protection et de sauvegarde.

Le PPR est une servitude d'utilité publique annexée aux documents d'urbanisme. C'est un document de prévention spécifique et unique qui remplace toutes les anciennes procédures.

Eléments de bibliographie et sites internet

Base de données nationales sur les mouvements de terrain BD MVT : www.mouvementsdeterrain.fr

Base de données nationales sur les cavités souterraines : www.cavites.fr

Classeur « Le risque mouvements de terrain en Provence-Alpes-Côte d'Azur », coédition BRGM, Région et DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur, janvier 2011.

« Gestion et prévention des risques liés à la présence de cavités souterraines en Seine-Maritime - Guide à l'usage des maires », Conseil Général de Seine-Maritime et Préfecture de Seine-Maritime. Février 2007.

Cartographie régionale de l'aléa mouvements de terrain lié à la présence de gypse triasique

Rivet F., Girard A. avec la collaboration de Mathon C. (2012). Amélioration de la connaissance sur les risques d'effondrement/glissement liés à la présence de terrains gypseux triasiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Rapport final BRGM/RP-60896-FR

Zerathe, S., Lebourg, T., Evolution stages of large deep-seated landslides at the front of a subalpine meridional chain (Maritime-Alps, France), Geomorphology (2011), doi:10.1016/j.geomorph.2011.10.006



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

BRGM PACA
117, avenue de Luminy
BP168
13276 – Marseille cedex09 - France
Tél. : 04 91 17 74 77