



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Susceptibilité de présence de cavités à l'échelle de la France métropolitaine

Rapport final

BRGM/RP-72581-FR

Version 0 du 8 septembre 2023

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

Sesil Can, Leconte Steve, Vanoudheusden Emilie

Vérificateur :

Nom : Noury Gildas
Fonction : Ingénieur chercheur en
risques naturels
Date : 04/09/2023

Signature :

Approbateur :

Nom : Sébastien Jaffrot
Fonction : Directeur Adjoint DRP
Date : 07/09/2023

Signature :

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

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : Cartographie, cavité, susceptibilité de présence

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

Sesil Can, Leconte Steve, Vanoudheusden Emilie (2023) – Susceptibilité de présence de cavités à l'échelle de la France métropolitaine. Rapport final V0. BRGM/RP-72581-FR, 74 p.

© BRGM, 2023, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-20/01/2022

Synthèse

Dans une optique de prévention des risques liés aux cavités souterraines, la connaissance de l'aléa à l'échelle de la France métropolitaine est un outil d'importance à destination des principaux décideurs. La visualisation globale de cet aléa (ou la susceptibilité) permet d'une part une hiérarchisation des zones les plus susceptibles, incitant les DREAL et DDT à faire réaliser des études spécifiques sur les zones identifiées, et d'autre part, à chaque habitant de connaître l'exposition de son habitation ou son lieu de travail. De plus, une telle information pourrait être intégrée dans les IAL (Information Acquéreurs Locataires).

Les objectifs de cette étude portaient sur deux axes de travail :

1. Esquisse, à l'échelle de la France métropolitaine, d'une première série de cartes de susceptibilité de présence de cavités, s'appuyant sur la méthodologie cartographique des Scénarios Départementaux Cavités, avec pour seul facteur la lithologie, et en s'appuyant sur la carte lithologique au 50 000^{ème} de la France (élaborée par le BRGM et établie en 2020) ;
2. Une analyse préliminaire des cartographies recensées : quelles sont les méthodologies employées ? leurs limites ?

Concernant le 1^{er} axe : Le facteur lithologie a été étudié et s'est révélé pertinent pour les cavités du type carrière, cavité naturelle et cave. Il n'est logiquement pas pertinent pour les cavités de type ouvrage civil et ouvrage militaire. Afin de compléter l'étude et parfaire les résultats, certains **critères complémentaires** ont été introduits.

Dans le détail, chaque typologie de cavités souterraines (carrière, cavité naturelle, cave, ouvrage civil, ouvrage militaire) a fait l'objet d'une analyse permettant d'aboutir pour 4 d'entre elles à une esquisse de cartographie :

- La susceptibilité de présence de carrières et de caves a été analysée à partir du seul facteur de prédisposition lithologique ;
- La susceptibilité de présence de cavités naturelles a de même été analysée à partir du facteur lithologique. Une analyse de la pertinence d'utilisation du facteur complémentaire « distance aux failles » a été réalisée. Il conviendrait de compléter celle-ci afin d'en faire un facteur effectivement pertinent ;
- Le facteur lithologique n'étant pas pertinent, la susceptibilité de présence des ouvrages militaires a été étudiée et cartographiée à partir du facteur « distance aux lignes de front, aux frontières et aux traits de côte » ;
- La susceptibilité de présence des ouvrages civils n'a pas fait l'objet d'une cartographie, le facteur lithologique n'étant pas pertinent.

Les résultats obtenus sont ici prometteurs mais il est utile de poursuivre le travail. En effet, le seul critère initial -le facteur lithologique-, s'il est bien évidemment pertinent et satisfaisant en première approche ou pour une échelle de restitution faible (par exemple au millionième), n'est cependant pas suffisant à mesure qu'une restitution plus fine est souhaitée (par exemple au 50 000^{ème}).

Les pistes d'amélioration formulées sont de plusieurs ordres :

- Analyse critique de la donnée initiale et des résultats obtenus : le but visé est de réduire les erreurs et incertitudes ;

- Analyse de la contribution d'autres facteurs : ce travail ayant été initié, il s'agit de compléter les analyses par l'utilisation de certains facteurs complémentaires (distance aux failles pour les cavités naturelles, distance aux villes pour les ouvrages civils) ou de refaire l'analyse avec des données d'entrée plus adaptée (lignes de front pour les ouvrages militaires ;
- Analyse portant sur des familles de données plus restreintes, tant sur les données de l'inventaire que sur les données décrivant les facteurs, ce qui correspond à une sectorisation des études/analyses conformément aux travaux précédents.

Concernant le 2nd axe : Le travail s'est poursuivi avec la **collecte et l'analyse de cartographies existantes**. Le résultat est constitué de fiches, récapitulant les données d'entrée, la méthodologie et les limites, pour chacune des **31 études capitalisées** à ce stade.

Ces études doivent permettre d'alimenter la réflexion concernant la contribution d'autres facteurs à la cartographie à l'échelle de la France métropolitaine. En perspective, il pourrait être judicieux de constituer un **catalogue numérique** de ces études dont les métadonnées comprendraient les limites géographiques de l'étude ainsi que ses principales caractéristiques techniques.

Pour rappel, ces cartes ici présentées ne peuvent être utilisées à des fins d'urbanisation ou de réglementations urbanistiques. Pour une telle utilisation, il convient de réaliser des études prenant en compte les facteurs de prédisposition à des échelles plus locales.

Sommaire

1. Introduction	8
1.1. Contexte.....	8
1.2. Approche globale	9
2. Esquisse de la carte à l'échelle de la France métropolitaine.....	11
2.1. Rappel de la méthode des Scénarios Cavités	11
2.2. Données d'entrée.....	13
2.2.1. <i>BDCavité</i>	13
2.2.2. <i>Carte lithologique</i>	14
2.2.3. <i>Autres données utilisées</i>	17
2.3. Analyse et discussion par typologie de cavité.....	18
2.3.1. <i>Poids d'appartenance calculés pour chaque typologie de cavités, selon le critère de la lithologie</i>	18
2.3.2. <i>Les cavités de type carrière</i>	21
2.3.3. <i>Les cavités naturelles</i>	25
2.3.4. <i>Les cavités de type cave</i>	31
2.3.5. <i>Les cavités de type ouvrage civil</i>	35
2.3.6. <i>Les cavités de type ouvrage militaire</i>	35
2.4. Esquisses de résultat cartographiques et perspectives	38
3. Inventaire des cartographies existantes.....	43
3.1. Recensement des cartographies.....	43
3.2. Méthodes mises en œuvre dans les cartographies collectées.....	43
3.2.1. <i>Méthode statistique</i>	43
3.2.2. <i>Méthode d'expertise</i>	44
3.3. Limites des études	45
3.4. Résultats et perspectives	46
4. Conclusion	49
5. Bibliographie	51

Liste des figures

Figure 1 : Ancienne carte nationale de l'aléa cavité (BRGM, 1994)	8
Figure 2 : Schéma explicatif du principe de quantification du niveau de susceptibilité	12
Figure 3 : Exemple de répartition du nombre d'ouvrages militaires et poids d'appartenance en fonction des distances aux lignes de front	13
Figure 4 : Carte lithologique à 1/50 000 selon le niveau 3	16
Figure 5 : Répartition des typologies de cavité dans les principales couches géologiques	18
Figure 6 : Répartition du nombre de cavités en fonction du poids d'appartenance selon le facteur lithologie, pour chacun des types de cavités.....	20
Figure 7 : Répartition des poids d'appartenance au sein des différents types de roches pour les carrières	21

Figure 8 : Cartographie brute des poids d'appartenance pour les cavités de type carrière	22
Figure 9 : Répartition des poids d'appartenance en fonction des lithologies de surface pour les cavités de type carrière	23
Figure 10 : Modification du poids d'appartenance des limons pour les cavités de type carrière en dissociant la Normandie (gauche : avant modification ; droite : après modification) – Zoom sur le nord-est de la métropole	24
Figure 11 : Répartition des poids d'appartenance des différents types de roches pour les cavités naturelles	25
Figure 12 : Cartographie brute des poids d'appartenance pour les cavités naturelles	26
Figure 13 : Répartition des poids d'appartenance en fonction des lithologies de surface pour les cavités naturelles	26
Figure 14 : Zoom sur l'unique cavité naturelle présente dans l'orthogneiss intermédiaire	27
Figure 15 : Les cavités naturelles localisées dans le marbre.....	28
Figure 16 : Comparaison de la distance aux failles des cavités naturelles et de points aléatoires	29
Figure 17 : Zoom sur les pentes obtenues pour la comparaison de la distance aux failles.....	29
Figure 18 : Répartition des poids d'appartenance au sein des différents types de roches pour les caves	31
Figure 19 : Cartographie brute des poids d'appartenance pour les cavités de type cave	32
Figure 20 : Répartition des poids d'appartenance en fonction des lithologies de surface pour les cavités de type cave	33
Figure 21 : Les caves localisées dans les brèches volcanoclastiques aux alentours de Clermont-Ferrand (zoom sur Clermont-Ferrand)	34
Figure 22 : Localisation des facteurs quantitatifs (A. Données brutes et B. Données modifiées) pour les cavités de type ouvrage militaire	36
Figure 23 : Répartition du nombre d'ouvrages militaires et poids d'appartenance en fonction des distances au trait de côte	36
Figure 24 : Répartition du nombre d'ouvrages militaires et poids d'appartenance en fonction des distances aux lignes de front.....	37
Figure 25 : Répartition du nombre d'ouvrages militaires et poids d'appartenance en fonction des distances aux frontières	37
Figure 26 : Cartographie brute des ouvrages militaires	38
Figure 27 : Proposition de cartographie de susceptibilité de présence des carrières.....	39
Figure 28 : Proposition de cartographie de susceptibilité de présence des cavités naturelles ..	39
Figure 29 : Proposition de cartographie de susceptibilité de présence des caves	40
Figure 30 : Proposition de cartographie de susceptibilité de présence des ouvrages militaires	40
Figure 31 : Exemple de rendu pour un catalogue permettant une sélection cartographique.....	47

Liste des équations

Équation 1 : Poids des évidences © Fontaine M., Nachbaur A., Rohmer J (2008).....	12
---	----

Liste des tableaux

Tableau 1 : Répartition des cavités selon leur typologie en mars 2022 ; les données en vert ne sont pas utilisées pour l'étude	14
Tableau 2 : Répartition des surfaces lithologiques selon les niveaux 1 et 2 (avec en rouge les plus grandes superficies et en gras les superficies totales par niveau 1)	17
Tableau 3 : Répartition des types de cavité au sein des 3 grands types de roches	18
Tableau 4 : Poids d'appartenance bruts de chaque lithologie	19
Tableau 5 : Calcul du poids d'appartenance selon différentes configurations pour les cavités de type carrière dans les limons	23
Tableau 6 : Calcul du poids d'appartenance selon différentes configurations pour les cavités de type cave dans les brèches volcanoclastiques	34
Tableau 7 : Facteurs permanents et de déclenchements utilisés pour la cartographie de susceptibilité de présence de cavités avec la méthode statistique.....	44
Tableau 8 : Facteurs permanents et de déclenchements utilisés pour la cartographie de susceptibilité de présence de cavités pour la méthode d'expertise	45

Liste des annexes

Annexe 1 : Répartition des cavités selon les typologies (données issues de BDCavité).....	55
Annexe 2 : Graphiques sur la répartition des poids d'appartenance en fonction de la surface de l'ensemble des lithologies.....	59
Annexe 3 : Fiches récapitulatives des études de cartographies.....	Erreur ! Signet non défini.

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Dans une optique de prévention des risques liés aux cavités souterraines, la connaissance de l'aléa à l'échelle de la France métropolitaine est un outil d'importance à destination des principaux décideurs. La visualisation globale de cet aléa permet d'une part une hiérarchisation des zones les plus susceptibles, incitant les DREAL et DDT à faire réaliser des études spécifiques sur les zones identifiées, et d'autre part, à chaque habitant de connaître la susceptibilité à laquelle il s'expose dans son habitation ou sur son lieu de travail. De plus, une telle information pourrait être intégrée dans les IAL (Information Acquéreurs Locataires).

Une carte d'aléa Cavité a été établie par le BRGM (rapport RR-38371-FR) en 1994, à l'échelle 1/500 000 (Figure 1), à partir d'une méthodologie impliquant :

- un inventaire national des cavités et désordres par bibliographie et enquête auprès des Préfets de Département ;
- une cartographie des terrains concernés par la présence de cavités.

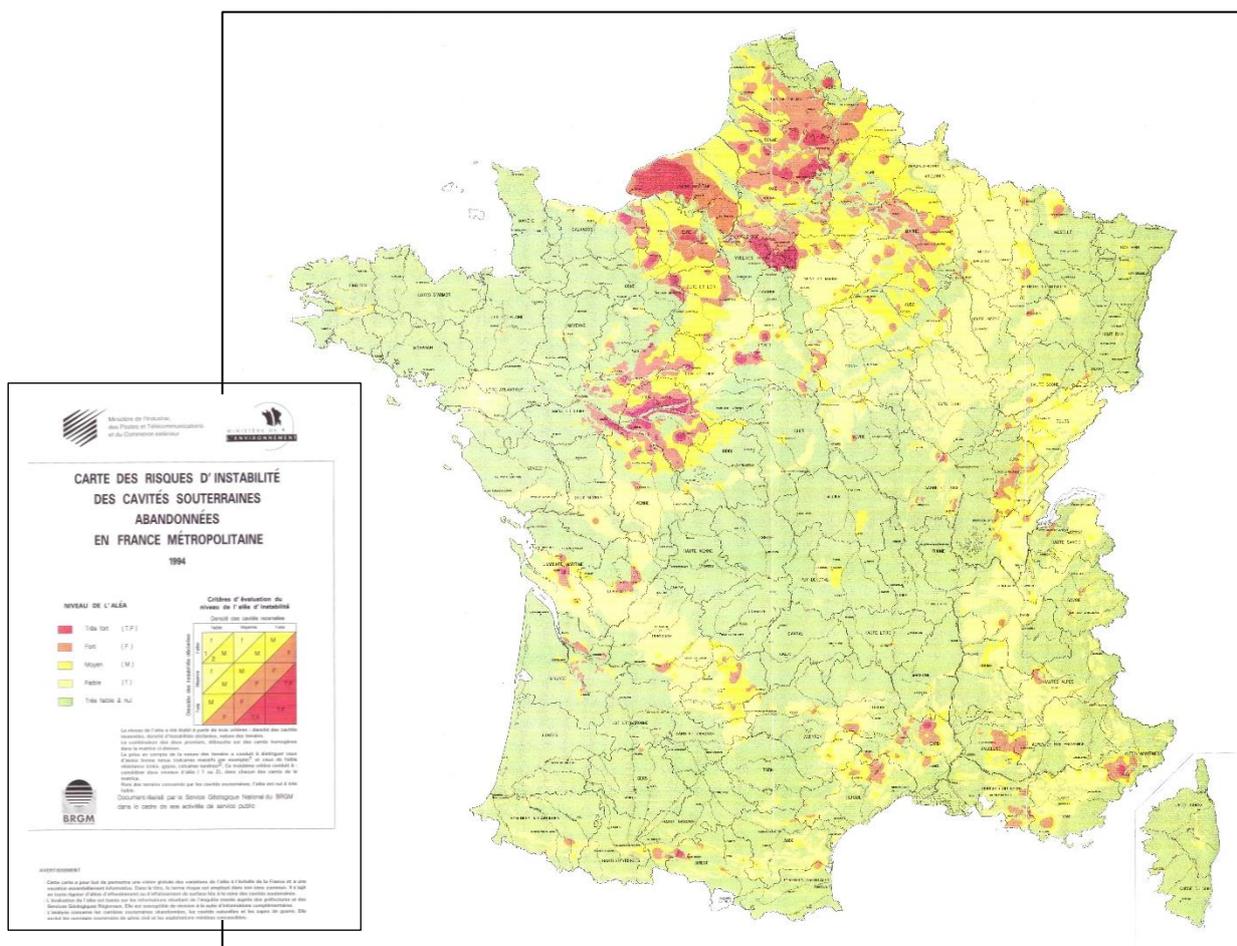


Figure 1 : Ancienne carte nationale de l'aléa cavité (BRGM, 1994)

Les résultats obtenus avaient fait l'objet d'une validation par experts (services déconcentrés de l'Etat, services et inspections des carrières, géologues régionaux du BRGM). La principale limite exposée dans le rapport, est une sous-évaluation de l'aléa dans les zones mal informées, et ce malgré la validation par des experts départementaux ou régionaux. Le rapport précisait ainsi que cette carte devait constituer une première étape d'une cartographie évolutive.

Depuis 1994, les connaissances relatives à la présence de cavités ont largement progressé (connaissances principalement acquises dans le cadre des inventaires départementaux cavités et mouvements de terrain), tout comme les méthodes statistiques d'exploitation de ces données, la connaissance et la cartographie de facteurs clés (carte géologique harmonisée au 1/50 000, modèle 3D dans certaines zones...), et plus généralement, les méthodologies de cartographies des phénomènes de mouvement de terrain. Tout ceci justifie la réalisation d'une nouvelle carte, tirant parti des avancées de connaissance, de méthodologies et d'outils.

Concernant la cartographie de présence ou d'effondrement de cavités, le BRGM utilise classiquement les principes méthodologiques développés dans le cadre de l'étude Scénario Départementaux Cavités (Fontaine *et al.*, 2008), qui présentent l'avantage d'utiliser des méthodes statistiques de traitement des données d'entrée, et d'être applicables à l'ensemble des typologies de cavités (naturelles ou anthropiques) pour différentes échelles. Cette méthodologie a été appliquée sur plusieurs cas, depuis l'échelle communale jusqu'à l'échelle régionale.

En 2020, le BRGM a réalisé une étude de faisabilité de réalisation d'une cartographie de susceptibilité de présence de cavités souterraines (hors mines) sur l'ensemble du territoire métropolitain, avec une validité à l'échelle 1/50 000ème. Elle fait l'objet du rapport BRGM/RP-70461-FR (Vanoudheusden *et al.*, 2020). L'idée initiale était de découper l'ensemble du territoire métropolitain en secteurs « homogènes » vis-à-vis de la présence de cavités, d'échelles départementales ou interdépartementales, et d'y appliquer la méthode des Scénarios Départementaux Cavités. Cette étude de faisabilité a montré l'intérêt d'utiliser cette méthode, mais aussi les difficultés de mener à bien une telle approche (multiplier l'application de la méthode pour chacun des secteurs identifiés) pour l'ensemble du territoire métropolitain et pour l'ensemble des typologies de cavités, vis-à-vis de l'identification des facteurs adéquats.

Cette étude a aussi consisté à réaliser un premier inventaire des cartographies existantes au sein des travaux réalisés par le BRGM avant 2018.

1.2. APPROCHE GLOBALE

L'étude, objet du présent rapport, prolonge les travaux réalisés en 2020, via :

- La réalisation, à l'échelle de la France métropolitaine, d'une première série de cartes de susceptibilité de présence de cavités, s'appuyant sur la méthodologie cartographique des Scénarios Départementaux Cavités via la carte lithologique au 1/50 000ème de la France (élaborée par le BRGM et établie en 2020) ;
- Une analyse préliminaire des cartographies recensées : quelles sont les méthodologies ? leurs limites ?

2. Esquisse de la carte à l'échelle de la France métropolitaine

L'essentiel du travail ici réalisé a consisté en la production de cartographies de susceptibilité de présence de cavités, en s'appuyant sur les principes méthodologiques développés par le BRGM dans le cadre de l'étude Scénarios Départementaux Cavités (Fontaine *et al.*, 2008).

2.1. RAPPEL DE LA METHODE DES SCENARIOS CAVITES

Le principe de cette méthode est l'utilisation d'outils statistiques pour quantifier la susceptibilité de présence de cavités à partir de données qualitatives (par exemple la nature du substrat) et/ou de données quantitatives (comme la distance aux réseaux hydrographiques) en s'appuyant sur un inventaire de cavités, même non-exhaustif. Ces données représentent des facteurs de prédisposition.

L'évaluation des niveaux de susceptibilité passe par les étapes ci-dessous (Figure 2) :

- Posséder un inventaire d'évènements significatifs du phénomène étudié (ici la présence de cavités souterraines) selon le secteur souhaité. Il convient que l'inventaire soit suffisamment garni pour permettre une bonne représentativité des phénomènes ;
- Déterminer les critères explicatifs (ou facteur de prédisposition) justifiant la répartition des cavités au sein du territoire français à partir de la documentation bibliographique et des informations d'experts présentes dans les rapports d'inventaire ;
- Par le biais d'outils spécifique (SIG et géostatiques) réaliser le croisement entre l'inventaire des cavités et les facteurs déterminés, et obtenir la quantification et la cartographie des niveaux de susceptibilités pour chaque type de cavité.

C'est à partir des facteurs de prédisposition choisis que l'indice de susceptibilité est calculé, il résulte de la combinaison de chacun des facteurs retenus.

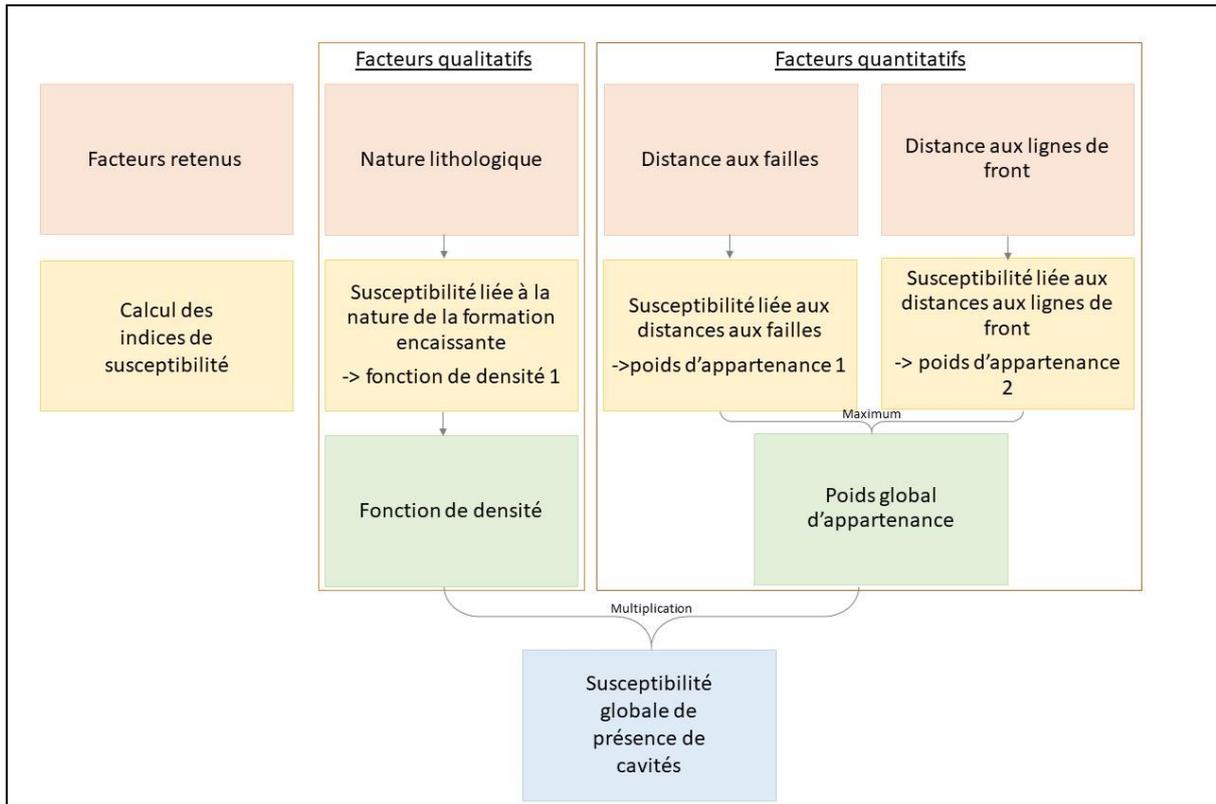


Figure 2 : Schéma explicatif du principe de quantification du niveau de susceptibilité

Il est à noter que la méthodologie de Fontaine *et al.*, 2008 propose deux outils pour quantifier le niveau de susceptibilité :

- la « théorie des évidences » découlant sur la création d'une fonction de densité traitant les critères qualitatifs. Elle repose sur la théorie du « poids des évidences » ou « Weight of Evidence » dérivant de la méthode probabiliste de Baynes (Fontaine *et al.*, 2008). Cette théorie permet la mise en avant d'endroits favorables à des phénomènes, ici la présence de cavité souterraine. Elle va, en d'autre terme, permettre de traiter l'hétérogénéité du secteur : un secteur sans cavité mais comportant la même lithologie qu'un secteur possédant des cavités se verra attribuer le même poids pour les deux zones. La fonction de densité se calcule de la manière suivante (Équation 1) avec d représentant le poids de susceptibilité, n correspondant au nombre de cavités positionnées dans une formation lithologique donnée, N signifiant le nombre total de cavité, s la surface d'une formation lithologique et S la surface totale.

$$d = \frac{(n/N)}{(s/S)}$$

Équation 1 : Poids des évidences © Fontaine M., Nachbaur A., Rohmer J (2008)

- la « logique floue » dérivant sur la création d'une fonction de possibilité traitant les critères quantitatifs. Les équations du poids d'appartenance se calent sur le graphique présentant le nombre de cavité en fonction du facteur de prédisposition. C'est à partir de celles-là que les indices de susceptibilités sont calculés de 0 à 1 (Figure 3).

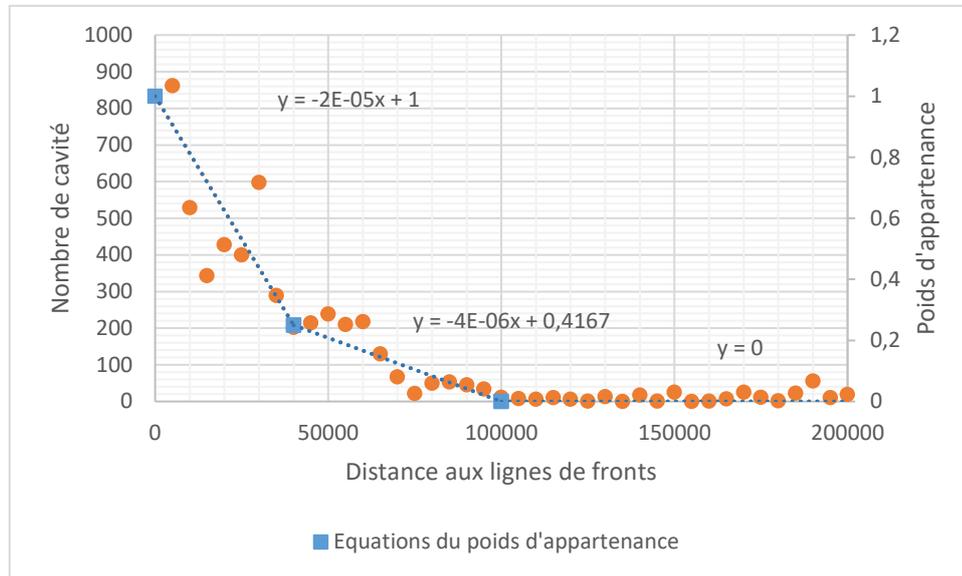


Figure 3 : Exemple de répartition du nombre d'ouvrages militaires et poids d'appartenance en fonction des distances aux lignes de front

2.2. DONNEES D'ENTREE

2.2.1. BDCavité

La BDCavité, base de données cataloguant l'inventaire des cavités souterraines abandonnées recensées en France métropolitaine, est gérée par le BRGM.

Les cavités recensées résultent principalement d'informations acquises au cours d'inventaires départementaux réalisés sur une période de temps s'étalant de 2001 à 2015, et pouvant être encore en cours pour certains départements comme ceux de Normandie. L'inventaire est complété aujourd'hui par des études ponctuelles et/ou des mises à jours départementales. C'est donc une base de données qui n'est pas définitive et est à caractère évolutif au cours du temps.

La BDCavité permet d'obtenir une vision globale de la présence des différentes typologies de cavités en France métropolitaine. Elle apporte diverses informations sur les cavités telles que :

- Le type et la nature des cavités ;
- Le numéro, le nom et la localisation de la cavité ;
- Les coordonnées x et y en Lambert 93 ;
- Le statut de confidentialité et celui de diffusion ;
- Enfin, la date de validité des données, date à laquelle la cavité a été identifiée pour la dernière fois et la date de mise à jour des informations.

La BDCavité recense un nombre de 189 888 cavités souterraines en mars 2022, cependant 1 477 cavités sont localisés hors de la France métropolitaine, en milieu marin ; l'étude est donc basée sur 188 411 cavités souterraines (Tableau 1). Elles sont divisées selon différentes typologies à savoir : des caves, des carrières, des cavités naturelles, des ouvrages civils ou militaires ou encore des cavités indéterminées (ie dont la typologie est indéterminée) ; chaque type étant ensuite divisé en diverses natures.

Tableau 1 : Répartition des cavités selon leur typologie en mars 2022 ; les données en vert ne sont pas utilisées pour l'étude

Type de cavité	carrière	cave	naturelle	ouvrage civil	ouvrage militaire	indéterminé	autres	Total
Après traitement	41 829	18 349	81 583	18 505	6 903	20 477	765	188 411

La répartition cartographique des cavités selon les typologies est en Annexe 1. Une première limite d'un tel inventaire est son caractère non exhaustif. En effet, il est illusoire de chercher à recenser l'ensemble des cavités présentes sur l'ensemble du territoire métropolitain. Les cavités recensées résultent principalement d'informations acquises au cours d'inventaires réalisés sur une période de temps assez longue (2001-2015 – inventaires encore en cours en Normandie). De ce fait, les données sont assez disparates d'un département à l'autre, et pas toujours homogènes. Il convient de bien garder en tête ces limites dans l'analyse à venir de la répartition des cavités. De plus, certains secteurs présentent de fait un inventaire plus pauvre :

- en Ile-de-France puisque ce secteur est géré par les inspections générales des carrières (IGC) ou par le service interdépartemental des cavités. Cela concerne plus précisément Paris, les Yvelines, l'Essonne, les Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis, le Val-de-Marne et le Val-d'Oise (Géorisque) ;
- le département de l'Indre-et-Loire géré par un organisme public, Cavités 37. Une multitude de données ne sont pas disponibles, c'est pourquoi les résultats obtenus au cours de cette étude y sont donnés à titre indicatif et nécessiteraient davantage d'analyse afin d'être validés.

2.2.2. Carte lithologique

La France métropolitaine possédait jusqu'à récemment uniquement une carte lithologique simplifiée à 1/1 000 000. Cette carte réalisée en 2008 ne permettait pas une représentation précise de la lithologie c'est pourquoi une carte à 1/50 000 a été réalisée à partir de données existantes. En 2019 une première version de la carte lithologique à 1/50 000 de la France métropolitaine a été créée ; elle correspond à la version 0 de la carte lithologique (BRGM, 2020). Une mise à jour de cette carte avec un niveau de détail plus important sur la description de la lithologie a depuis été réalisée, département par département, menant à la carte lithologique à 1/50 000 utilisée dans cette étude (Figure 4).

Il est à noter que la carte lithologique permet la visualisation des natures des roches en ne prenant plus en compte les âges stratigraphiques, dès lors elle permet *in fine* de préserver l'information en se libérant de la contrainte temporelle. De plus, la création de cette carte a été réalisée à partir des cartes géologiques harmonisées (GCH) à 1/50 000 contenant des informations sur la lithologie (Bialkowski A. *et al.*, 2021). La nature des roches est ainsi codée selon 3 niveaux et 150 codes lithologiques. Les niveaux se déclinent de la façon suivante :

- Le niveau 1 représente les types de roche et comporte 6 codes d'entrée ;

- Le niveau 2 comporte 29 codes d'entrée et vient donner un premier niveau de détail du niveau 1 ;
- Le niveau 3 englobe 113 codes d'entrée, permettant un niveau de détail encore plus important ;
- Et un qualificatif préservant le niveau de détail complet de l'information d'origine (niveau 3Q).

De surcroît, chaque niveau apporte une information, le niveau 1 correspond au niveau le plus large, indiquant seulement le type de roche, puis le niveau 2, 3 et 3Q complètent cette information avec un adjectif caractérisant l'origine de formation de celle-ci par exemple. Notons cependant que chaque niveau 1 ne comporte pas forcément de niveau 3Q.

Le niveau 3Q n'est pas utilisé dans cette étude puisque le niveau 1 ne possède pas toujours cette information. Par ailleurs la précision du niveau 3 bien est suffisante.

En géologie, on distingue trois grands types de roche (ici niveau 1) que l'on différencie par leur mode de formation :

- les roches magmatiques (ou roches ignées) : elles résultent de la cristallisation d'un magma ;
- les roches sédimentaires : ce sont des roches exogènes, c'est à dire formées à la surface de la Terre ;
- les roches métamorphiques : roches résultant de la transformation, à l'état solide, d'une roche originelle du fait d'une augmentation de pression et/ou de température. Lors de cette transformation, il y a généralement cristallisation de nouveaux minéraux (néoformés) et la roche acquière une texture particulière (ex : schistosité = débit en feuillets).

Pour le niveau 1, s'ajoutent également les matériaux anthropiques (terrassment par exemple), les roches d'origine hydrothermales et les roches résiduelles (altérites, sols, alluvions par exemple).

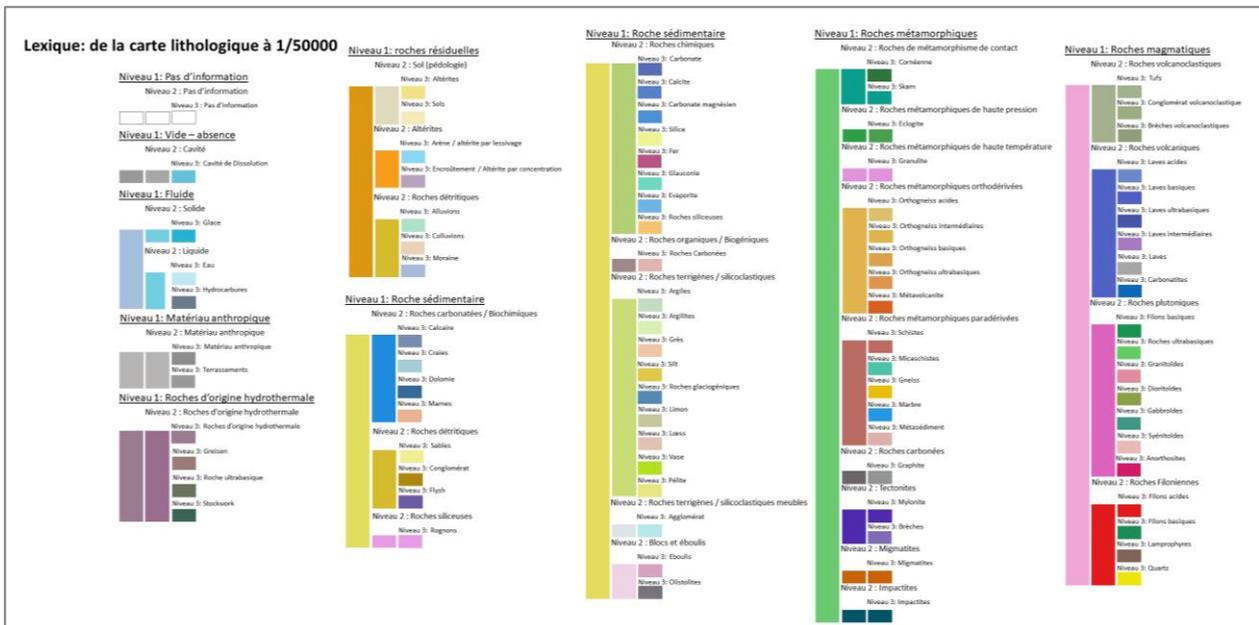
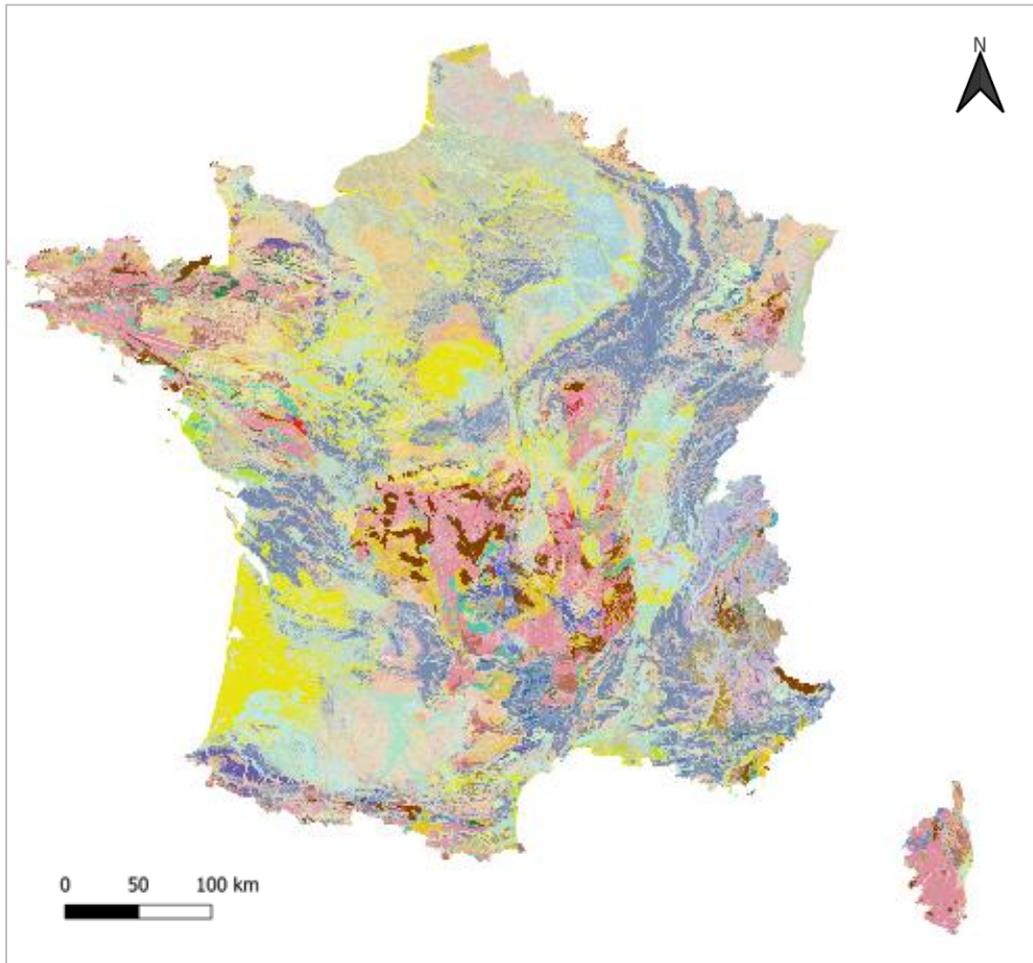


Figure 4 : Carte lithologique à 1/50 000 selon le niveau 3

Les surfaces couvertes par les différentes lithologies sont variables selon les types de roches (Tableau 2) et se décline ainsi, de la plus grande à la plus petite superficie : les roches sédimentaires, les roches métamorphiques et magmatiques et enfin les matériaux anthropiques.

Tableau 2 : Répartition des surfaces lithologiques selon les niveaux 1 et 2
(avec en rouge les plus grandes superficies et en gras les superficies totales par niveau 1)

Niveau 1	Niveau 2	Superficie (km ²)
Roches sédimentaires	Bloc et éboulis	6 731,64
	Roches carbonatées / Biochimique	137 738,61
	Roches chimiques	7 034,51
	Roches détritiques	65 778,56
	Roches organiques / biogéniques	1 048,64
	Roches siliceuses	1,76
	Roches terrigènes / silicoclastiques	128 339,09
	Roches terrigènes / silicoclastiques meubles	14 395,84
	total	361 068,64
Roches résiduelles	Altérites	7 343,58
	Roches détritiques	70 594,35
	Sol (pédologie)	258,67
	total	78 196,59
Roches métamorphiques	Impactites	47,89
	Migmatites	6 515,97
	Roches carbonées	1,25
	Roches de métamorphisme de contact	2 183,87
	Roches métamorphiques de haute pression	58,73
	Roches métamorphiques de haute température	15,67
	Roches métamorphiques orthodérivées	8 264,69
	Roches métamorphiques paradérivées	36 110,77
Tectonites	337,49	
	total	53 536,32
Roches magmatiques	Roches filoniennes	1 896,55
	Roches plutoniques	42 880,55
	Roches volcaniques	5 316,22
	Roches volcanoclastiques	3 266,83
	total	53 360,15
Matériaux anthropiques	Matériaux anthropiques	473,40
	total	473,40

Une première limite, importante à prendre en compte lors de l'étude, est que les cavités peuvent parfois être creusées dans des couches situés sous celles cartographiées par la carte lithologique, comme par exemple le cas des marnières en Normandie situées au sein des formations crayeuses sous les limons affleurants.

2.2.3. Autres données utilisées

Afin de compléter l'étude, initialement uniquement portée sur la lithologie, d'autres critères ont été ajoutés en vue d'analyser leur pertinence. Il s'agit :

- De la carte géologique : la distance aux failles ;
- Des limites administratives : les frontières métropolitaines ;
- Le trait de côte ;
- Les lignes de front de la Première et de la Deuxième Guerre Mondiale.

2.3. ANALYSE ET DISCUSSION PAR TYPOLOGIE DE CAVITE

2.3.1. Poids d'appartenance calculés pour chaque typologie de cavités, selon le critère de la lithologie

Les cavités recensées sont localisées au sein de tous les types de roches (sédimentaires, magmatiques et métamorphiques) et réparties en nombreuses couches géologiques. Selon les types de cavités, leur agencement est préférentiel pour certains types de roches. En effet, les cavités de types carrières, caves naturelles et indéterminées se situent abondamment dans des roches sédimentaires telles que les marnes, les craies, les sables, les argiles ou encore les calcaires. Les ouvrages civils sont quant à eux indépendants de la géologie : leur répartition varie selon le besoin en tunnel ou en aqueduc et non selon le type de roche. C'est également le cas pour les ouvrages militaires : leur répartition est expliquée par la géographie et l'histoire.

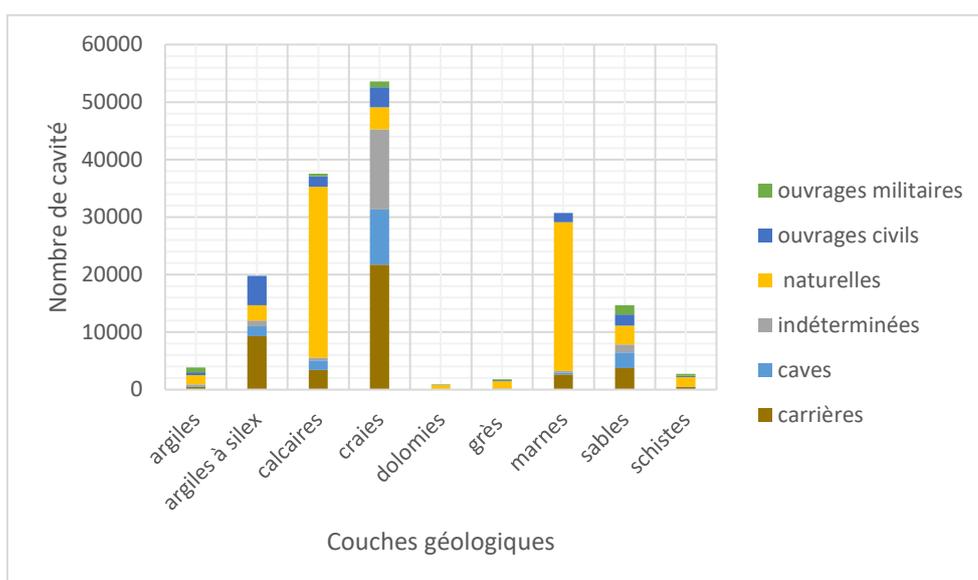


Figure 5 : Répartition des typologies de cavité dans les principales couches géologiques

Il convient néanmoins de considérer que les surfaces d'affleurement des différentes roches sont très variables sur le territoire : la part des roches sédimentaires représente 65,75% du territoire, celle des roches métamorphiques 9,75% et celle des roches magmatiques représente 9,71%. Le reste comprend les roches résiduelles, les roches d'origine hydrothermale, les matériaux anthropiques, les fluides, et les éléments sans information (Figure 4).

Tableau 3 : Répartition des types de cavité au sein des 3 grands types de roches

Type de cavité	Roches sédimentaires	Roches métamorphiques	Roches magmatiques
Naturelles	95%	3%	0,9%
Carrières	98%	1,5%	0,5%
Caves	97%	1,8%	0,9%
Civils	83%	8,8%	7,58%
Militaires	74%	14,3%	11,2%
Indéterminées	99%	0,3%	0,7%

Tableau 4 : Poids d'appartenance bruts de chaque lithologie

En rouge les poids calculés les plus élevés ; *valeurs discutée ci-après ; Case vide : absence de lithologie pour certain type de cavité

Type de roches	Lithologie	Carrière	Cave	Naturelle	Ouvrage civil	Ouvrage militaire
ROCHES SEDIMENTAIRES	Agglomérats	0,115	0,073	0,363	0,414	0,570
	Argiles	1,195	0,588	0,807	1,510	0,287
	Argilites	0,469	0,073	0,367	0,764	0,707
	Brèches	0,358	0,076	3,583	0,581	0,136
	Calcaires	0,619	1,499	2,981	0,627	0,525
	Carbonates	0,994	1,360	9,686	2,697	1,208
	Carbonates magnésien	0,398		0,510		
	Conglomérats	0,134	0,771	0,702	0,389	0,476
	Craies	3,498	16,358	0,507	3,620	1,939
	Dolomies	0,168	0,044	6,827	0,205	0,450
	Evaporites	2,629		1,186	0,238	0,958
	Flysh	0,141		0,199	0,043	0,231
	Grès	0,141	0,047	0,305	0,472	1,357
	Limons	6,386*	0,248	1,057	3,509	2,269
	Loess	0,986	0,683	0,082	0,982	7,630
	Marnes	0,418	0,178	1,402	0,624	0,670
	Olistolites			3,417		
	Pérites	0,060		0,246	0,121	
	Roches carbonées	0,025		0,104	0,057	0,154
	Roches glycoligéniques			1,060		
	Roches siliceuses	11,856*	0,411	1,950	8,151	0,852
	Sables	0,415	0,972	0,292	0,489	0,662
	Silices	0,452		0,348		
Silts	0,335	0,348	0,100	0,316	0,112	
Vases	0,006	0,027	0,046	0,067		
ROCHES RESIDUELLES	Alluvions	0,130	0,292	0,593	0,364	1,315
	Altérites	0,609	0,298	0,171	0,198	0,004
	Arène / altérite par lessivage				0,587	
	Colluvions	0,145	0,369	0,979	0,416	0,707
	Eboulis	0,134	0,033	0,728	0,272	2,062
	Encroutement / altérite par concentration	0,063		0,884	0,071	1,142
	Moraines	0,069	0,063	0,507	0,155	0,919
ROCHES METAMORPHIQUES	Cornéennes	0,018	0,014	0,077	0,204	0,110
	Ecoligites				1,516	
	Gneiss	0,041	0,032	0,056	1,401	0,883
	Impactites				1,859	
	Marbres	0,099	0,090	20,827*	0,313	0,842
	Métasédiments	0,137	0,020	0,136	0,378	1,352
	Micaschistes	0,029	0,026	0,055	0,548	1,104
	Migmatites	0,020	0,445	0,045	1,020	1,150
	Mylonites	0,117	0,089	0,020	0,615	0,709
	Orthogneiss acides	0,014	0,009	0,045	0,844	0,480
	Orthogneiss basiques	0,044		0,112	0,435	0,159
	Orthogneiss intermédiaires			11,159*		
	Orthogneiss ultrabasiques			0,224	0,423	
Schistes	0,285	0,038	0,204	0,347	0,296	
ROCHES MAGMATIQUES	Brèches volcanoclastiques	0,200	17,487*	0,182	2,865	0,203
	Conglomérat volcanoclastique			0,108		0,428
	Dioritoïdes			0,066	0,290	0,779
	Filons acides		0,042	0,029	0,651	0,564
	Filons basiques		0,091	0,918	0,090	2,659
	Gabbroïdes				0,352	1,653
	Granitoïdes	0,032	0,036	0,031	0,781	0,775
	Lamprophyres			0,181	0,796	2,139
	Laves	0,063		0,033	0,143	
	Laves acides	0,070		0,311	1,109	0,142
	Laves basiques	0,080	0,067	0,117	0,476	0,026
	Laves intermédiaires	0,168		0,069	0,305	5,115
	Laves ultrabasiques	0,027	1,755	0,099	0,186	
	Quartz	1,224		0,264	0,728	2,348
	Roches ultrabasiques	0,299	0,681	0,460		
Syenitoïdes			0,333			
FLUI -DE	Tufs	0,083	2,126	0,089	0,250	1,007
	Pas d'information	0,134		1,617	1,027	
	Eau	0,167		0,248	0,139	0,214
M A T E R I A D	Glace			0,153	0,067	
	Matériaux anthropiques	3,385	11,344	0,326	5,167	8,785
	Terrassements	0,666		1,025	3,013	

La première phase de travail a donc consisté à calculer, pour chaque typologie de cavités (carrière, cave, cavité naturelle, ouvrage civil, ouvrage militaire), les poids d'appartenance bruts (Tableau 4) affectés à chaque lithologie à partir de l'Équation 1. Ces résultats peuvent être présentés sous la forme du graphique de la Figure 6 qui présente le nombre de cavités en fonction des poids d'appartenance, pour chacun des types de cavités, selon le critère de la lithologie.

Un tel graphique permet d'analyser et de comparer l'ensemble des résultats obtenus les uns par rapport aux autres. Les courbes relatives aux cavités naturelles, aux carrières et aux caves montrent plusieurs « pics » le long de la courbe, correspondant ainsi à différentes lithologies pour lesquelles le nombre de cavités associées à une valeur de poids d'appartenance est caractéristique : par exemple plus de 35 000 cavités naturelles associées à un poids de 2,98, plus de 15 000 carrières avec un poids de 6,39 et environ 8 000 caves et un poids de 16,36. Au contraire, pour ce qui est des ouvrages militaires et des ouvrages civils, les poids d'appartenances varient très peu, ils sont proches de 0 et ne montre pas de « pic » particulier.

On met ainsi en évidence les types de cavités pour lequel la lithologie a un impact (à savoir les caves, les cavités naturelles et les carrières) et ceux pour lesquels la lithologie n'apparaît pas « statistiquement » comme un facteur de détermination.

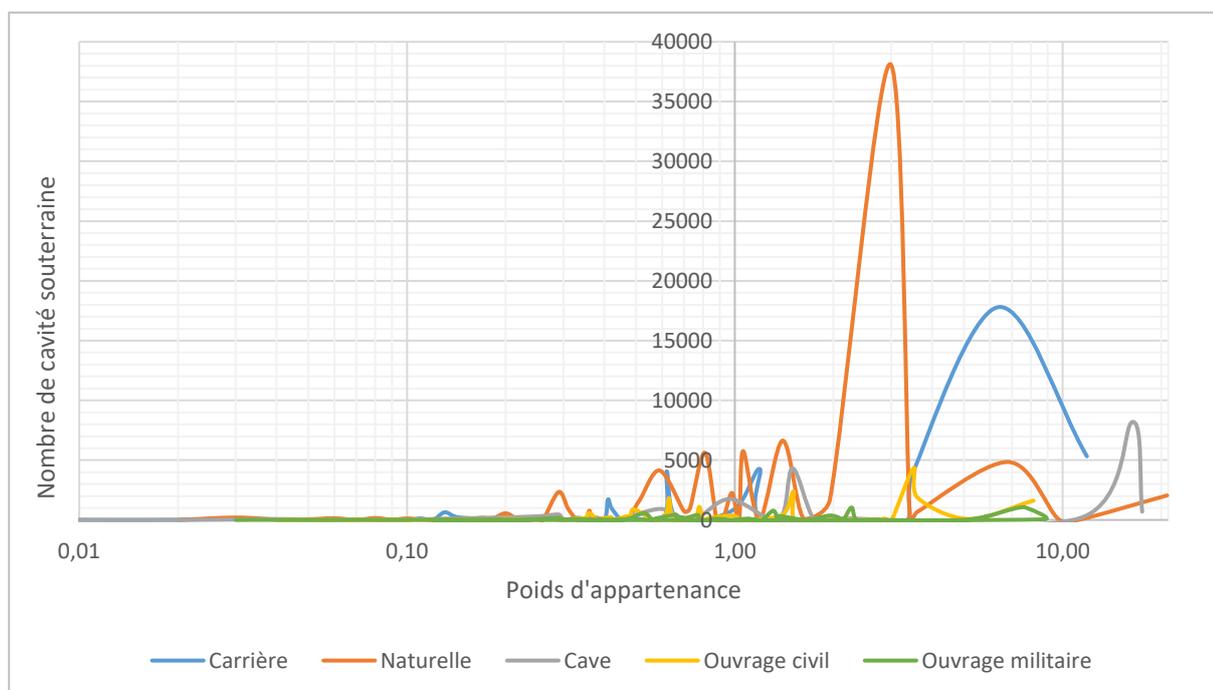


Figure 6 : Répartition du nombre de cavités en fonction du poids d'appartenance selon le facteur lithologie, pour chacun des types de cavités

2.3.2. Les cavités de type carrière

Les poids d'appartenance calculés selon la « théorie des évidences » sont compris dans une gamme variable selon le type de roche, voir ci-dessous sur la Figure 7. Les variations les plus importantes concernent les roches sédimentaires, les valeurs vont de 0,006 pour les vases à 11,86 pour les roches siliceuses.



Figure 7 : Répartition des poids d'appartenance au sein des différents types de roches pour les carrières

C'est à partir de ces résultats qu'une première cartographie brute montrant les poids d'appartenance est représentée sur la Figure 8. La palette de couleur choisie va de la couleur verte pour des poids d'appartenance faibles, au violet pour les poids d'appartenance les plus forts.

Pour rappel, certains départements de l'Île-de-France - Paris, les Yvelines, l'Essonne, les Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis, le Val-de-Marne et le Val-d'Oise – ne sont pas analysés au sein de cette étude, l'inventaire de celui-ci dépendant de l'IGC n'étant pas disponible. De plus, 109 communes de l'Indre-et-Loire comportent un inventaire peu complet ; ces communes sont rattachées au syndicat Cavités 37 qui ne divulgue pas les données. Les résultats de ce secteur sont présentés à titre d'indication, mais sont empreints d'une forte incertitude connue compte tenu de données incomplètes.

La carte obtenue montre une similitude certaine avec la carte lithologique mettant en avant les différents bassins géologiques. En effet, les bassins métamorphiques et magmatiques apparaissent avec un poids d'appartenance faible, de couleur verte contrairement aux bassins sédimentaires qui présentent un poids d'appartenance parfois très élevé (violet). Le bassin de Paris montre des valeurs élevées, notamment en Haute-Normandie, connue pour ces nombreuses carrières, ou encore en Alsace.

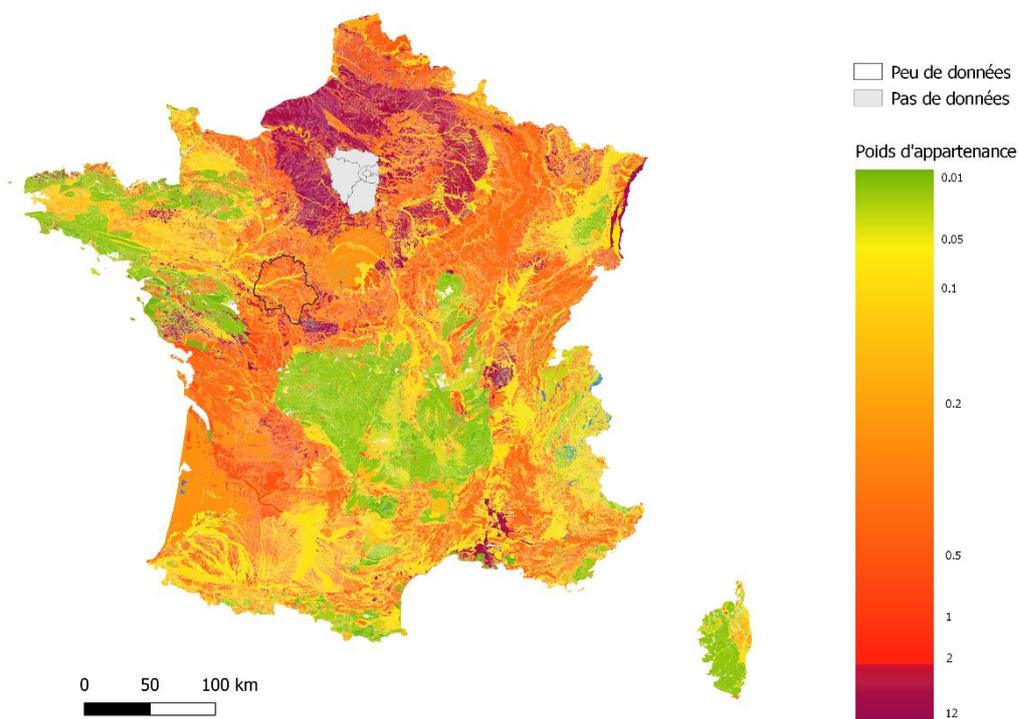


Figure 8 : Cartographie brute des poids d'appartenance pour les cavités de type carrière

La Figure 9 présente les poids d'appartenance calculés en fonction de la superficie des différentes lithologies. Ici, deux lithologies se distinguent avec un poids d'appartenance et une superficie élevée, les roches siliceuses, qui sont des roches sédimentaires contenant une forte proportion en silice (supérieur à 50%) d'origine variée : chimique, biologique ou biochimique ; et les limons, roches sédimentaires correspondant à un « dépôt détritique meuble, argileux et silteux à grain très fin » (Foucault A et al., 2014).

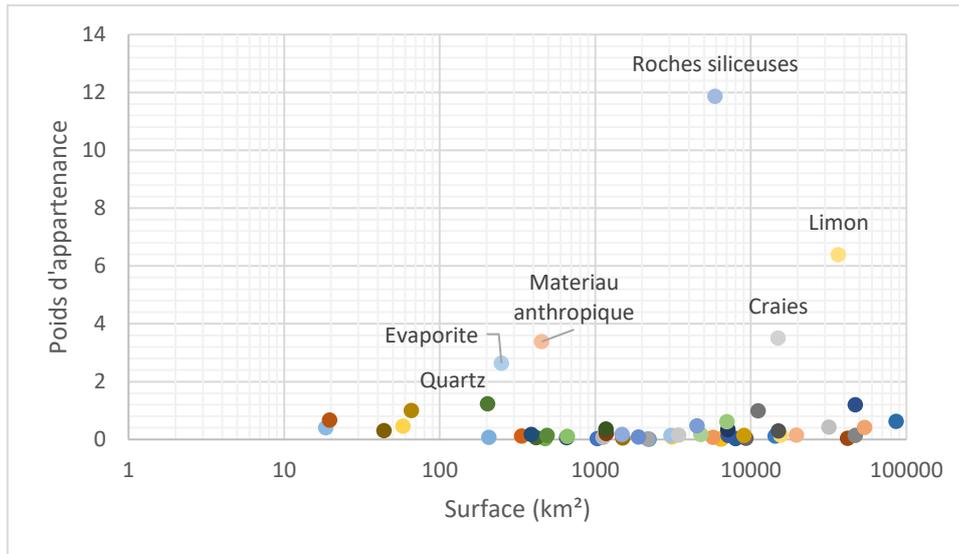


Figure 9 : Répartition des poids d'appartenance en fonction des lithologies de surface pour les cavités de type carrière ¹

La cartographie brute de poids d'appartenance des carrières ainsi que le graphique de la répartition des poids d'appartenance en fonction de la surface des lithologies suscitent quelques analyses complémentaires.

Tout d'abord, la question du poids d'appartenance des limons est à aborder. En Normandie, secteur apparaissant avec un poids très élevée, la carte lithologique indique des limons recouvrant les terrains calcaires et crayeux dans lesquels ont été creusées les carrières. La particularité de la méthode du poids des évidences est qu'elle calcule un certain poids aux limons tenant compte de cette forte proportion de carrières attribué par défaut à cette lithologie de surface. La question serait de déterminer comment est influencé le poids des limons par ces nombreuses carrières présentent en Normandie (29 687 sur 41 829 au total) ? Qu'en est-il de l'Alsace, zone de limons, où un poids élevé est aussi attribué ? Afin de répondre à ce questionnement, des poids d'appartenance sont recalculés séparément pour la Normandie, l'Alsace puis pour la métropole sans prendre en compte le poids soumis à la Normandie (Tableau 5).

Tableau 5 : Calcul du poids d'appartenance selon différentes configurations pour les cavités de type carrière dans les limons

Régions	Normandie seule	Alsace seule	Métropole sans la Normandie	Métropole avec la Normandie
Superficie (km ²)	/	/	/	549 080,03
Nombre de carrières	29 687	46	12 142	41 829
Nombre de carrières dans les limons	17 146	2	662	17 808
Superficie des limons	6 016,81	1 299,53	30 591,37	36 608,18
Poids d'appartenance	37,41	0,020	0,28	6,39

¹ Dans une logique de clarté, les étiquettes de données comportant des poids d'appartenance inférieur à 1.5 ne sont pas indiquées. On trouvera un graphique précisant l'ensemble des lithologies en Annexe 1a.

Ces analyses montrent ainsi que le poids d'appartenance des limons pour les carrières est conditionné par les carrières de Normandie. En effet, lorsque l'on isole la Normandie, le poids des limons sur ce territoire équivaut à 37,41 (Tableau 5) induisant ainsi un risque de susceptibilité de présence très élevée. Au contraire, le calcul du poids d'appartenance des limons en Alsace aboutit à un poids de 0,020, et celui de la métropole sans la Normandie donne 0,28, donc un poids d'appartenance nulle à faible (Figure 10). De ce fait, on déduit l'influence très forte des carrières de Normandie sur le reste du territoire, et le choix est fait de recalculer indépendamment un poids pour l'ensemble de la métropole en isolant la Normandie et un poids spécifique à la Normandie. La carte de susceptibilité de présence de carrières peut dès lors être ajustée ajoutant davantage de précision.

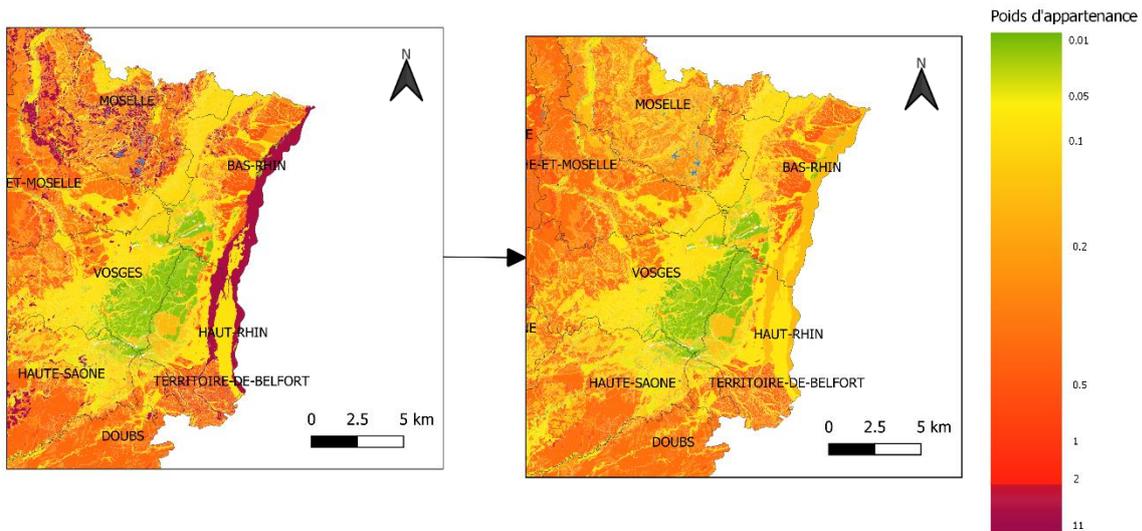


Figure 10 : Modification du poids d'appartenance des limons pour les cavités de type carrière en dissociant la Normandie (gauche : avant modification ; droite : après modification) – Zoom sur le nord-est de la métropole

Un questionnement sur le poids énoncé pour les roches magmatiques et métamorphiques est posé puisque celui-ci semble faible. Le nombre des carrières dans les roches magmatiques est de 190 et celui dans les roches métamorphiques de 439. Une hypothèse possible serait que la majorité des carrières de matériaux magmatiques et métamorphiques soient exploitées à ciel ouvert expliquant ainsi un nombre faible de cavités recensés dans la base de cavités souterraines, et donc un poids faible. Afin d'y répondre, l'utilisation de la base de données CARMA (carrière et matériaux – gérée par le BRGM) est consultée. Le résultat de l'analyse n'est pas concluant : en effet la base ne renseigne généralement pas sur le caractère d'une exploitation à ciel ouvert ou en souterrain des carrières recensées. Toutefois, il semble probable que la plupart des carrières de roche magmatique ou métamorphique soit exploitée à ciel ouvert puisque celles-ci ne sont pas recensées dans la BDCavité (caractéristique a priori facile d'accès dans le cadre des inventaires départementaux).

2.3.3. Les cavités naturelles

Les poids d'appartenance calculés selon la « théorie des évidences » sont compris dans une gamme variable selon le type de roche (Figure 11) Les variations sont comprises dans une gamme allant de 0,020 pour la mylonite à 20,83 pour le marbre.



Figure 11 : Répartition des poids d'appartenance des différents types de roches pour les cavités naturelles

C'est à partir de ces résultats qu'une première cartographie brute montrant les poids d'appartenance est représentée sur la Figure 12. La palette de couleur choisie va de la couleur verte pour des poids d'appartenance faibles, au violet pour les poids d'appartenance les plus forts.

La carte obtenue montre une similitude certaine avec la carte lithologique mettant en avant les différents bassins géologiques. En effet, les bassins métamorphiques et magmatiques apparaissent avec un poids d'appartenance faible, de couleur verte contrairement aux bassins sédimentaires qui présentent un poids d'appartenance parfois très élevé (violet).

Les poids d'appartenances calculés (Figure 13) pour ces cavités induisent une bonne corrélation avec la lithologie (Figure 6), en effet, la courbe correspondant aux cavités naturelles montre de nombreuses variations avec un pic atteignant un poids supérieur à 1 pour plus de 35 000 cavités naturelles (sur 81 583).

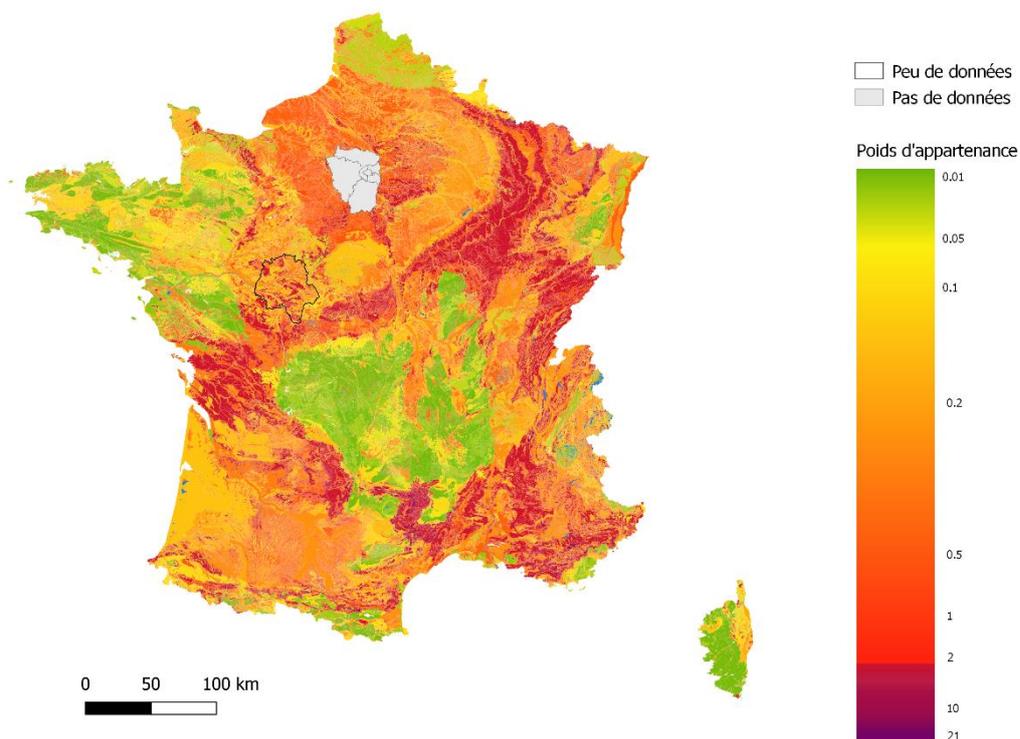


Figure 12 : Cartographie brute des poids d'appartenance pour les cavités naturelles

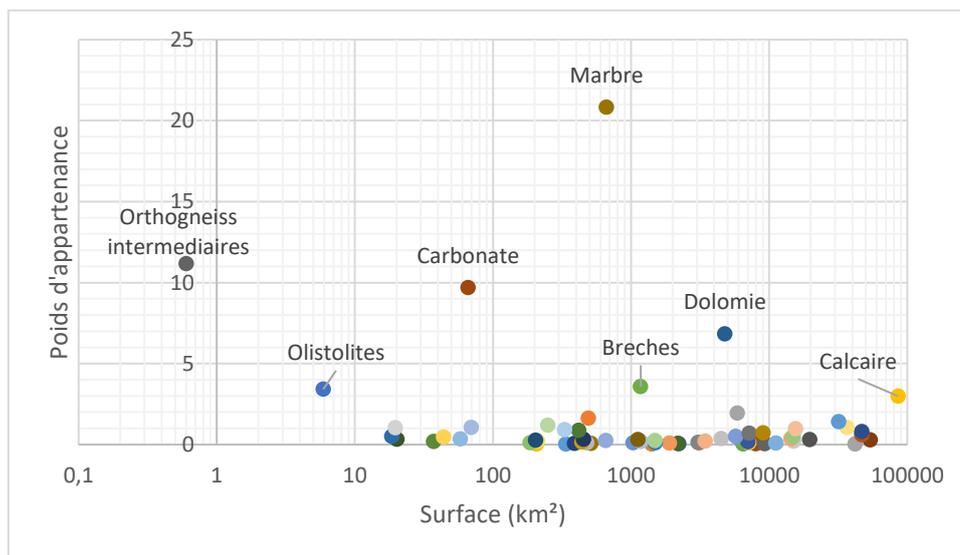


Figure 13 : Répartition des poids d'appartenance en fonction des lithologies de surface pour les cavités naturelles²

² Dans une logique de clarté, les étiquettes de données comportant des poids d'appartenance inférieur à 1.5 ne sont pas indiquées. On trouvera un graphique précisant l'ensemble des lithologies en Annexe 1b.

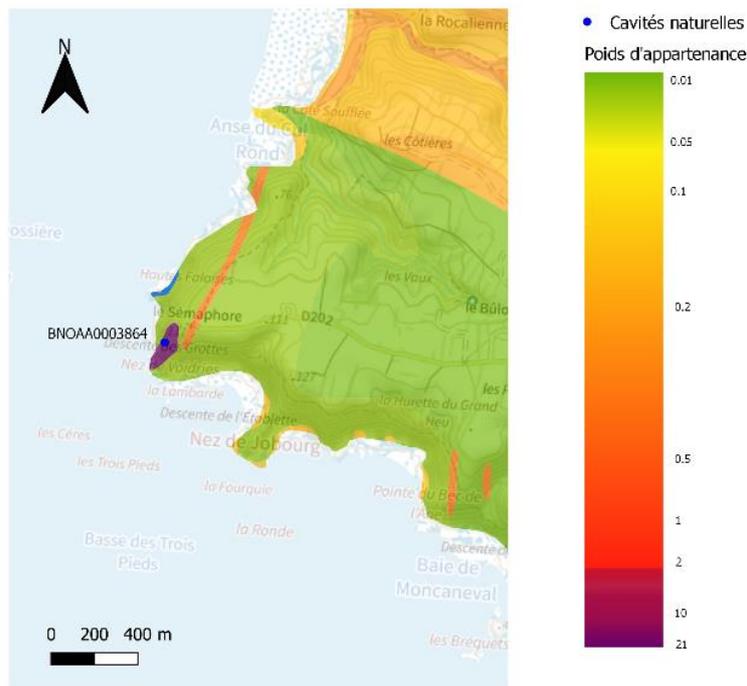


Figure 14 : Zoom sur l'unique cavité naturelle présente dans l'orthogneiss intermédiaire

Cette cartographie n'est pas définitive puisqu'au vu des poids d'appartenances déterminés (Figure 13) diverses questions se posent. Quelles caractéristiques (lithologie ? présence de cavités ?) expliquent un poids d'appartenance très supérieur des roches métamorphiques, avec pour rappel un poids de 11,16 pour l'orthogneiss intermédiaire et de 20,83 pour les marbres ?

Afin d'y répondre ces deux lithologies sont étudiées séparément. Tout d'abord, la superficie de l'orthogneiss intermédiaire est infime sur le territoire français, de l'ordre de 0,60 km². Cette couche lithologique comporte une unique cavité localisée (de numéro BNOAA0003864) dans le département de la Manche (Figure 14) (*Géorisque.*, 2003). Cette cavité abandonnée est creusée par la mer dans les falaises rocheuses de 128m de hauteur du Nez de Voidries faisant partie de la commune de Jobourg située sur des formations de gneiss (*Lecouvey N.*, 2016). Elle est composée en réalité de quatre grottes, visitables lors de visite guidée et est classée site Natura 2000 servant de réserve ornithologique. La présence d'un anticlinal passant du Nez de Jobourg à la pointe de Jardeheu permet l'intercalation de bandes d'amphibolites comportant des orthogneiss non représentés sur la carte géologique à 1/50 000 (*BRGM*, 1998). La valeur du poids d'appartenance est ainsi expliquée par sa faible superficie et la présence seule de cette cavité (Figure 14). On conserve donc tel quel ce résultat.

Concernant les marbres, la couche lithologique des marbres comporte une superficie relativement petite, 662.83 km² et renferme 2 051 cavités naturelles dont principalement des gouffres, des karsts et des grottes (Figure 13). Elles sont situées principalement dans les Pyrénées et les Alpes qui sont deux massifs métamorphiques. On en retrouve également quelques-unes en Charente, en Essonne et en Corse mais de façon très anecdotique (Figure 15). La spécificité du marbre est qu'il s'agit d'une roche issue du calcaire ou de la dolomie par du métamorphisme de contact (*El Boudani M.*, 2017). Il est composé de minéraux calciques qui, par un phénomène de dégradation physique due au passage des eaux, va permettre la dissolution des carbonates (*Chabas A et al.*, 1998). La présence de cavités naturelles dans cette lithologie est donc tout à fait possible, et l'on conserve donc cette valeur, justifiée par une surface limitée et un certain nombre de cavités.

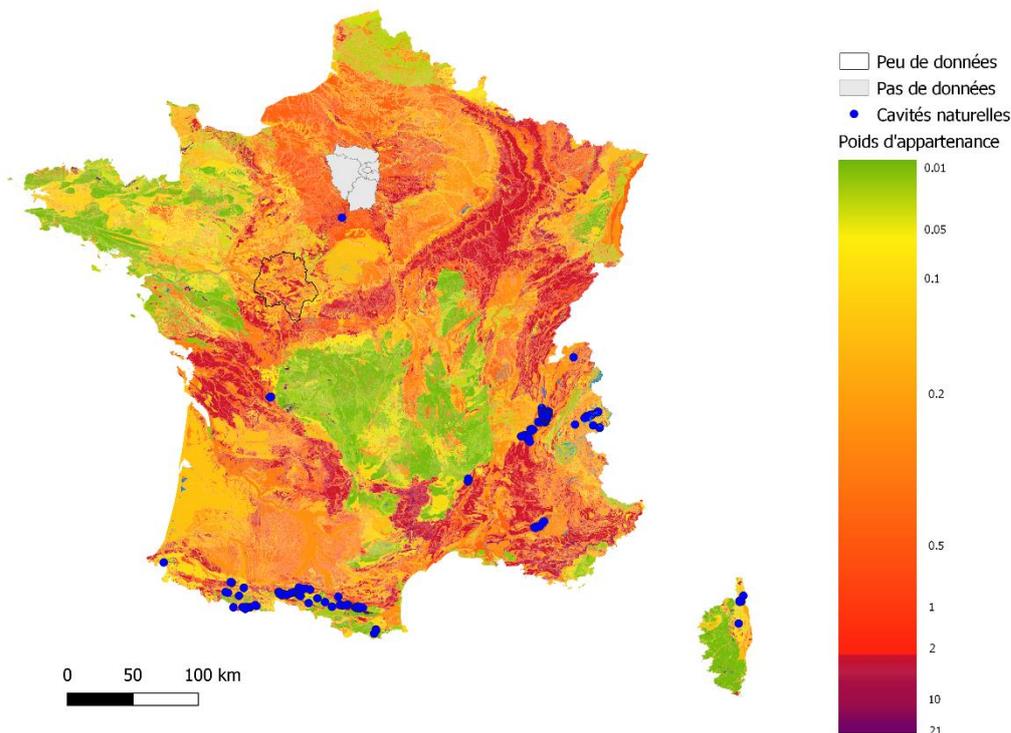


Figure 15 : Les cavités naturelles localisées dans le marbre

L'interrogation suivante concerne le poids d'appartenance des dolomies (6,83) qui s'avère supérieur à celui du calcaire (2,98). En effet au premier abord, il serait plus intuitif d'envisager le poids des cavités naturelles dans le calcaire plus fort que celui dans les dolomies du fait de la composition en carbonate et de son abondance sur le territoire français. Les dolomies représentent une superficie de 4 778 km² sur la totalité de la France métropolitaine et englobe 4 847 cavités recensées. Les calcaires quant à eux ont une superficie de 86 081 km² et comprennent un nombre de 38 130 cavités naturelles. Cette différence entre les poids des calcaires et des dolomies peut être directement liée à l'inventaire des cavités. Au final, ces deux formations vont être regroupées dans une même catégorie, présentant un poids très élevé.

Afin de compléter les objectifs initiaux de cette étude, l'analyse s'est portée sur d'autres facteurs, cette fois-ci quantitatif, comme la distance aux failles, et pouvant potentiellement affiner la cartographie de susceptibilité de présence de cavité naturelle. Les données concernant les failles proviennent de la carte géologique à 1/50 000 et vont être utilisées en appliquant la « logique floue », outil statistique de la méthode des Scénarios Cavités appliquée aux critères quantitatifs (§ 2.1).

Le graphique de la Figure 16 présente le nombre de cavités naturelles selon la distance aux failles ainsi que la même analyse basée sur le même nombre de points placés aléatoirement³ sur l'ensemble du territoire métropolitain. Hormis une légère différence de pente pour une relative

³ Grâce à l'outil point aléatoire sur l'emprise d'une couche de Qgis

faible distance aux failles (visible davantage sur la Figure 17), les deux courbes sont similaires montrant ainsi que la répartition des cavités naturelles ne suit pas une loi particulière selon le critère de distance aux failles.

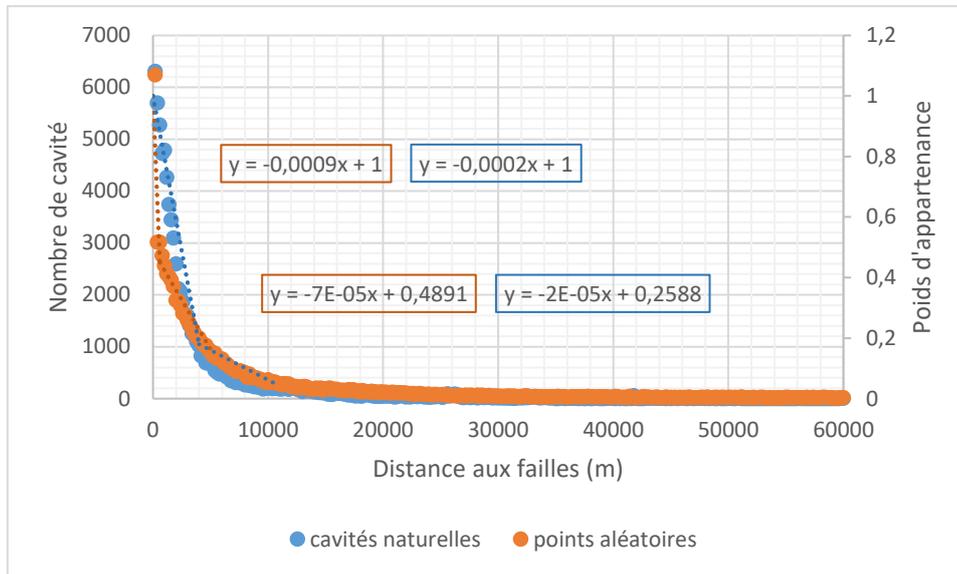


Figure 16 : Comparaison de la distance aux failles des cavités naturelles et de points aléatoires

Si l'on zoome sur ces pentes (Figure 17), les deux courbes sont différentes mais se rejoignent rapidement à une distance aux failles de 2 200 m. La répartition des cavités naturelles diminue en pente douce tandis que celle des points aléatoires comporte une première cassure importante puis diminue également en pente douce. Le nombre de points placés aléatoirement est plus faible que celui des cavités naturelles. On en conclue que la distance aux failles joue un rôle dans la répartition des cavités naturelles sur de très faibles distances.

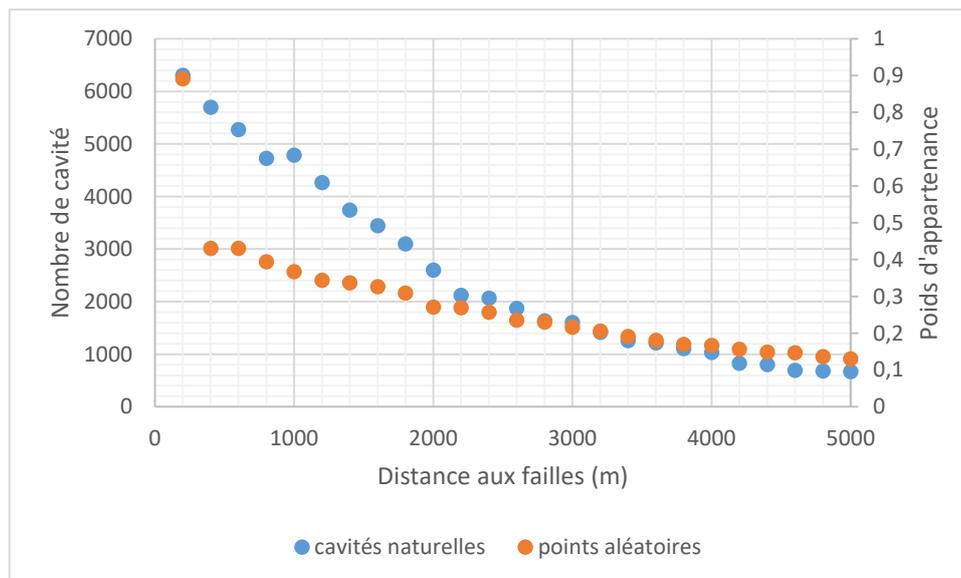


Figure 17 : Zoom sur les pentes obtenues pour la comparaison de la distance aux failles

Cette analyse pourrait être complétée par un travail plus poussé sur ces faibles distances. Celui-ci pourrait consister à :

- Multiplier le nombre de tirage de points aléatoires, de façon à obtenir une courbe des points aléatoires (Figure 17) plus représentative statistiquement (principe de la méthode de Monte-Carlo) ;
- Calculer une différence entre la courbe obtenue pour les cavités naturelles recensées et la courbe statistique obtenue par les multiples tirages aléatoires ;
- Etablir les valeurs du poids d'appartenance des cavités naturelles en fonction de la distance aux failles à courte distance, puis les utiliser pour réaliser la cartographie.

Une telle cartographie constituerait une carte complémentaire, à associer à celle obtenue à partir du facteur lithologique.

2.3.4. Les cavités de type cave

Les poids d'appartenance calculés selon la « théorie des évidences » sont compris dans une gamme variable selon le type de roche (Figure 18). Les variations sont comprises dans une gamme allant de 0,009 pour les orthogneiss acides à 17,49 pour les brèches volcanoclastiques. Globalement les poids d'appartenance de chaque lithologie sont plus faibles pour les caves que pour les cavités naturelles ou les carrières. En effet, le creusement d'une cave correspond avant tout à un besoin de stockage en un lieu donné.

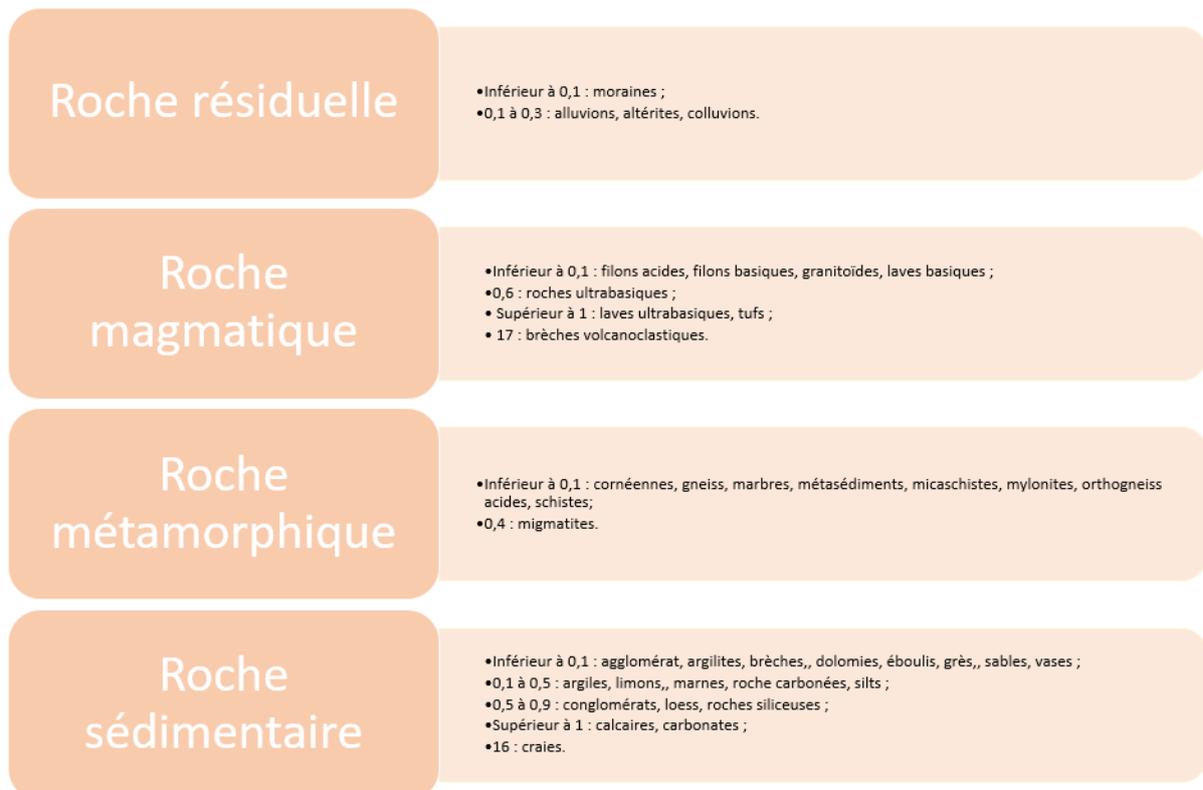


Figure 18 : Répartition des poids d'appartenance au sein des différents types de roches pour les caves

C'est à partir de ces résultats qu'une première cartographie brute montrant les poids d'appartenance est représentée sur la Figure 19. La palette de couleur choisie va de la couleur verte pour des poids d'appartenance faibles, au violet pour les poids d'appartenance les plus forts.

Comme pour les carrières et les cavités naturelles, la carte obtenue montre une similitude avec la carte géologique avec cependant un plus faible contraste.

Ce type de cavité ne met pas en avant une lithologie forte (comme pour les carrières ou les cavités naturelles) mais plusieurs lithologies (Figure 6) d'où la présence de plusieurs petits « pics » sur la courbe.

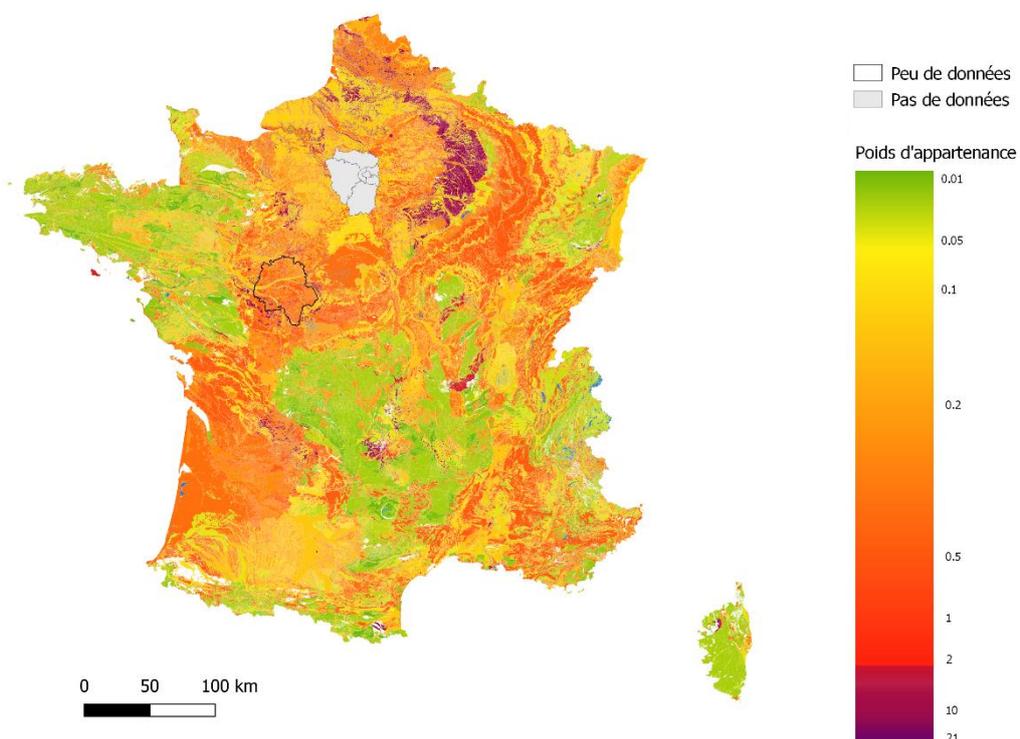


Figure 19 : Cartographie brute des poids d'appartenance pour les cavités de type cave

La cartographie brute de poids d'appartenance pour les cavités de type cave ainsi que le graphique de la répartition des poids d'appartenance en fonction de la surface des lithologies (figure 18) suscitent quelques analyses complémentaires.

Tout d'abord, la question du poids d'appartenance attribué aux brèches volcanoclastiques est à discuter. En effet, il est plus important que celui de la craie, ce qui semble étonnant, puisque la craie est connue pour la présence de nombreuses caves et la présence de caves creusées dans les lithologies dures comme les brèches semble moins courantes (Figure 20).

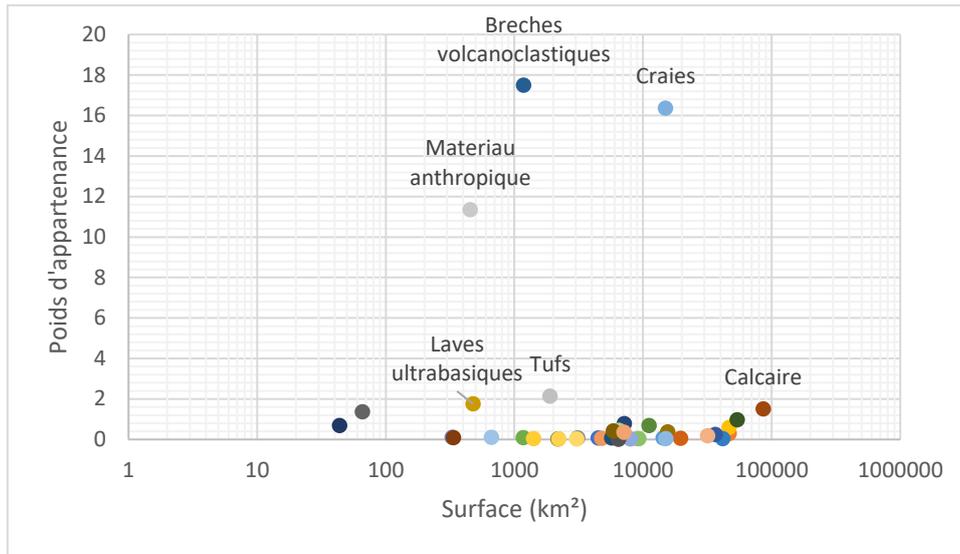


Figure 20 : Répartition des poids d'appartenance en fonction des lithologies de surface pour les cavités de type cave⁴

La lithologie des brèches volcanoclastiques est répartie sur une surface de 1 180,71 km², et comporte un nombre de 690 caves. La répartition de celles-ci sur le territoire métropolitain est réalisée de la manière suivante :

- 1 cave abandonnée située dans le Cantal, dans la commune de Gilgols, très peu d'information sont disponibles la concernant (BRGM, 2006) ;
- 1 cave nommée Balmes de Montbrun localisée en Ardèche dans la commune de Saint-Gineis-en-Coiron. Il s'agit d'une galerie creusée à la main dans la coulée volcanique, utilisée pour le stockage ou en tant que refuge troglodytique (Vincent M et al., 2008) ;
- Enfin 688 caves recensées sont localisées dans le Puy-de-Dôme (Figure 21) : 641 caves à Clermont-Ferrand, principalement des galeries et des salles, et dans les communes alentours tel que Châteaugay (37 caves), Orcet (1 cave) et Montaignut-le-Blanc (9 caves).

Clermont-Ferrand et ses alentours reposent sur un anneau de projection volcanique issues de l'éruption du cratère du maar de Clermont-Chamalières. Le sous-sol y est constitué de tuf volcanique, épais d'une vingtaine de mètres (Vanoudheusden E., 2018). Ces terrains sont particulièrement bien adaptés au creusement de caves, puisqu'ils sont à la fois friables à l'outil, mais présentent une forte résistance et tenue au vide. La présence de ces caves au sein de ces brèches volcaniques caractéristiques du secteur de Clermont-Ferrand est donc vérifiée.

⁴ Dans une logique de clarté, les étiquettes de données comportant des poids d'appartenance inférieur à 1.5 ne sont pas indiquées. On trouvera un graphique précisant l'ensemble des lithologies en Annexe 1c.

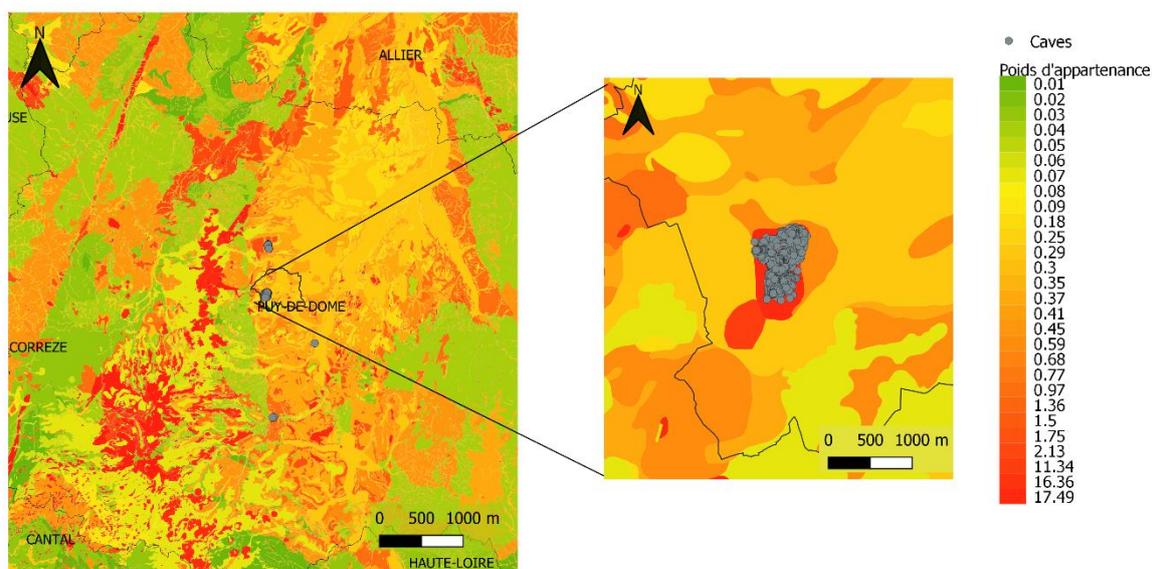


Figure 21 : Les caves localisées dans les brèches volcanoclastiques aux alentours de Clermont-Ferrand (zoom sur Clermont-Ferrand)

Tout comme précédemment pour les limons de Normandie (cf. §2.3.2), il est décidé de dissocier en deux le poids d'appartenance des brèches volcanoclastiques, une valeur pour Clermont-Ferrand, et une autre valeur pour le reste du territoire. Une différence de poids d'appartenance est effectivement notable entre ces deux secteurs (Tableau 6), avec un poids extrêmement fort pour Clermont-Ferrand, qui présente une lithologie spécifique de cette formation de brèches volcanoclastiques.

Tableau 6 : Calcul du poids d'appartenance selon différentes configurations pour les cavités de type cave dans les brèches volcanoclastiques

Régions	Clermont-Ferrand	Métropole sans Clermont-Ferrand	Métropole avec Clermont-Ferrand
Superficie (km ²)	43	549 037,03	549 080,03
Nombre de caves	688	17 705	18 349
Nombre de caves dans les brèches volcanoclastiques	641	49	690
Superficie des brèches volcanoclastiques	0,8276	1 179,89	1 180,72
Poids d'appartenance	48,41	1,29	17,49

La carte de susceptibilité de présence de caves peut dès lors être ajustée en ajoutant cette dissociation.

2.3.5. Les cavités de type ouvrage civil

Les ouvrages civils n'ont pas fait l'objet de cartographie, la répartition des ouvrages civils n'est pas en lien avec la lithologie puisque les ouvrages civils sont construits selon le besoin dans des secteurs précis et non selon une géologie précise. C'est pourquoi, le facteur lithologique ne permet pas d'obtenir de résultats concluants avec la méthode des Scénarios Cavités, en atteste la Figure 6 où la courbe des poids d'appartenance des ouvrages civils ne montre pas de « pic » et reste proche de 0.

Il pourrait être intéressant de tester certains paramètres tels la distance aux grandes villes, du moins aux zones urbanisées, et déterminer ainsi, via la méthode des Scénarios Cavités, s'ils sont effectivement un facteur de prédisposition.

2.3.6. Les cavités de type ouvrage militaire

Le facteur de la lithologie n'est pas un facteur de prédisposition à la présence de ce type de cavités puisque la courbe du poids d'appartenance (Figure 6) pour les ouvrages militaires stagne et est proche de 0.

En complément, plusieurs facteurs quantitatifs ont été testés et pris en compte dans cette étude. Il s'agit des lignes de fronts de la Première et de la Deuxième Guerre Mondiale, des frontières avec l'Allemagne, la Belgique et l'Italie ainsi que le trait de côte. Les lignes de fronts sont tirées de divers sites internet et le trait de côte sont tirés de [géo.data.gouv.fr](http://geo.data.gouv.fr). La méthode utilisée est ici uniquement basée sur la « logique floue ».

La Figure 22 représente les données brutes initiales et les données modifiées utilisées pour l'étude. En effet, les traits de côte en Méditerranée et en Corse sont supprimés puisqu'ils ne sont visiblement pas en lien avec la présence de cavités de type ouvrage militaire.

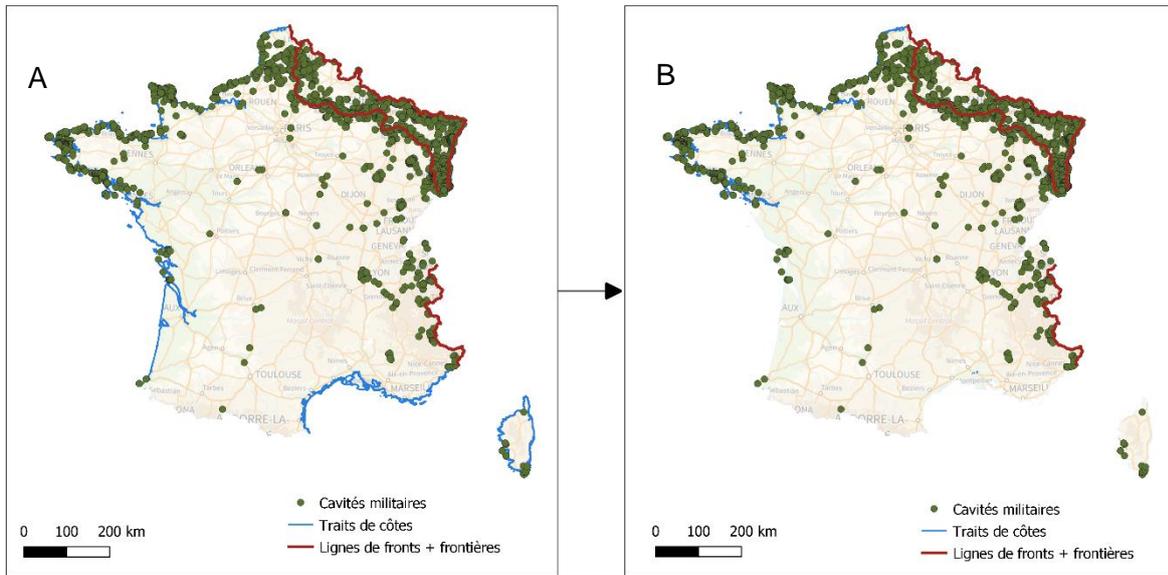


Figure 22 : Localisation des facteurs quantitatifs (A. Données brutes et B. Données modifiées) pour les cavités de type ouvrage militaire

Les Figure 23 à Figure présentent le nombre de cavités de type ouvrage militaire et les poids d'appartenance bruts selon la distance respective au trait de côte, aux lignes de front et aux frontières. Notons que pour les 3 cas, plus la distance augmente, plus le nombre de cavités diminue. La distance la plus faible comportant le plus de cavités est associée au trait de côtes.

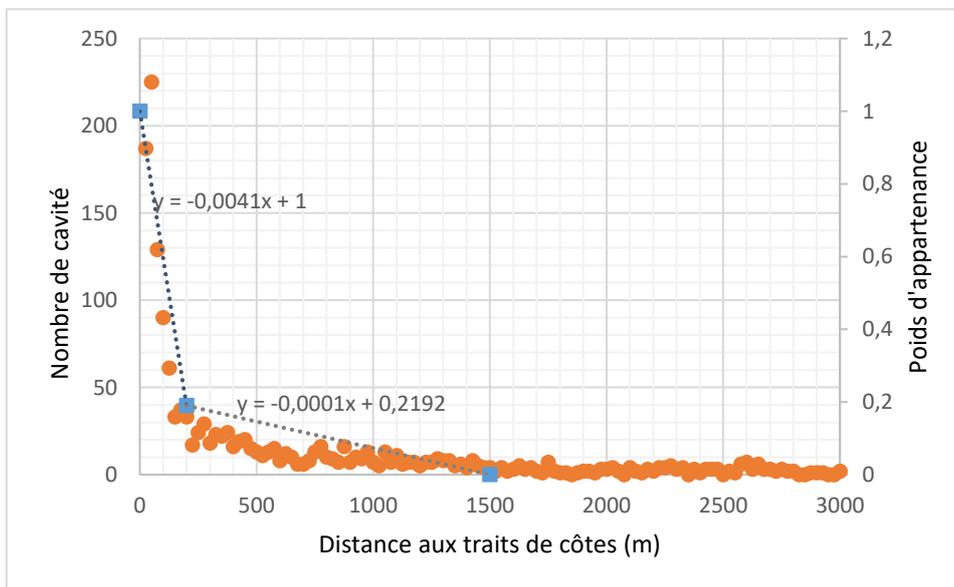


Figure 23 : Répartition du nombre d'ouvrages militaires et poids d'appartenance en fonction des distances au trait de côte

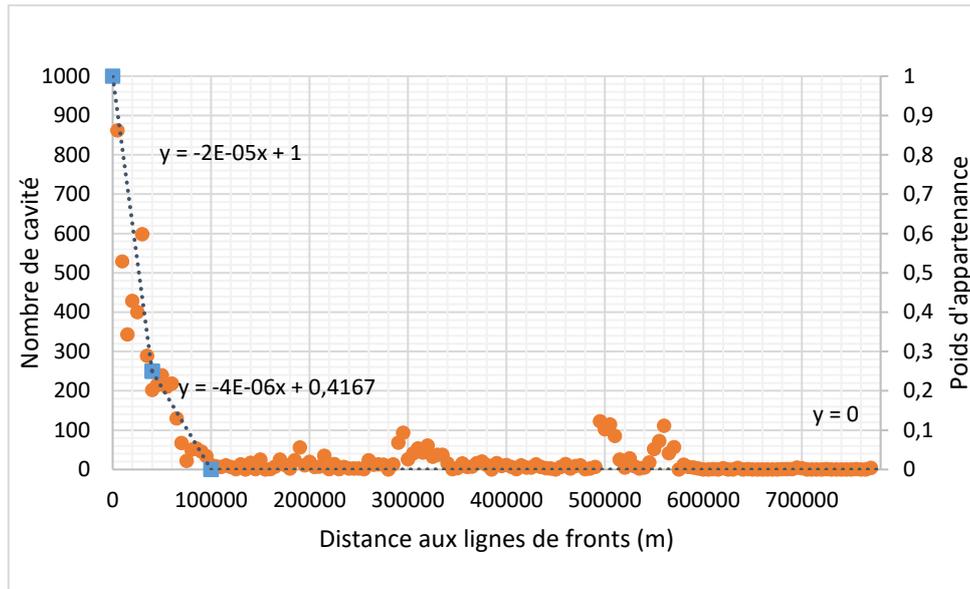


Figure 24 : Répartition du nombre d'ouvrages militaires et poids d'appartenance en fonction des distances aux lignes de front

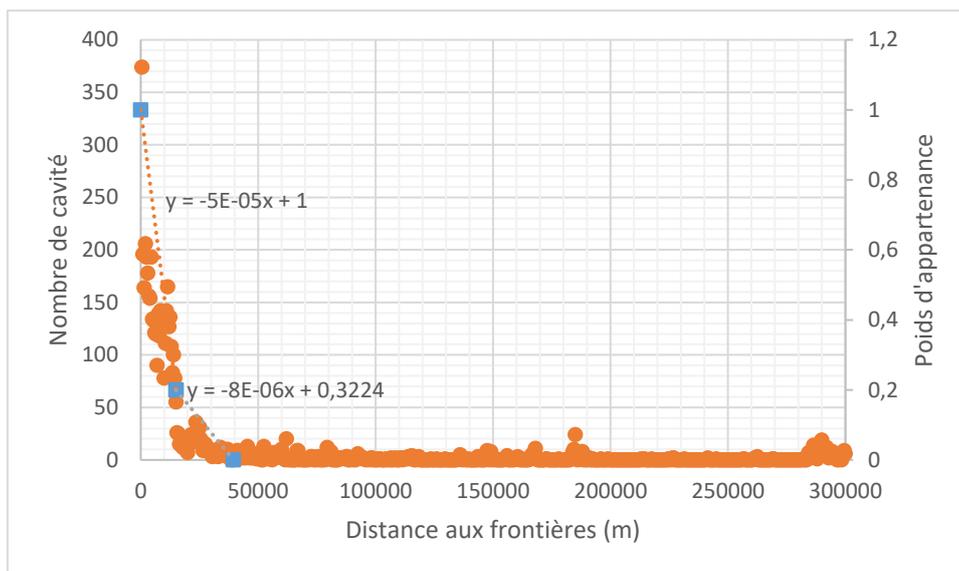


Figure 25 : Répartition du nombre d'ouvrages militaires et poids d'appartenance en fonction des distances aux frontières

C'est à partir de ces résultats qu'une première cartographie brute montrant les poids d'appartenance de l'ensemble des facteurs est représentée sur la Figure . La palette de couleur choisie va de la couleur verte pour des poids d'appartenance faibles, au violet pour les poids d'appartenance les plus forts. Une limite concernant cette cartographie est le passage franc entre les poids d'appartenances élevé à faible en Hauts-de-France et Alpes-Maritimes, au niveau des lignes de front et des frontières. Ces artefacts sont dès lors « corrigés » (Figure 30).

Notons cependant que cette cartographie présente une limite vis-à-vis des données d'entrée et particulièrement les lignes de front. En effet, celles utilisées ici sont beaucoup trop simplifiée (une

unique ligne de front) tandis qu'en réalité ces lignes de front sont multiples et ont évolué géographiquement durant les conflits.

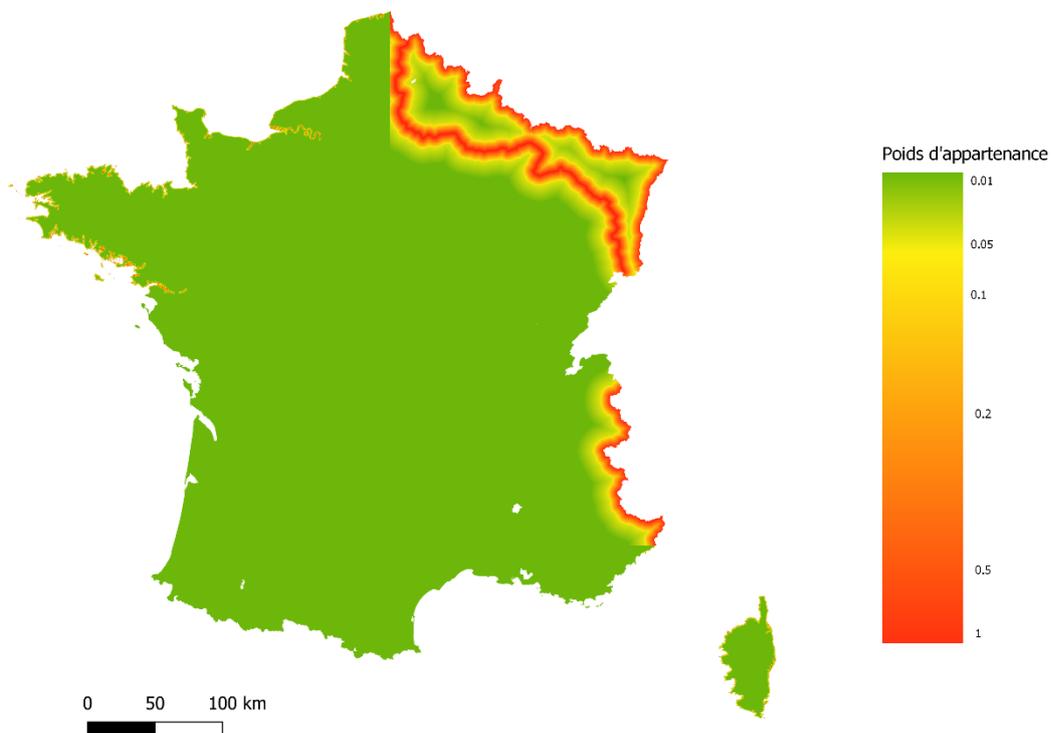


Figure 26 : Cartographie brute des ouvrages militaires

2.4. ESQUISSES DE RESULTAT CARTOGRAPHIQUES ET PERSPECTIVES

Les cartographies présentées ci-après (Figure 27 à Figure 30) sont des propositions fournies pour les différentes typologies de cavités : carrières, cavités naturelles, caves et ouvrages militaires.

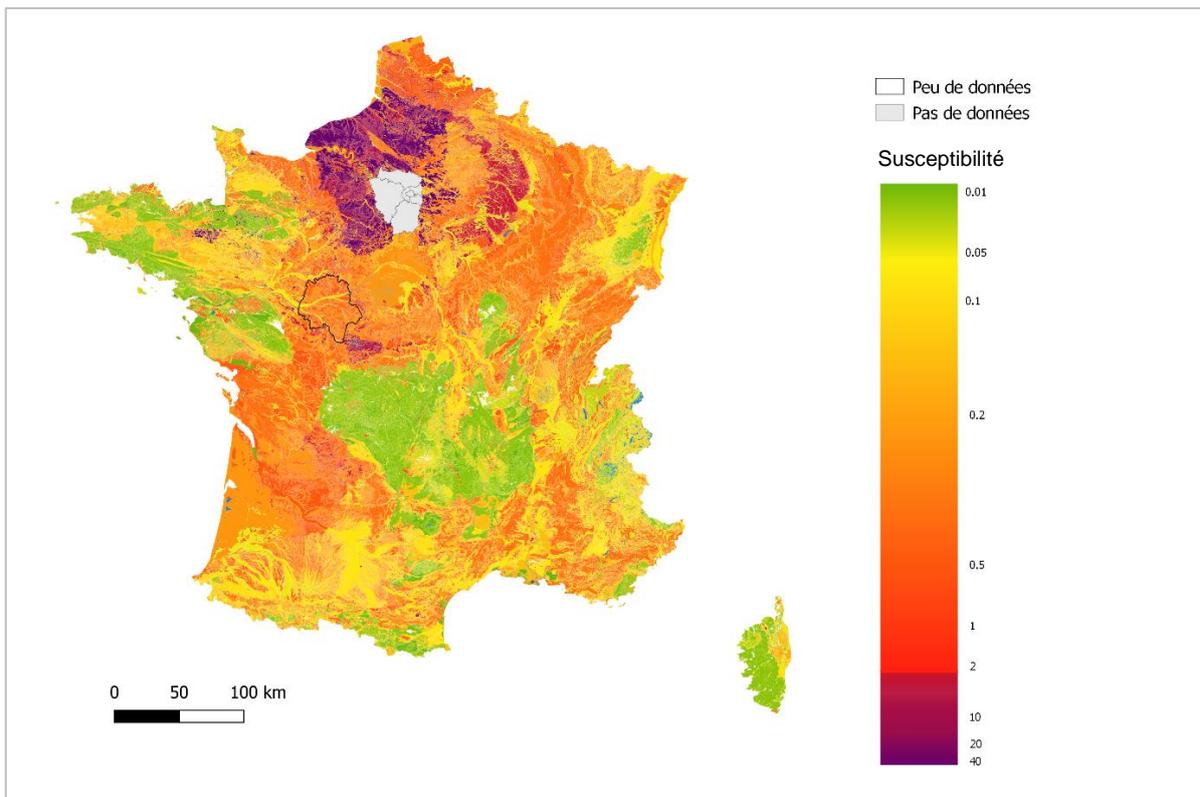


Figure 27 : Proposition de cartographie de susceptibilité de présence des carrières

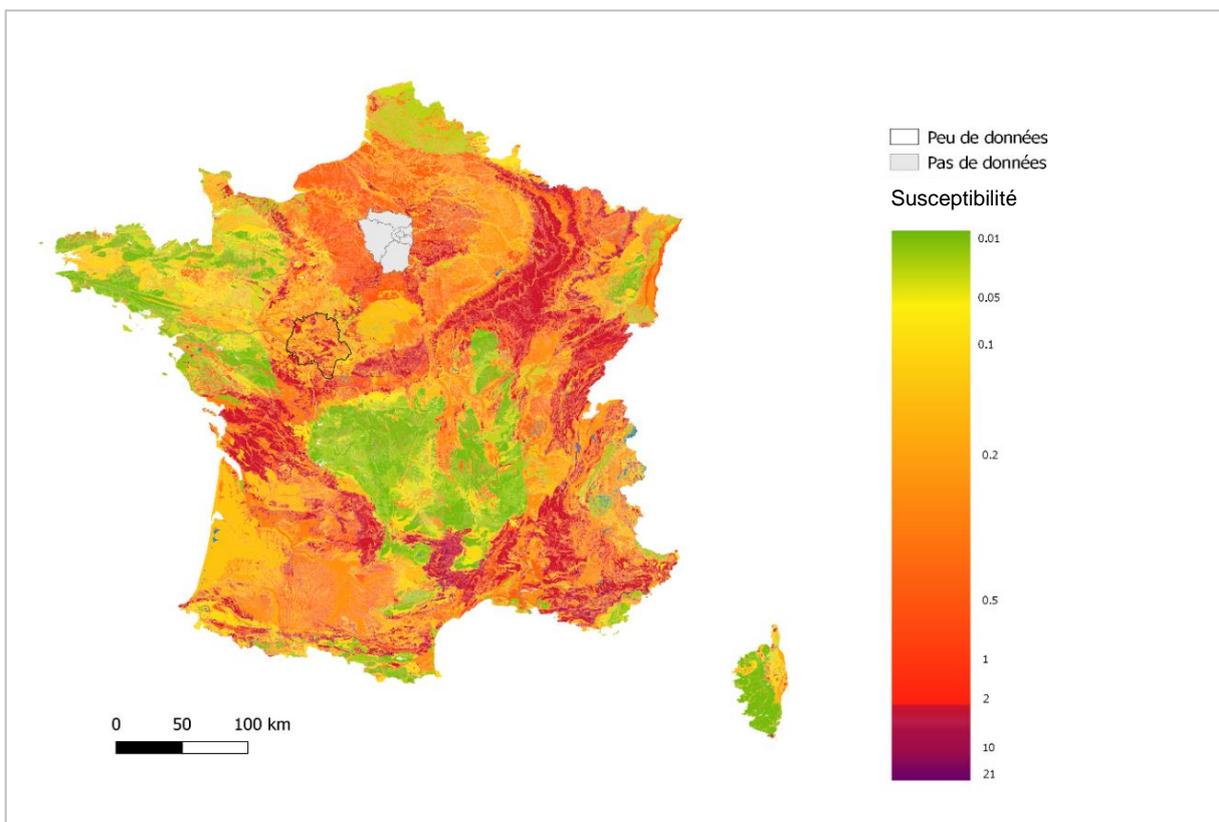


Figure 28 : Proposition de cartographie de susceptibilité de présence des cavités naturelles

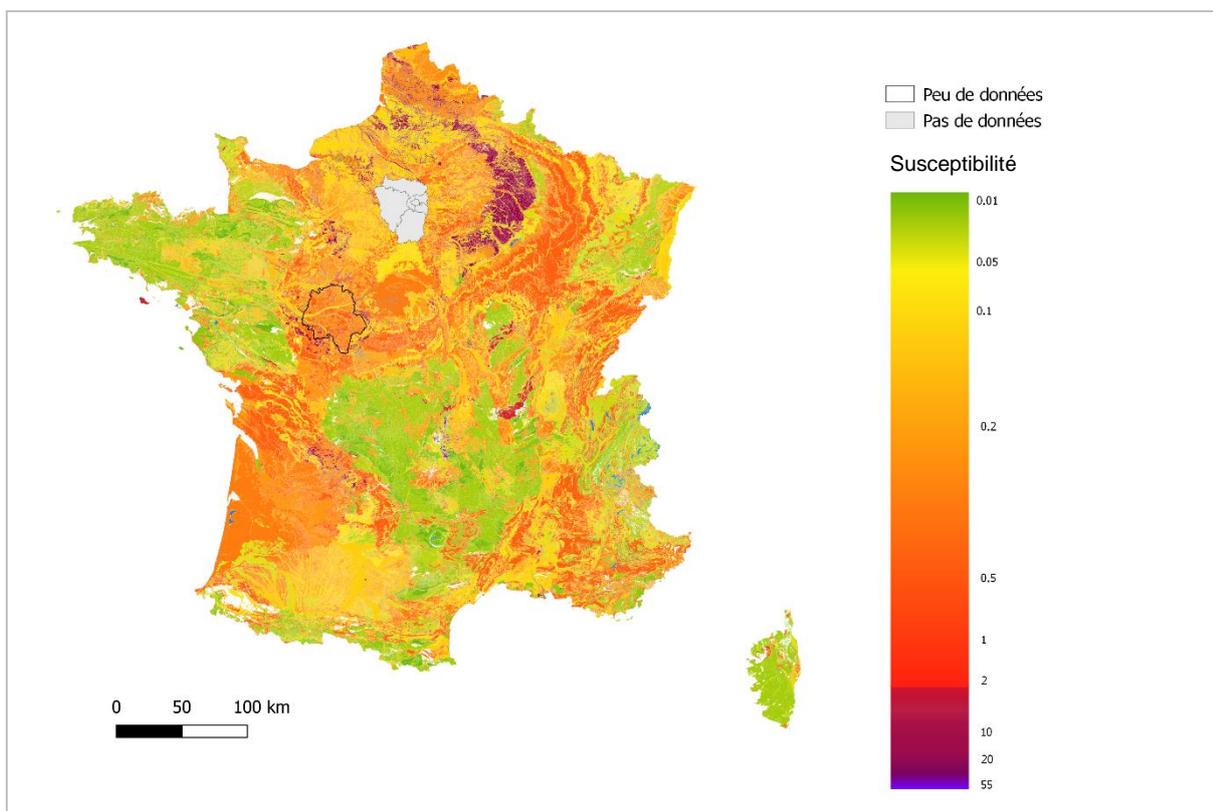


Figure 29 : Proposition de cartographie de susceptibilité de présence des caves

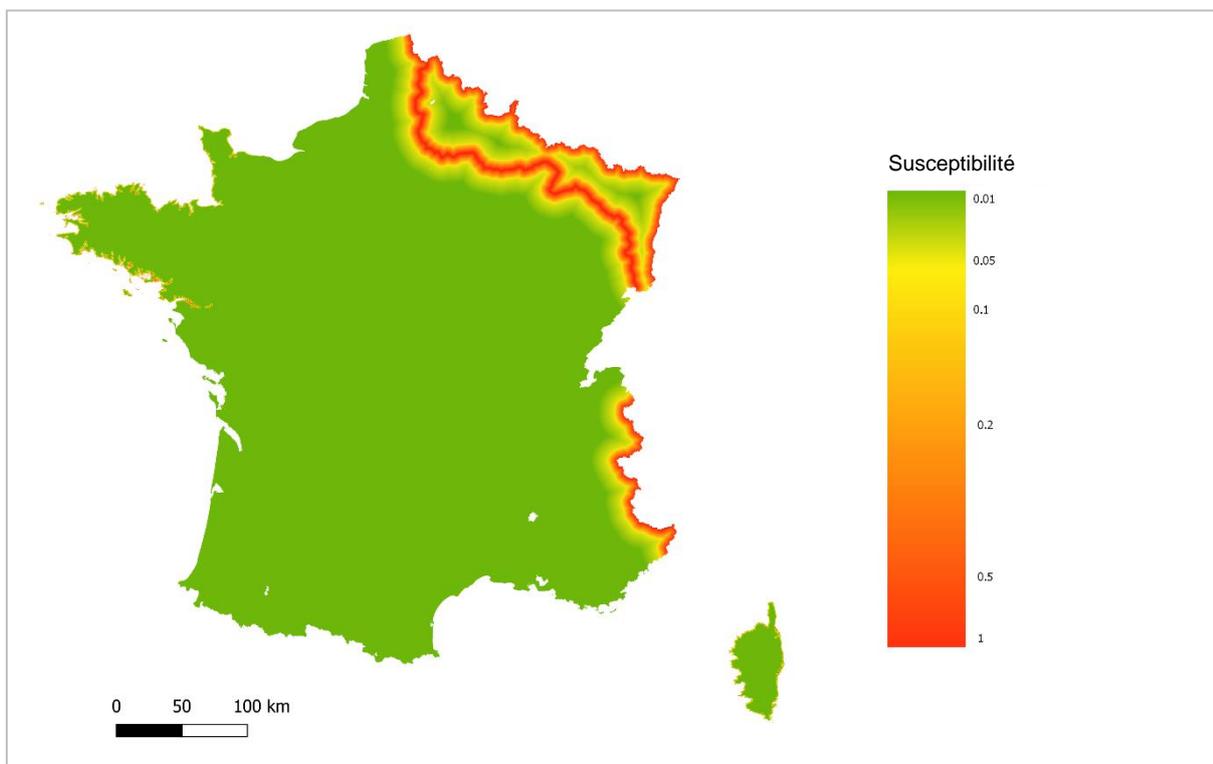


Figure 30 : Proposition de cartographie de susceptibilité de présence des ouvrages militaires

Les résultats obtenus sont ici prometteurs mais il est utile de poursuivre en apportant plus de finesse. En effet, le seul critère initial -le facteur lithologique- est bien évidemment pertinent et satisfaisant en première approche ou pour une échelle de restitution faible ; ce seul critère n'est cependant pas suffisant à mesure qu'une restitution plus fine est souhaitée.

Les pistes d'amélioration sont de plusieurs ordres :

- Analyse critique de la donnée initiale et des résultats obtenus

Les données issues de la BDCavité permettent une vision globale. Néanmoins, comme déjà évoqué, tout inventaire n'est pas exhaustif. De même, comme toute base de données, des erreurs et des incertitudes existent. En particulier, la localisation des cavités peut être ponctuellement erronée (exemple une mauvaise saisie) ou être assortie d'une précision relative (exemple « à 100 m près »). Ces cavités, affectées à une formation géologique plutôt qu'à une autre, conduisent à des biais dans le calcul des poids d'appartenance. Egalement la caractérisation des données de cavités, en particulier leur typologie, est à compléter. En rappel, 20 477 cavités sont qualifiées de type « indéterminé » et 765 « autre » sur 188 411 cavités au total soit plus de 10% d'information inutilisée.

Le cas flagrant du poids d'appartenance des limons pour les carrières a été traité compte tenu des carrières de Normandie. Il convient de vérifier que ce type de situation ne s'est pas produit pour d'autres formations. En exemple, pour les cavités de type carrière, le sud du département de l'Indre (vallée de la Creuse) présente une susceptibilité forte (Figure 27) alors que les carrières sont peu nombreuses (Annexe 1). Les cavités naturelles sont, elles, nombreuses.

- Analyse de la contribution d'autres facteurs

En complément à la lithologie, l'étude d'autres facteurs a été étudiée, initiée ou simplement évoquée (la distance aux failles, aux bourgs/villes, aux lignes de front, au trait de côte, aux frontières) et mérite d'être approfondie. De plus d'autres facteurs sont nécessairement pertinents. On peut évoquer par exemple : la sensibilité liée à la dissolution, la fracturation / altération, l'hydrogéologie (profondeur de nappe notamment).

- Analyse portant sur des familles de données plus restreintes

En double exemple, la craie en Champagne et la craie en Normandie sont différentes en terme de faciès et les modes d'exploitation y ont été différents. Ainsi des dissociations pourraient être utiles tant sur les données de l'inventaire que sur les données décrivant les facteurs. Pour notre double exemple, il s'agirait ainsi d'étudier la dissociation des carrières en Normandie (marnières) et celles en Champagne (crayère, certaines d'entre-elles étant par ailleurs identifiées en tant que cave pour le stockage de champagne) et la dissociation entre les deux faciès de la craie.

Plus globalement, plusieurs familles de carrières seraient ainsi étudiées. Le poids des différents facteurs considérés serait propre à chaque famille. La dissociation est à également poursuivre avec les autres types de cavités.

Visant un résultat plus fin, ces dissociations, tant sur les données de l'inventaire que sur les données décrivant les facteurs, correspond à une sectorisation des études de susceptibilité. La définition de ces secteurs est un chantier en soi. Cette sectorisation est en ligne avec les travaux précédents où l'étude de faisabilité (rapport BRGM/RP-70461-FR, Vanoudheusden *et al*, 2020) s'est portée en particulier sur la Touraine (=secteur) et la Seine-Maritime (département=secteur) en employant la méthode des Scénarios Départementaux Cavités (rapport BRGM/RP-56275-FR, Fontaine *et al.*, 2008).

3. Inventaire des cartographies existantes

3.1. RECENSEMENT DES CARTOGRAPHIES

31 références bibliographiques, relative à des études de cartographie de susceptibilité de présence de cavités souterraines, ont été recensées et analysées. Ces études proviennent essentiellement de la documentation BRGM ; quelques autres sources ont été collectées via internet. A ce stade, malgré les sollicitations, il n'a pas été possible de collecter de résultats d'études en provenance du CEREMA ou de l'INERIS.

Chaque étude a fait l'objet d'une fiche récapitulative fournie en Annexe 2. Ce travail a permis une division en deux catégories des méthodes utilisées : la méthode statistique et la méthode d'expertise, détaillées ci-dessous.

Notons que la susceptibilité de présence de cavités peut être confondue avec la notion d'aléa. L'aléa est par définition la probabilité de survenance d'un événement de type donné (ici un désordre / mouvement de terrain associé à une cavité : effondrement, affaissement par exemple), d'une intensité donnée sur un territoire donné, dans une période de temps donné. La différence entre une carte de susceptibilité et une carte de d'aléa est basée sur le fait que, pour la première, seuls les facteurs permanents sont considérés alors que, pour la seconde, les facteurs déclenchants (atmosphériques, géologiques ou anthropiques) qui se reproduisent dans le futur permettent de définir une temporalité. L'étude de la survenance de ces éléments atmosphériques ou géologiques (fréquence) permet d'associer cette fréquence à l'événement de type (et d'intensité) désordre dont ils participent au déclenchement.

Or au vu de la difficulté de prédire l'apparition de désordre, l'évaluation de la probabilité d'occurrence est complexe (Cochery R., 2013). C'est pourquoi à la place de la probabilité d'occurrence, les critères dits de prédisposition, qu'ils soient permanents voire aggravants, vont être étudiés. Dans ce cas, l'aléa est perçu comme une susceptibilité tenant compte de la composante spatiale mais ne tenant plus compte de la composante temporelle (Bayle E, Nachbaur A, Vanoudheusden E, 2011 ; Fontaine M, Nachbaur A, Rohmer J., 2008).

3.2. METHODES MISES EN ŒUVRE DANS LES CARTOGRAPHIES COLLECTEES

3.2.1. Méthode statistique

La méthode statistique est une méthode réalisée à partir d'outils informatiques (comme les SIG) permettant la combinaison de divers facteurs entre eux. Cette méthode est utilisée dans les études datant de 2014 à nos jours.

Les études montrent des différences dans l'utilisation de la méthode statistique. Une première différence correspond au choix de la méthode statistique appliquée pouvant être pour certaines études basées sur la méthode des Scénarios Cavités (Vanoudheusden E., 2014 ; Fontaine M., Nachbaur A, Rohmer J., 2008) tandis que d'autres utilisent un calcul de densité représentant le nombre de phénomènes dans un secteur donné (Vandromme R, Loislard M., 2009). Ce calcul nécessite un inventaire quasi exhaustif, or l'inventaire fourni à nos jours est souvent non exhaustif mais permet toutefois une représentation homogène et uniquement sur le territoire. Les

méthodes de densité semblent donc moins faciles à mettre en œuvre du fait de cette contrainte forte sur l'inventaire utilisé.

De plus, le choix des facteurs de prédisposition varie selon les études : pour une cartographie réalisée à la même échelle, les facteurs utilisés peuvent être basiques comme la lithologie ou la géologie (*Vanoudheusden E et Leconte Steve., 2021*), ou en revanche être spécifiques tel que la capacité d'infiltration des eaux avec l'indice de persistance et de développement des réseaux (IDPR) (*Bayle E, Nachbar A, Vanoudheusden E., 2011*).

La méthode statistique peut être aussi bien appliquée à un secteur régional (*Colas B., 2013 ; Renault O, Cochery R, Bastone V., 2013*) que national (*Vanoudheusden E et Leconte S., 2021*) que ce soit en appliquant la méthode des Scénarios Cavités ou de densité.

Chaque étude nécessite l'utilisation de données d'entrée afin d'obtenir un inventaire des cavités, généralement la BDCavité (*Vanoudheusden E., 2014*), utilisée seule dans la plupart des cas mais pouvant être complétée par d'autres recensements tel que la BDmvt ou des archives provenant de divers services (*Marie S et al., 2004 ; Rivet F, Mathon C, Brevot P.-A., 2007*).

Pour la réalisation de toutes ces cartes de susceptibilité, un inventaire des phénomènes étudiés, ici les cavités souterraines, doit être obtenu puis les facteurs de prédisposition doivent être déterminés avec précision (Tableau 7). La particularité de ces cartographies est leur échelle de travail, au minimum départementale voire régionale. En effet, la praticité de cette méthode est de pouvoir déterminer un niveau de susceptibilité malgré un inventaire parfois non exhaustif couvrant une grande surface. Ces cartographies sont utilisées à titre d'indication qui, en cas d'études plus fines sur un secteur plus petit, pourront être reprises et faire de nouveau l'objet d'une cartographie de susceptibilité en ne prenant pas forcément en compte les mêmes facteurs de prédisposition ni la même méthodologie.

Tableau 7 : Facteurs permanents et de déclenchements utilisés pour la cartographie de susceptibilité de présence de cavités avec la méthode statistique

Facteurs permanents	Facteurs de déclenchement
- Capacité d'infiltration des eaux	- Précipitation
- Lithologie / géologie	- Température
- Couvert végétal	- Actions anthropiques
- Présence de cavité	- Séisme
- Sensibilité liée à la dissolution	
- Structure (faille)	
- Profondeur du toit de la formation encaissante	

Il est également possible que les cartographies soient basées à la fois sur une méthode statistique mais également une méthode d'expert (*Colas B., 2011 ; Perrin J et al., 2016*).

3.2.2. Méthode d'expertise

La méthode d'expertise est une méthode naturaliste, c'est-à-dire basée uniquement sur des connaissances vérifiées, des observations de phénomènes et des conditions géologiques et morphologiques (*Terrier Sedan M, Furic S., 2003*). Elle est utilisée dans de multiples rapports datés de 2002 à 2014.

Les études montrent un panel d'échelles variées allant du 1/5 000, échelle communale à 1/100 000, échelle régionale (Rivet F., 2007 ; Rivet F, Mirgon C, Navarro A., 2011 ; Marçot N, Mirgon C, Colas B., 2007 ; Rivet F, Mathon C, Draperi N., 2009). L'échelle du 1/5 000 pour les cartographies finales est intéressante puisqu'elle peut s'intégrer dans des projets tels que les PPR (plan de prévention des risques) ou les PLU (plan local d'urbanisme) (Cochery R., 2015 ; Cochery R., 2013) tandis que celle à 1/100 000 serviront uniquement comme aide à la décision. Ponctuellement elles peuvent faire l'objet d'agrandissement à une échelle à 1/15 000 ou à 1/7 500 en cas de besoin, apportant des informations supplémentaires sur les zones à forte susceptibilité (Thuon Y, Pageau J., 2011 ; Closset L et al., 2004).

La plupart des cartographies est réalisée à partir de facteurs permanents tel que la géologie, la morphologie (Rivet F, Royaute L., 2011) avec parfois quelques facteurs particuliers comme la position des cavités dans la commune (urbaine, rurale, urbaine centrale, urbaine périphérique, urbaine et rurale) (Thuon Y, Pageau J., 2011).

Cependant, il est possible d'obtenir des cartographies à 1/50 000 en prenant en compte ou non des facteurs déclenchants tels que les précipitations ou la profondeur des nappes (Rivet F, Girard A, Mathon C., 2012 ; Terrier M, Sedan-Miegemolle O, Marçot N., 2002).

Tout comme pour la méthode statistique, la première étape à la création des cartes de susceptibilité est l'inventaire des cavités souterraines puis le choix des facteurs de prédisposition (Tableau 8). Lorsque le territoire d'étude correspond à la commune, l'étude de facteurs de déclenchement est davantage prise en compte. Les niveaux de susceptibilité sont créés à partir des connaissances ainsi qu'avec l'aide de zone tampon autour des cavités recensées. Ces cartes sont toutes réalisées à grandes échelles expliquant le choix de cette méthode. La connaissance de facteurs de prédisposition sur une petite zone est plus aisée que sur un vaste territoire. En particulier, la vérification et les déplacements de terrain si nécessaire sont davantage possibles. Ces cartographies sont basées sur un jugement d'expert et par conséquent sur un avis qualitatif (Colas B., 2008).

Tableau 8 : Facteurs permanents et de déclenchements utilisés pour la cartographie de susceptibilité de présence de cavités pour la méthode d'expertise

Facteurs permanents	Facteurs de déclenchement
- Nature géologique	- Profondeur de la nappe
- Morphologie (pente, fracturation)	- Précipitation
- Occupation du sol	- Ruissellement
- Présence de cavité	- Température
- Hydrogéologie	- Actions anthropiques (zone urbaine)

3.3. LIMITES DES ETUDES

Au-delà des limites intrinsèques aux méthodes employées (statistique ou expertise), les limites rencontrées dans les différentes études portent essentiellement sur :

- La qualité des données utilisées : inventaire non exhaustif, caractéristiques à mieux renseigner tant sur les données d'inventaire que sur les données décrivant les facteurs, voire l'absence de données concernant un facteur manifestement pertinent ;
- La précision des données : décalage fort entre l'échelle initiale des données d'entrée (exemples : carte géologique, MNT) et l'échelle de restitution, l'incertitude quant à la présence de cavités, l'incertitude de positionnement.

Ces limites conduisent parfois à une restitution avec un aléa binaire ou un zonage discontinu, une cartographie comprenant des marges de sécurité notables, la qualification de « carte préliminaire ou démonstrative », au besoin d'investigations complémentaires.

3.4. RESULTATS ET PERSPECTIVES

Les objectifs du travail concernant les cartographies existantes étaient :

- Poursuivre le recensement auprès d'autres sources que l'unique source BRGM ;
- Analyser ces cartographies dans un objectif de les qualifier vis-à-vis d'une diffusion sur le portail national.

Concernant le 1^{er} point, des contacts ont été pris auprès du CEREMA et de l'INERIS, mais n'ont pas abouti à la collecte de rapports relatant de telles études. Un important travail d'identification de nouvelles études / nouveaux rapports a été fait via internet, sur les sites de toutes les DDT, aboutissant à la collecte de nombreux rapports supplémentaires.

Dans un premier temps, seuls les rapports des études BRGM ont fait l'objet d'une analyse détaillée, aboutissant à la création pour chacun de fiches récapitulatives fournies en Annexe 2.

La liste et le mode d'utilisation des multiples facteurs dans ces études doivent permettre d'alimenter la réflexion concernant la contribution d'autres facteurs à la cartographie à l'échelle de la France métropolitaine.

Les limites rencontrées dans ces études sont classiques et portent sur l'analyse critique des données (en qualité et en précision) et l'incidence sur le résultat obtenu.

En perspective, il pourrait être judicieux de constituer un catalogue numérique de ces études dont les métadonnées comprendraient les limites géographiques de l'étude ainsi que ses principales caractéristiques techniques (année, méthode employée, échelle de restitution, facteurs utilisés...). Les filtres de recherche seraient par mot-clé (ou texte libre) et par secteur géographique. Ce type de catalogue existe notamment pour les données géographique marines et littorales (Sextant de l'IFREMER).

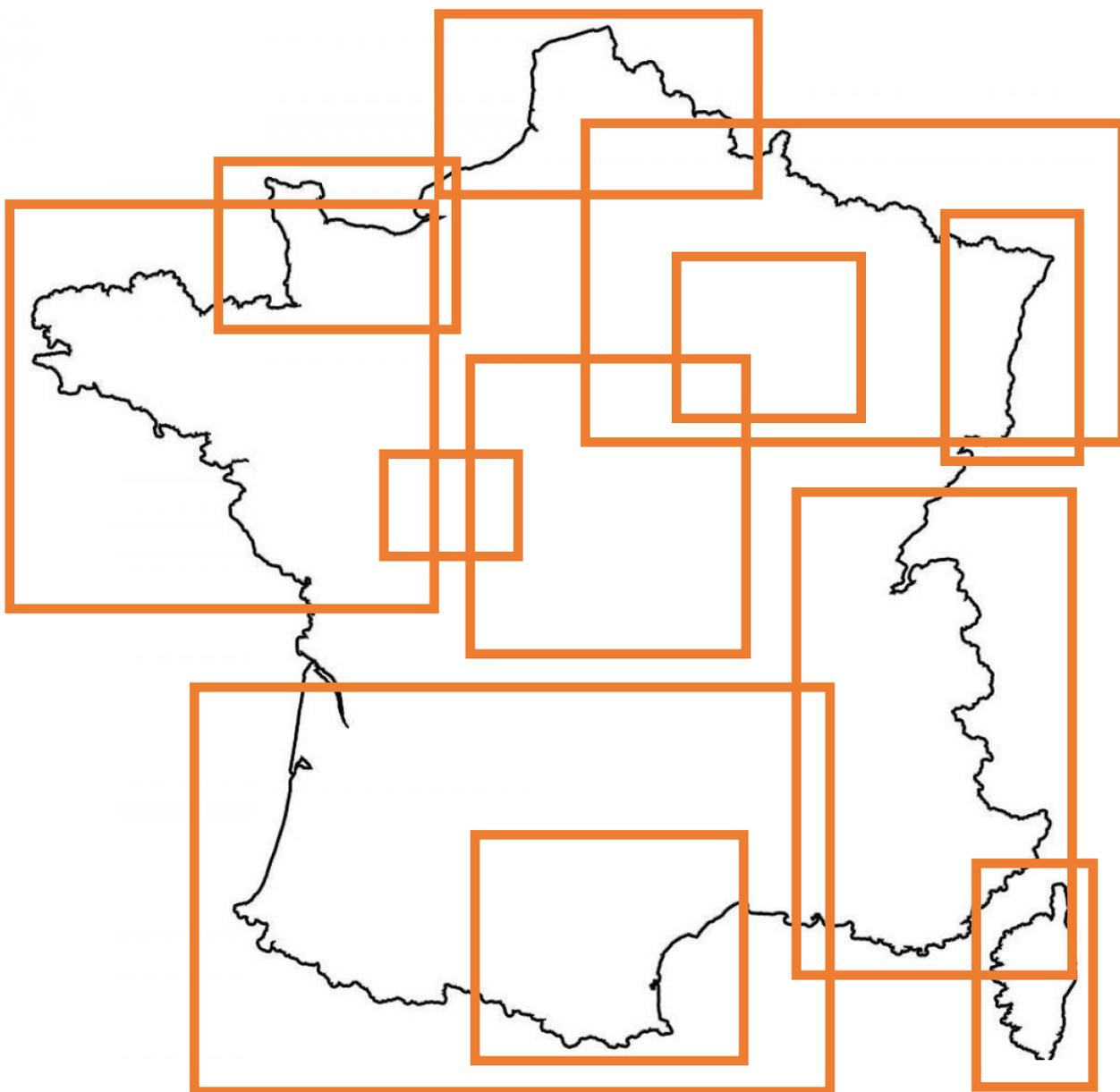


Figure 31 : Exemple de rendu pour un catalogue permettant une sélection cartographique

4. Conclusion

La prévention des risques liés aux cavités souterraines passe par la connaissance, à l'échelle de la France métropolitaine, des zones les plus susceptibles, et leur hiérarchisation. La dernière carte de présence de cavités souterraines sur le territoire métropolitain date de 1994. Les inventaires de ces cavités, ainsi que les méthodes de cartographie, ayant évolué depuis cette date, cette étude s'est attachée à mettre en œuvre une méthodologie afin de mettre au point une nouvelle cartographie de susceptibilité de présence de cavités souterraines.

Chaque typologie de cavités souterraines (carrière, cavité naturelle, cave, ouvrage civil, ouvrage militaire) a fait l'objet d'une analyse permettant d'aboutir pour 4 d'entre eux à une esquisse de cartographie :

- La susceptibilité de présence de carrières et de caves a été analysée à partir du seul facteur de prédisposition lithologique ;
- La susceptibilité de présence de cavités naturelles a de même été analysée à partir du facteur lithologique. Une analyse de la pertinence d'utilisation du facteur complémentaire « distance aux failles » a été réalisée. Il conviendrait de compléter celle-ci afin d'en faire un facteur effectivement pertinent ;
- La susceptibilité de présence des ouvrages militaires a été cartographiée à partir du facteur « distance aux lignes de front, aux frontières et aux traits de cote » ; ce premier résultat demande à être affiné vis-à-vis de la donnée d'entrée afin d'en faire un facteur pertinent ;
- La susceptibilité de présence d'ouvrages civils n'a pas fait l'objet d'une cartographie, le facteur lithologique n'étant pas pertinent. Une réflexion pourrait être menée vis-à-vis du facteur « distance aux villes ».

Les résultats obtenus sont ici prometteurs mais il est utile de poursuivre le travail. En effet, le seul critère initial -le facteur lithologique-, s'il est bien évidemment pertinent et satisfaisant en première approche ou pour une échelle de restitution faible, n'est cependant pas suffisant à mesure qu'une restitution plus fine est souhaitée (par exemple 1/50 000ème).

Les pistes d'amélioration formulées sont de plusieurs ordres :

- Analyse critique de la donnée initiale et des résultats obtenus : le but visé est de réduire les erreurs et incertitudes ;
- Analyse de la contribution d'autres facteurs : ce travail ayant été initié, il s'agit de compléter les analyses par l'utilisation de certains facteurs complémentaires (distance aux failles pour les cavités naturelles, distance aux villes pour les ouvrages civils) ou de refaire l'analyse avec des données d'entrée plus adaptée (lignes de front pour les ouvrages militaires ;
- Analyse portant sur des familles de données plus restreintes, tant sur les données de l'inventaire que sur les données décrivant les facteurs, ce qui correspond à une sectorisation des études/analyses conformément aux travaux précédents.

Ce travail cartographique a été complété par la collecte et l'analyse de cartographies existantes. Le résultat de ce travail est constitué de fiches, récapitulant les données d'entrée, la méthodologie et les limites, pour chacune des 31 études capitalisées à ce stade.

Ces études doivent permettre d'alimenter la réflexion concernant la contribution d'autres facteurs à la cartographie à l'échelle de la France métropolitaine. En perspective, il pourrait être judicieux de constituer un catalogue numérique de ces études dont les métadonnées comprendraient les limites géographiques de l'étude ainsi que ses principales caractéristiques techniques.

Pour rappel, ces cartes ici présentées ne peuvent être utilisées à des fins d'urbanisation ou de réglementations urbanistiques. Pour une telle utilisation, il convient de réaliser des études prenant en compte les facteurs de prédisposition à des échelles plus locales.

5. Bibliographie

Bayle E, Nachbaur A, Vanoudheusden E. (2011) – Evaluation des risques liés aux cavités naturelles dans le département du Jura - Zone pilote (phase 1). Rapport final. BRGM/RP-59386-FR, 186 p., 14 ann.

Bialkowski A, Tourliere B, Bernachot I, Chêne I. (2021) – Carte lithologique de France à 1/50 000. Version v.0. 27e édition de la Réunion des Sciences de la Terre, Lyon, France. (hal-02901984).

BRGM. (1998) – Notice explicative de la carte géologique de la France à 1/50 000, feuille de Cherbourg (n°17). Orléans : BRGM, 8p.

Chabas A, Daniel J, Roger L. (1998) – Altération du marbre et du granite de Délos: rôle de l'environnement atmosphérique marin naturel et pollué. In *Bulletin de correspondance hellénique*. Volume 122, livraison 2. pp. 487-500.

Colas B. (2013) – Cartographie de l'aléa mouvement de terrain du département des Pyrénées-Orientales. Echelle 1 : 50 000. Rapport final. BRGM/RP-62991-FR, 98 p., 4 ann., 3 pl.

Colas B. (2008) – Etablissement d'un Plan de Prévention des Risques concernant les mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines. Commune de Saint-Martin le Vieil. BRGM/RP-56410-FR, 17 p. 3 ann.

Colas B. (2011) – Cartographie de l'aléa mouvement de terrain du département de l'Aude. Echelle 1/50 000. Rapport final. BRGM/RP-60688-FR, 94p., 4 ann., 3 cartes H.T.

Colas B., 2013. Cartographie de l'aléa mouvement de terrain du département des Pyrénées-Orientales. Echelle 1 : 50 000. Rapport final. BRGM/RP-62991-FR, 98 p., 4 ann., 3 pl.

Closset L, Marteau P, Mathon C, Thierry P; Dugrillon-Batkowski D, Debeglia N. (2004) – Cavités souterraines de la communauté d'agglomération de Châlons-en-Champagne (Marne). Cartographie de l'aléa et données techniques pour l'élaboration de la cartographie réglementaire et du PPR. BRGM/RP-53180-FR, 316 p., 1 ann. h.t.

Cochery R. (2013) – Caractérisation et cartographie de l'aléa mouvement de terrain lié aux cavités et coteaux sur Lavenay, Poncé-sur-le-Loir et Ruillé-sur-Loir (Sarthe). Rapport final. BRGM/RP-62668-FR, 55 p., 2 ann.

Cochery R. (2015) – Compléments à l'étude d'aléa mouvement de terrain sur Lavenay, Poncé-sur-le-Loir et Ruillé-sur-Loir Sarthe, réalisée en 2014. Rapport final. BRGM/RP-65222-FR, 27 p.

El Boudani M. (2017) – Suivi non destructif de l'altération de marbres par méthodes acoustiques. Acoustique [physics.class-ph]. Université de Cergy Pontoise (UCP). Français.

Fontaine M., Nachbaur A., Rohmer J. (2008) – Méthodologie de l'évaluation départementale du risque lié aux effondrements de cavités souterraines abandonnées. Rapport final. BRGM/RP-56275-FR, 167 p., 63 ill., 7 tabl., 7 ann.

Foucault A, Raoult J.F, Cecca F., Platevoet B. (2014) – Dictionnaire de Géologie. 8ème édition Dunod, Malakoff, France, 396p

Marçot N, Mirgon C, Colas B. (2007) – IVème Contrat de Plan Etat Région "Risques naturels et nuisances Action : Données, information, évaluation sur les risques naturels". Cartographie des mouvements de terrain dans la vallée du Bas Buëch - Laragnais - Hautes-Alpes (05). Phase 1 – Cartographie de l'aléa mouvements de terrain au 1/50 000. BRGM/RP-55184-FR, 90 p. 59 ill., 4 ann., 4 cartes.

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. BRGM/RP-52959-FR, 73 p. 36 fig., 1 carte.

Oppermann A avec la collaboration de Donsimoni M. (2009) – Inventaire départemental des cavités souterraines hors mines de l'Indre. Rapport final. BRGM/RP-56536-FR, 55 p., 24 ill., 3 ann., 1 carte hors-texte.

Perrin J, Noury G, Azémard P, Clément F, Mathon D, Haussard S, Respaud C, Védie E, Zergaoui N. (2016) – Réflexions méthodologiques pour une meilleure évaluation de l'aléa mouvements de terrain d'origine karstique. Rapport BRGM/RP-66508-FR, 63p., 19 fig., 4 ann.

Rasplus L ; Alcaydé G; Desprez N. (1966) – Notice explicative, Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille de Tours (n°107). Orléans : BRGM,17p.

Rapport BRGM/RR-38371-FR (1994) – Cartographie des cavités souterraines abandonnées et des risques qui leur sont liés en France Métropolitaine. Rapport final.

Rivet F. (2007) – IVe contrat de plan état-région "Risques naturels et nuisances - Action : données, information, évaluation sur les risques naturels". Cartographie régionale de l'aléa mouvements de terrain au 1/100 000. Année 1 : Etude de la Provence calcaire et rhodanienne. Rapport de synthèse. BRGM/RP-56042-FR, 30 p.

Rivet F, Girard, A, Mathon C. (2012) – Carte régionale de l'aléa d'effondrement/glissement lié à la présence de terrains gypseux triasiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. BRGM/RP-60896-FR, 106 p., 3 ann.

Rivet F, Mathon C, Brevot P.-A. (2007) – IVe contrat de plan Etat-Région "Risques naturels et nuisances - Action : Données information, évaluation sur les risques naturels". Cartographie régionale de l'aléa mouvements de terrain à l'échelle du 1/100 000. Année 1 : Etude de la Provence calcaire et rhodanienne. Rapport final. BRGM/RP-55710-FR, 106 p. 1 ann., 12 pht., 1CD.

Rivet F, Mathon C, Draperi N. (2009) – Cartographie régionale de l'aléa mouvement de terrain au 1/100 000 – Année 2 : Etude de la zone alpine. Rapport final. BRGM/RP-56762-FR, 136 p., 1 ann., 8 cartes HT.

Rivet F, Mirgon C, Navarro A. (2011) – Vème Contrat de projet Etat-Région "Optimiser la gestion des ressources naturelles, prévenir et gérer les risques - Mesure : Améliorer la connaissance des

risques" Cartographie régionale de l'aléa mouvements de terrain au 1/100 000 - Année 3 : Etude de la Provence cristalline. BRGM/RP-59163-FR, 130 p., 8 cartes HT, 1 CD.

Rivet F, Royaute L. (2011) – Vème Contrat de projet Etat-Région "Optimiser la gestion des ressources naturelles, prévenir et gérer les risques - Mesure : Améliorer la connaissance des risques " Cartographie régionale de l'aléa mouvements de terrain au 1/100 000. Synthèse. BRGM/RP-59584-FR, 105 p., 3 cartes HT, 1 CD.

Terrier M, Sedan-Miegemolle O, Marçot, N. (2002) – Bassin versant de la Roya (Alpes-Maritimes). Cartographie de l'aléa mouvement de terrain, échelle 1/50000. IV Contrat de Plan Etat Région Risques naturels et nuisances- Action : données, information, évaluation sur les risques naturels. BRGM/RP-51791-FR, 48 p. 16 cartes, CD-Rom.

Terrier Sedan M, Furic S. (2003) – Bassin versant de la Roya (Alpes Maritimes) - Cartographie de l'aléa mouvements de terrain, échelle 1/25000 : secteurs de Breil-sur-Roya, Fontan, la Brigue, Saorge, Tende. BRGM/RP-52513-FR, 145 p.

Thuon Y, Pageau J. (2011) – Mise à jour de la carte d'aléa du rapport RP-53180-FR (2004) et de la note technique NT08CHA11 (2008). Rapport final. BRGM/RP-59896-FR, 42 p., 4 cartes HT.

Trouillard-Perrot C et Zornette N. (2003) - Inventaire des cavités souterraines de l'Indre-et-Loire – Rapport final. BRGM/RP-52318-FR. 53 p., 28 fig. 9 annexes.

Vanoudheusden E. (2014) – Cartographie de la susceptibilité de présence de cavités karstiques en Région Centre. Rapport final. BRGM/RP-62816-FR, 62p., 37 ill., 3 ann.

Vanoudheusden E. (2018) – Inventaire des cavités sous le plateau central de Clermont-Ferrand. Rapport final. BRGM/RP-68028-FR, 32p., 17 fig., 4ann.,CD.

Vanoudheusden E. (2021) – Etude de faisabilité d'une cartographie nationale de susceptibilité de présence de cavités. Rapport final. BRGM/RP-70461-FR, 39 p., 26 ill., 5 tabl., 1 ann.

Renault O, Cochery R, Bastone V. (2013) – Etablissement de scénarios de risques mouvement de terrain dans le département du Jura - phase 2 . BRGM/RP-62519-FR, 93 p., 12 pl. HT.

Vandromme R, Loislard M. (2009) – Identification et cartographie des aléas de mouvements de terrain liés aux cavités souterraines sur la commune de Lavernat (Sarthe). Rapport final. BRGM/RP-56735-FR, 115 p., 2 ann., 2 cartes h.t.

Sitographies :

BRGM (2006) – *Cavités souterraines* – AUVAA010051. BRGM. [en ligne]. Consulté le 17/06/2022]. Disponible à l'adresse : [Cavités souterraines - AUVAA010051 \(brgm.fr\)](https://www.brgm.fr/fr/referance-projet-acheve/premiere-version-carte-lithologique-france-metropolitaine-au-150-000e)

BRGM (2020) – *Première version de la carte lithologique de la France métropolitaine au 1/50000^e*. BRGM. [en ligne]. [Consulté le 11/05/2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.brgm.fr/fr/referance-projet-acheve/premiere-version-carte-lithologique-france-metropolitaine-au-150-000e>

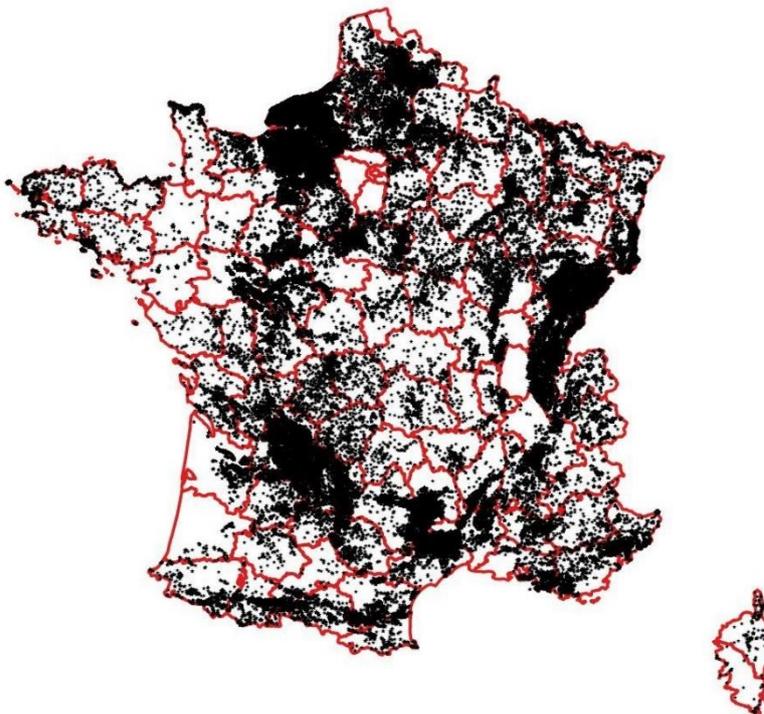
Georisques (2003) – Cavité souterraine BNOAA003864. Géorisque. [en ligne]. Consulté le 17/05/2022]. Disponible à l'adresse : <https://fiches-risques.brgm.fr/georisques/cavite/BNOAA0003864>

Géorisques – *Inventaire des cavités souterraines*. BRGM [en ligne]. [Consulté le 25/05/2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.georisques.gouv.fr/donnees/bases-de-donnees/inventaire-des-cavites-souterraines>

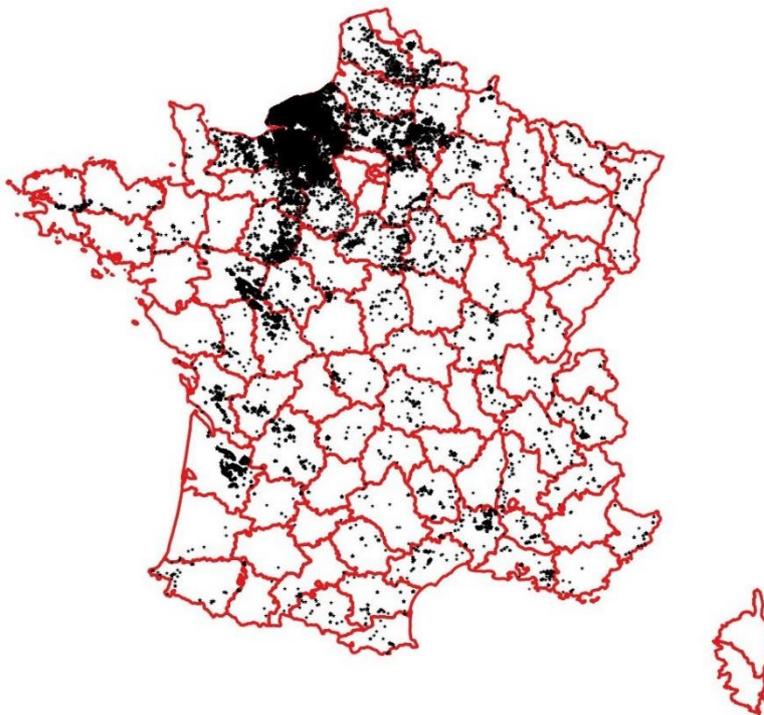
Lecouvey Nicolas (2016) – *Des falaises et des grottes*. Mairie de Jobourg. [en ligne]. Consulté le 15/06/2022]. Disponible à l'adresse : <https://www.mairie-jobourg.fr/wp-content/uploads/2016/03/Falaises.pdf>

Annexe 1 : Répartition des cavités selon les typologies (données issues de BDCavité)

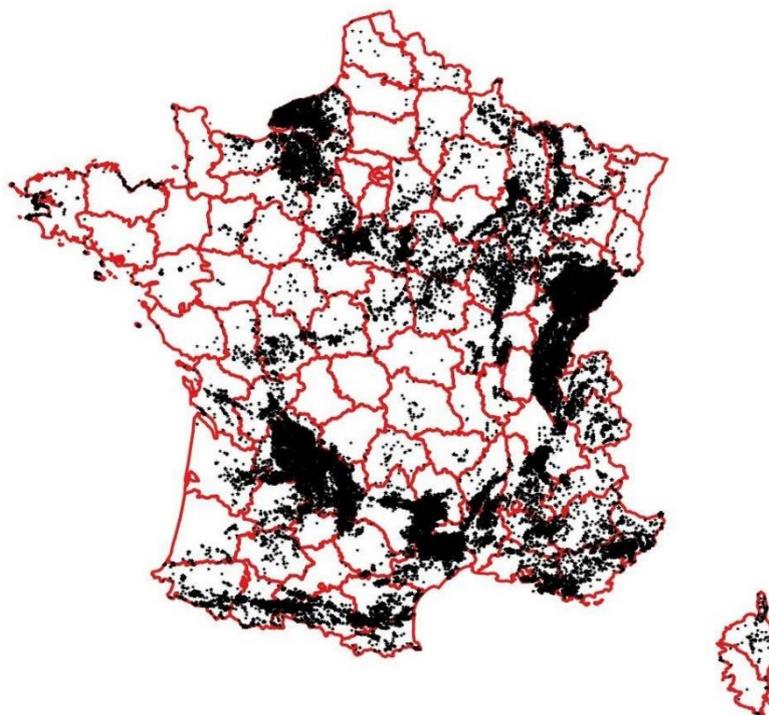
Ensemble des cavités



Les carrières



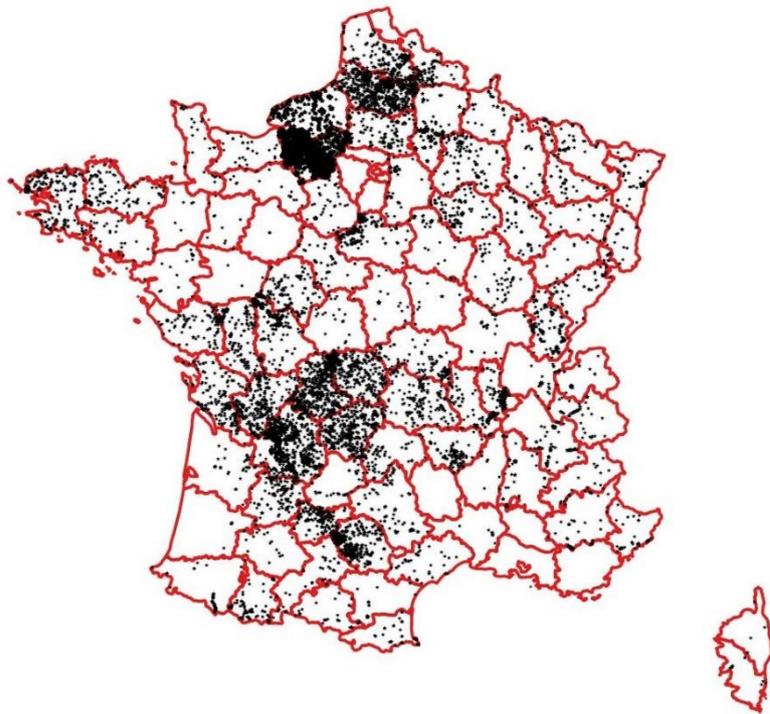
Les cavités naturelles



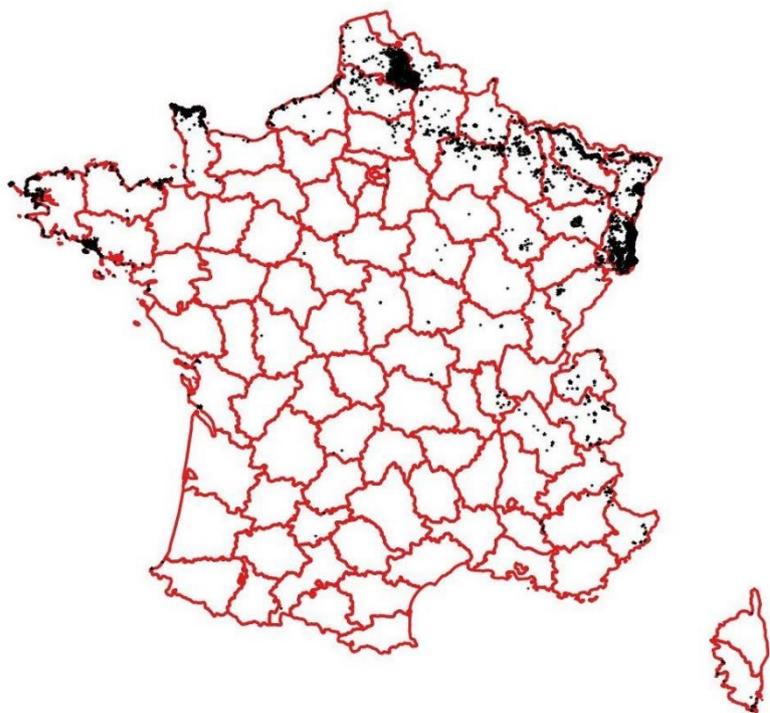
Les caves



Les ouvrages civils

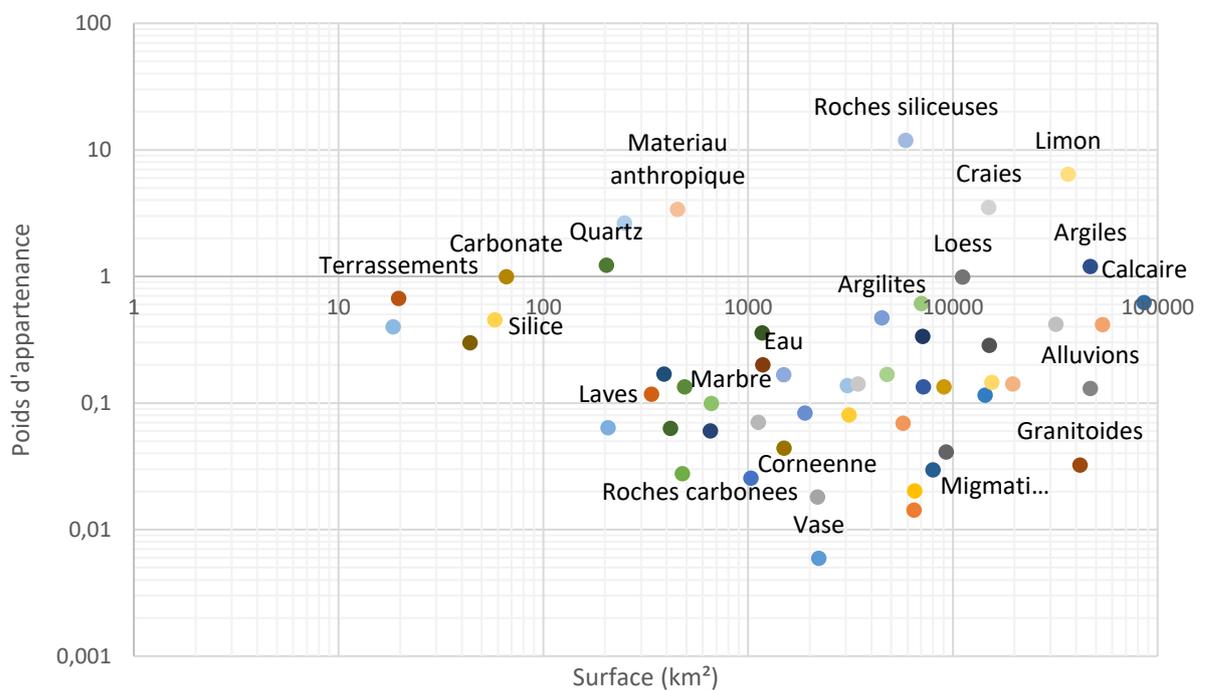


Les ouvrages militaires



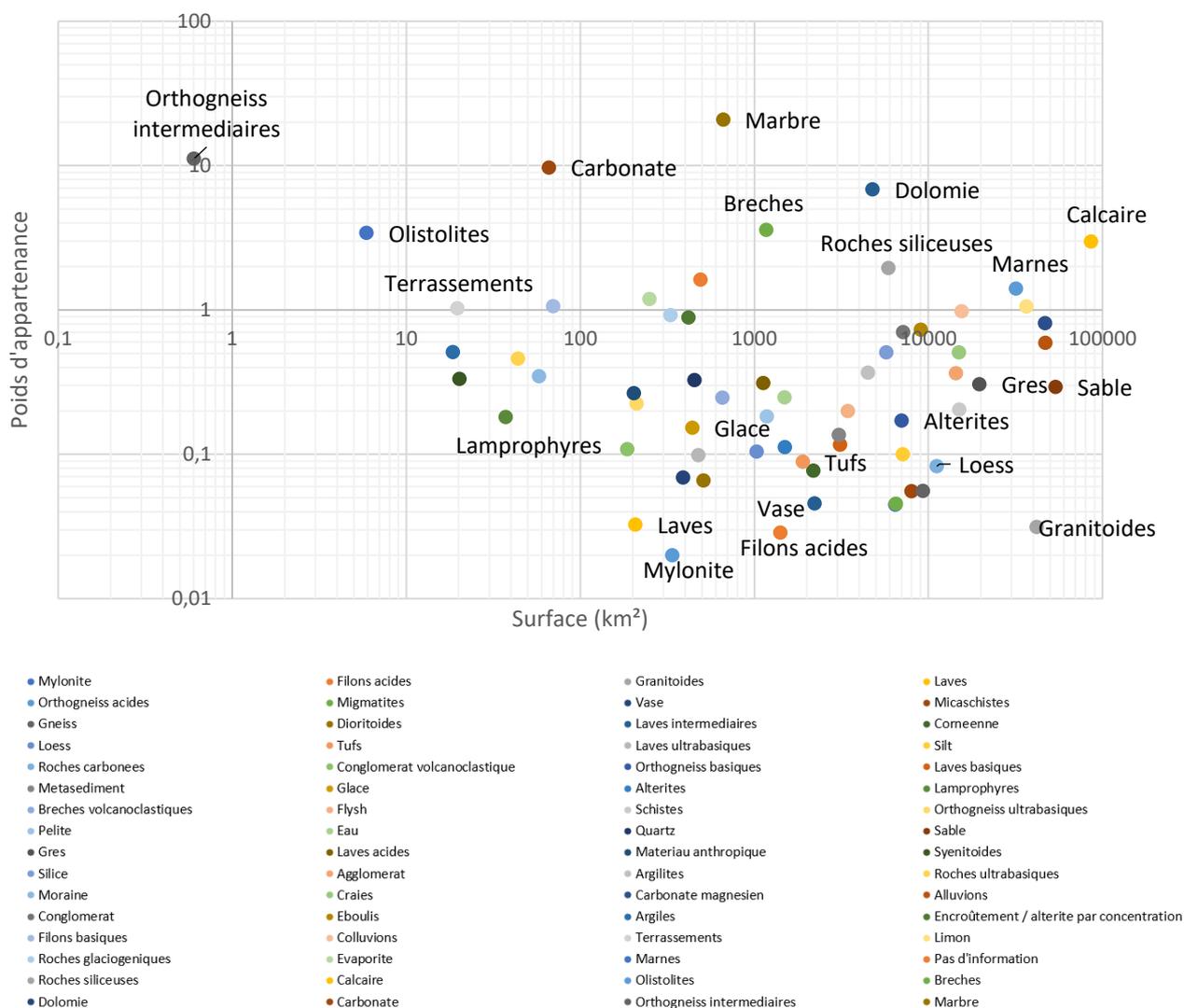
Annexe 2 : Graphiques sur la répartition des poids d'appartenance en fonction de la surface de l'ensemble des lithologies

Annexe 2-a : Carrières

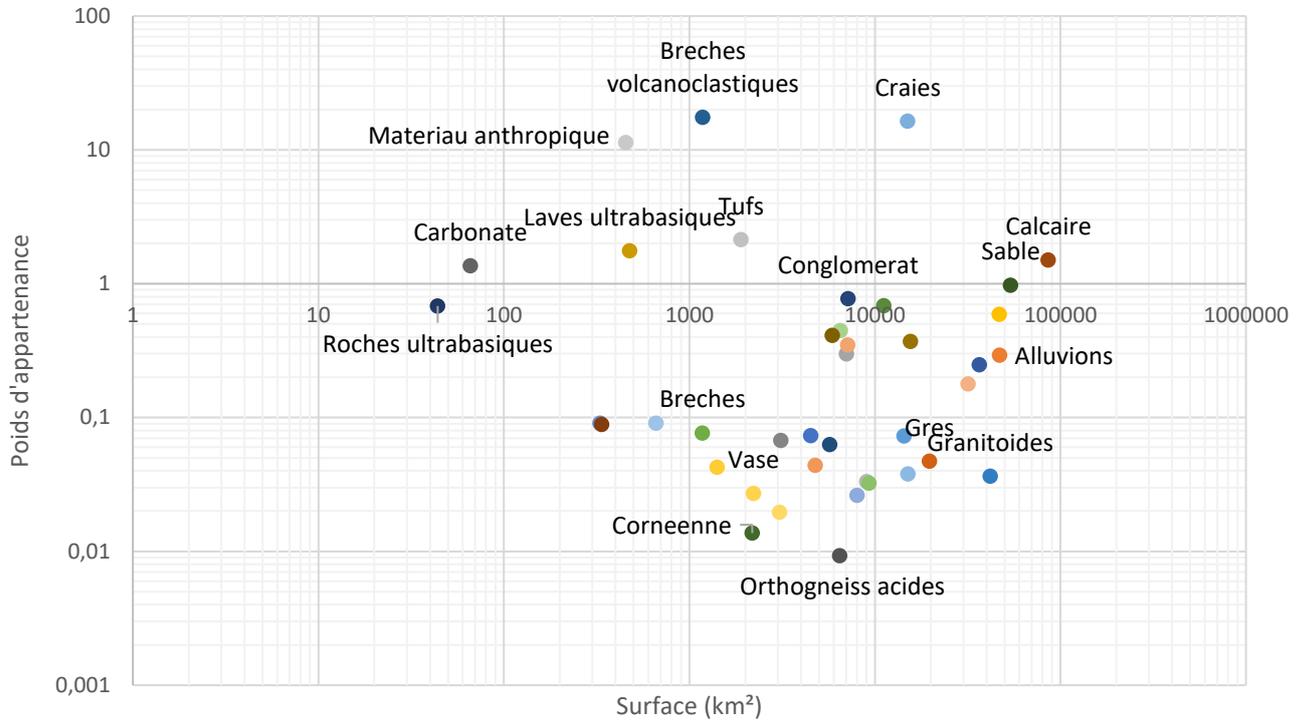


- | | | | |
|-----------------------|------------------------|------------------------|---|
| ● Vase | ● Orthogneiss acides | ● Corneenne | ● Migmatites |
| ● Roches carbonées | ● Laves ultrabasiques | ● Micaschistes | ● Granitoides |
| ● Gneiss | ● Orthogneiss basiques | ● Pelite | ● Encroûtement / alterite par concentration |
| ● Laves | ● Moraine | ● Laves acides | ● Laves basiques |
| ● Tufs | ● Marbre | ● Agglomerat | ● Mylonite |
| ● Alluvions | ● Eboulis | ● Conglomerat | ● Pas d'information |
| ● Metasediment | ● Gres | ● Flysh | ● Colluvions |
| ● Eau | ● Dolomie | ● Laves intermediaires | ● Breches volcanoclastiques |
| ● Schistes | ● Roches ultrabasiques | ● Silt | ● Breches |
| ● Carbonate magnesien | ● Sable | ● Marnes | ● Silice |
| ● Argilites | ● Alterites | ● Calcaire | ● Terrassements |
| ● Loess | ● Carbonate | ● Argiles | ● Quartz |
| ● Evaporite | ● Materiau anthropique | ● Craies | ● Limon |

Annexe 2-b : Cavités naturelles



Annexe 2-c : Caves



- | | | | |
|----------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------|
| ● Agglomerat | ● Alluvions | ● Alterites | ● Argiles |
| ● Argilites | ● Breches | ● Breches volcanoclastiques | ● Calcaire |
| ● Carbonate | ● Colluvions | ● Conglomerat | ● Comeenne |
| ● Craies | ● Dolomie | ● Eboulis | ● Filons acides |
| ● Filons basiques | ● Gneiss | ● Granitoides | ● Gres |
| ● Laves basiques | ● Laves ultrabasiques | ● Limon | ● Loess |
| ● Marbre | ● Marnes | ● Materiau anthropique | ● Metasediment |
| ● Micaschistes | ● Migmatites | ● Moraine | ● Mylonite |
| ● Orthogneiss acides | ● Roches siliceuses | ● Roches ultrabasiques | ● Sable |
| ● Schistes | ● Silt | ● Tufs | ● Vase |

Annexe 3 : Fiches récapitulatives des études de cartographies

<u>Evaluation des risques liés aux cavités naturelles dans le département du Jura - Zone pilote (phase 1).</u>	
<u>Rapport final. BRGM/RP-59386-FR (2011)</u>	
DONNEES DE BASE	
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique à 1/50 000 précision +/- 50m • Carte hydrogéologique : DREAL, BSS, BD Carthage • BD cavité 	
METHODOLOGIE	
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique, contexte hydrogéologique • Inventaire des cavités • Typologie et nature des phénomènes • Facteurs de présence de cavités naturelles : nature lithologique + intensité de fracturation -> Bilan de susceptibilité de présence de cavités • Facteurs d'effondrement : épaisseur de recouvrement + infiltration des eaux • Susceptibilité basée sur 3 critères : <ul style="list-style-type: none"> ○ Sensibilité à la dissolution ○ Epaisseur du recouvrement ○ Capacité d'infiltration des eaux • Supports cartographiques utiles à l'évaluation de la susceptibilité <ul style="list-style-type: none"> ○ Log géologique par secteurs structuraux + géologie structurale ○ Sensibilité à la dissolution ○ Formations superficielles : épaisseur ○ Capacité d'infiltration des eaux • Evaluation de la susceptibilité d'apparition de désordre lié aux cavités naturelles <ul style="list-style-type: none"> ○ Susceptibilité de présence de cavités en profondeur <ul style="list-style-type: none"> ▪ Liée à la sensibilité à la dissolution <ul style="list-style-type: none"> • Critères explicatifs théoriques • Calages des indices • Gestion des incertitudes ▪ Liée à la structure -> carte de susceptibilité de présence des cavités en profondeur ○ Susceptibilité d'effondrement des terrains au droit des cavités créant l'instabilité <ul style="list-style-type: none"> ▪ Liée à épaisseur des terrains de recouvrement <ul style="list-style-type: none"> • Nature du recouvrement • Evolution de l'épaisseur du recouvrement • Répartition des données de désordres en fonction de l'épaisseur des terrains de recouvrement ▪ Liée à l'infiltration des eaux : IDPR (indice de développement et de persistance des réseaux) -> carte de susceptibilité d'effondrement des terrains au droit de la cavité engendrant des instabilités en surface • Résultat de susceptibilité d'apparition de désordres en surface <ul style="list-style-type: none"> ○ Carte de susceptibilité globale : croisement de susceptibilité de présence de cavités en profondeur et d'effondrement • Analyses des résultats et limites : niveau de susceptibilité présente une signification relative = probabilité spatiale d'apparition de désordre. • Enjeux : évaluation, localisation + vulnérabilité des enjeux • Exposition au risque : confronte l'aléa aux enjeux 	
LIMITES	
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire des cavités non exhaustif, cavités recensées mais caractéristiques peu connues, • Imprécision des niveaux de susceptibilité : dû au support cartographique, • Carte de susceptibilité d'effondrement : affiner les critères explicatifs. 	

<u>Cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain de la commune de Barly (Pas-de-Calais).</u> <u>Rapport final. BRGM/RP-52697-FR (2003)</u>
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique à 1/50 000 • Hydrogéologique : carte piézométrique • BD cavité
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique, contexte hydrogéologique • Susceptibilité de présence de cavité souterraine : basée sur contexte géologique et hydrogéologique favorable à l'exploitation de la craie (isopièze), potentiel d'infiltration (MNT) <ul style="list-style-type: none"> ○ Cadre géologique ○ Cadre hydrogéologique ○ Carte de susceptibilité de présence de cavité souterraine à 1/25 000 : observe l'épaisseur des zones non saturés (ZNS) de minium 10m : combinaison des critères géologiques et hydrogéologiques <ul style="list-style-type: none"> ▪ Degré nul à faible = 1 ▪ Degré moyen = 2 ▪ Degré fort = 3 • Susceptibilité de déstabilisation des cavités souterraines due à l'inondation par remontée de la nappe : <ul style="list-style-type: none"> ○ Carte de l'épaisseur de la ZNS sur les hautes eaux : création d'un tableau de susceptibilité pour classer les susceptibilités. ○ Déstabilisation par la profondeur des cavités : facteur aggravant • Susceptibilité de déstabilisation des cavités souterraines due à l'infiltration des eaux de pluie (potentiel d'infiltration) <ul style="list-style-type: none"> ○ Carte de potentiel d'infiltration IDPR (indice de développement et de persistance des réseaux) ○ Calcule la distance au plus proche cours d'eau réel avec la distance théorique • Carte de la susceptibilité aux mouvements de terrain liés aux cavités souterraines <ul style="list-style-type: none"> ○ Croisement de facteurs de prédisposition (présence de cavité souterraine) et principaux facteurs de déclenchement (inondation par remontée et nappe et infiltration des eaux de pluie) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Création d'une grille de susceptibilité • Susceptibilité : <ul style="list-style-type: none"> ○ Nulle à faible = jaune ○ Moyenne = orange ○ Forte = rouge ○ Avérée= violet
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Carte de susceptibilité de mouvement de terrain : Carte à 1/25 000 provient d'une étude à partir de la carte géologique à 1/50 000 donc agrandie par un facteur 2 : limite sur les marges de sécurité qui implique l'étendue de la zone de susceptibilité supérieure.

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. BRGM/RP-52959-FR (2004)
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique à 1/50 000 • Hydrogéologique : BSS, eaux superficielles, principaux aquifères, carte piézo (1/100 000) • BD cavité + archive du SDICS • MNT (50 à 250m)
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique, contexte hydrogéologique • Cadre géographique, géologique et hydrogéologique • Typologie des désordres : effondrement et affaissement • Inventaire des cavités : archive du SDICS : carte de répartition des cavités selon la nature • Facteurs de prédisposition • Susceptibilité de présence de carrière souterraine : <ul style="list-style-type: none"> ○ Carrière souterraine <ul style="list-style-type: none"> ▪ Epaisseur de la couverture : Carte isopaque et donnée recensée de la BSS ->carte de zonation de l'épaisseur de la couverture de la craie : Fort : <4m de couverture rouge, Moyen 4 à 12 m orange, Nul à faible >12m jaune ▪ Epaisseur de la craie exploitable (niveau piézo : moyenne entre 2 années) : Fort : >11m de craie potentiellement exploitable, Moyen 3 à 11m, Nul à faible <3m ->classe appliquée à l'épaisseur de la craie hors eau et épaisseur totale de craie <ul style="list-style-type: none"> • Epaisseur de la craie hors eau carte isopaque de la zone non saturé (topo + mnt), piézo: carte zonation • Epaisseur totale de la craie : carte isohypse, carte géol, BSS : carte de zonation ▪ Croisement = carte de zonation de l'épaisseur de la craie potentiellement exploitable + carte de l'épaisseur de la craie donne carte de susceptibilité de présence de carrière souterraine avec couleur jaune (nulle à faible), orange (moyen), forte (rouge) ○ Présence de souterrain : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Carte Epaisseur de la ZNS : Nul à faible <0m jaune ; Moyen >0m orange ○ Présence de cavité souterraine <ul style="list-style-type: none"> ▪ Carte Périmètre du SDICS (périmètre de sécurité) ▪ Croisement des 2 cartes donne carte de susceptibilité de présence de cavités souterraines • Facteurs de déclenchement : <ul style="list-style-type: none"> ○ Répartition pluviométrique sur 12 ans ○ Susceptibilité d'inondation des cavités souterraines par la nappe : basée sur niveaux piézo et profondeur des planchers des cavités : <28m nulle à faible, 15-28m moyenne, >15 forte ○ Carte de Potentiel d'infiltration : Fort IDPR <0 rouge, Moyen 0<IDPR<1.70 orange, Nul à faible IDPR >1.70 jaune ○ Susceptibilité de déstabilisation des cavités souterraines par les facteurs de déclenchement : combinaison des cartes d'infiltrations des eaux et d'inondations des cavités par la nappe • Aléa sur le département puis sur les communes <ul style="list-style-type: none"> ○ Croisement : (présence de cavités souterraines) et des facteurs déclenchants (infiltration des eaux de surface et inondation des cavités souterraines par la nappe) ○ Facteurs de prédisposition élément déterminant • Homogénéiser les zones d'aléas car le travail n'est pas fait à la même échelle
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Carte considérée comme préliminaire : affiner la carte avec des critères historiques relatifs au mode d'exploitation, • PPR implique des mesures conservatoires = impact sur aménagement du territoire, • Cerner les incertitudes sur la présence des cavités, • Voir aussi les enjeux, • Faire une reconnaissance de carrière avec méthode géophysique et géologique.

<p><u>Cavités souterraines de la communauté d'agglomération de Châlons-en-Champagne (Marne). Cartographie de l'aléa et données techniques pour l'élaboration de la cartographie réglementaire et du PPR.</u></p> <p><u>BRGM/RP-53180-FR (2004)</u></p>
<p>DONNEES DE BASE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique • Carte hydrologique • Inventaire
<p>METHODOLOGIE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Contexte géologique et naturelle physique, hydrologique • Inventaire + étude microgravimétrique • Cartographie de la susceptibilité de présence de cavité et de l'aléa <ul style="list-style-type: none"> ○ Type et nature des désordres ○ Visites de terrain • Cartographie de la susceptibilité de présence de cavité : approche naturaliste : carte sur le territoire à une échelle relative de probabilité de présence de cavité : <ul style="list-style-type: none"> ○ Ne définit pas une probabilité absolue mais compare les aléas induits dans différentes classes ○ Echelle du 1/15 000 : intéressant pour l'aménagement, délicat à introduire dans de grand projet comme PLU ou PPR ○ Zonage de la susceptibilité basé : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zone urbaine du centre-ville : présence de cavité urbaine (cave, refuge, galerie), profondeur des terrains et de la nappe ▪ Pour zone urbaine périphérique plus récente + rural : proximité des cavités recensées et localisées, non localisées avec précision, géol, hydrogéologie ▪ Zonage en 5 zones de susceptibilité avec 4 niveaux: <ul style="list-style-type: none"> • Zone urbaine périphérique très forte susceptibilité de présence de cavité • Zone rurale : susceptibilité de présence de cavité forte • Urbaine centrale susceptibilité de présence de cavité moyenne • Zone urbaine et rurale : susceptibilité de présence de cavité moyenne • Zone urbaine et rurale : susceptibilité de présence de cavité faible à nulle • Pas de zone bien définie, à caractère évolutif • Cartographie de l'aléa affaissement et effondrement : à caractère évolutif : échelle à 1/15 000 et puis agrandie sur les secteurs où le risque est plus élevé à 1/7 500 <ul style="list-style-type: none"> ○ 3 niveaux d'aléas : fort, moyen et faible <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fort pour les cavités localisées ; zone tampon entre 10 et 20m, pour les crayères : zone tampon à 25 m pour les cavités isolées et 50 m pour cavités regroupées ▪ Aléa moyen à faible : galerie tampon 10 à 20m ○ Susceptibilité de présence liée à une localisation imprécise ou à un indice de cavité <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cavité connue : tampon 50m ▪ Susceptibilité très forte rayon de 150-300m ▪ Susceptibilité forte : 150m -300m ▪ Susceptibilité moyenne ▪ Susceptibilité faible à nulle • Élément technique pour la création d'un règlement d'un zonage réglementaire <ul style="list-style-type: none"> ○ Zonage avec 4 niveaux de réglementation : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rouge ▪ Bleu foncé ▪ Bleu clair ▪ Vert ○ Appliqué aux enjeux cela aboutit à 7 niveaux : R1, B1, V1 pour l'aléa ; B2, B3,V2,V3 susceptibilité
<p>LIMITES</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Petite échelle, • Zonage de la susceptibilité basé sur leur localisation dans la ville (zone urbaine/rurale), • Approche naturaliste.

Identification et cartographie des aléas de mouvements de terrain liés aux cavités souterraines sur la commune de Lavernat (Sarthe). Rapport final. BRGM/RP-56735-FR (2009)
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique simplifiée • Fond IGN • Inventaire
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie des aléas mouvements de terrain liés aux cavités souterraines • Contexte géographique et géologique • Inventaire : enquête de terrain+ inventaire déjà existant • Carte informative : carte de représentation de toutes les cavités dans la commune sur fond IGN • Carte d'aléa <ul style="list-style-type: none"> ○ Effondrement : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pas de connaissance sur la géométrie des puits et des galeries : chercher la profondeur des cavités pour estimer l'aléa : profondeur des toits des différentes couches peuvent contenir des cavités ; ▪ Zone tampon dépendant de l'incertitude de positionnement : incertitude de 50m = tampon 100m. • Susceptibilité de présence d'une cavité : hiérarchiser les zones au sein de la commune <ul style="list-style-type: none"> ○ Densité de cavité : nombre de cavité par unité de surface établie pour des rayons de 500m. • Densité croisée avec la profondeur du toit : montre la susceptibilité de présence de cavité : <ul style="list-style-type: none"> ○ Très faible, ○ Faible, ○ Moyenne, ○ Forte (bleu ciel au bleu foncé). ○ Zone blanche zone ou matériaux exploitation trop profond
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Absence d'archive et de donnée temporelle d'effondrement : ne peut pas créer une carte d'aléa, • Zone tampon dépend de l'incertitude de positionnement et pas de l'intensité du phénomène.

<p>Mise à jour de la carte d'aléa du rapport RP-53180-FR (2004) et de la note technique NT08CHA11 (2008). Rapport final. [Châlons-en-Champagne] BRGM/RP-59896-FR (2011)</p>
<p>DONNEES DE BASE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique à 1/50 000 • Hydrogéologie : écoulement de surface, nappe phréatique, courbes hydro isohypses
<p>METHODOLOGIE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Synthèse de la cartographie de la susceptibilité de présence de cavité et de l'aléa effondrement/affaissement <ul style="list-style-type: none"> ○ Evaluation de l'aléa repose sur : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Géométrie des cavités ; fréquence et densité spatiale des cavités ; condition d'exploitation ; de maintenance ; vitesse, ampleur et intensité des déformations observées. Zonage basé sur la géologie, morphologie, hydrogéologie dont validité est faussée par événement, répartition -> zonage en partie statistique • Cartographie de la susceptibilité de présence de cavité à 1/15 000 <ul style="list-style-type: none"> ○ Approche naturaliste ○ Basée sur la géologie, hydrogéologie, inventaire : permet la cartographie des zones et le classement sur une échelle relative de probabilité de présence de cavité (car pas absolu). ○ 5 zones : susceptibilité très forte (zone urbaine périphérique), forte (rurale), moyenne (urbaine centrale), moyenne (urbaine et rurale), faible à nulle (urbaine et rurale sans cavité) • Cartographie de l'aléa affaissement et effondrement <ul style="list-style-type: none"> ○ Aléa fort, moyen, faible ○ Non quantitative, aléa évolutif, paramètre non connu avec précision ○ Carte à 1/15 000 avec un agrandissement dans les secteurs plus sensibles à 1/7 500 ○ Aléa fort : cavités localisées <ul style="list-style-type: none"> ▪ Carrière visitée tampon entre 10 et 20m ▪ Crayère non visitable entre 25 et 50m ○ Aléa moyen et faible : galerie localisée et visitée <ul style="list-style-type: none"> ▪ Entre 10 et 20m ○ Susceptibilité : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cavités connues mais localisation imprécise : rayon de 50m ▪ Très forte : rayon de 150 à 300m ▪ Forte : rayon de 150 à 300m ▪ Moyenne : sur des critères de géologie, morphologie et hydrogéologie ▪ Nulle : nappe phréatique faible profondeur
<p>LIMITES</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Petite échelle, délicat à introduire dans un PLU ou PPR, • Ne prend pas en compte des facteurs aggravants, • Zonage statistique, • Zone d'aléa pas bien définis : zonage à caractère évolutif, • Approche naturaliste.

Méthodologie de l'évaluation départementale du risque lié aux effondrements de cavités souterraines abandonnées.	
Rapport final. BRGM/RP-56275-FR (2008)	
DONNEES DE BASE	
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire : BD cavités, BD mvt • Hydrogéologique : ZNS • Géologie, isopièze, BD topo 	
METHODOLOGIE	
<ul style="list-style-type: none"> • Méthode de l'évaluation départementale : méthode des scénarios départementaux de risque mouvement de terrain lié aux effondrements de cavité souterraine aboutit à : <ul style="list-style-type: none"> ○ Hiérarchisation quantitative des niveaux de susceptibilité tout en gérant la non exhaustivité des données, effet de seuil et présentation de l'incertitude ○ Pas de critère explicatif préétablis mais évaluation de la susceptibilité dès que les critères plus pertinents sont sélectionnés : Fonction de la densité et Fonction de la possibilité • Évaluation de la susceptibilité : développement méthodologique <ul style="list-style-type: none"> ○ Type de désordres ○ Intensité de l'aléa ○ Susceptibilité plutôt qu'aléa <ul style="list-style-type: none"> ▪ Croisement entre intensité prévisible et probabilité d'occurrence : retient la notion de prédisposition et non la probabilité d'occurrence. Ici susceptibilité = composante spatiale et non temporelle de l'aléa ○ Indépendant des événements de présence de cavités et effondrements de cavité <ul style="list-style-type: none"> ▪ Effondrement cavité : occurrence de 2 événements indépendant : présence de cavité à cet endroit et possibilité qu'elle s'effondre ▪ Carte de susceptibilité de présence et effondrement donnent la carte de susceptibilité ○ Dvlp de 2 nouveaux outils pour évaluer aléa : prend en compte la non exhaustivité des données <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fonction de la densité : critère qualitatif donne hétérogénéité de répartition de l'information <ul style="list-style-type: none"> • Fonction ponctuelle : théorie du poids des évidences : un critère ex géologie va avoir un poids différent selon les couches ▪ Fonction de possibilité : critère quantitatif ; effet de seuil, manque de donnée : représentation rigoureuse d'une information imprécise : basé sur une information d'expert et gère les effets de seuils • Déroulement méthodologique de l'évaluation de la susceptibilité en plusieurs étapes : <ul style="list-style-type: none"> ○ Etape 0 : délimitation du territoire d'étude ○ Etape 1 : identification des scénarios retenus sur le territoire (un par type de cavités) ○ Etape 2 : constitution des inventaires de données localisées sur ce territoire ○ Etape 3 : sélection de critères explicatifs adaptés au contexte départemental (facteur de prédisposition) ○ Etape 4 : définition des outils de calcul pour chaque critère ○ Etape 5 : calage de la maille de calcul pour chaque critère, une fois que l'outil de calcul est défini ○ Etape 6 : évaluation de la susceptibilité associée à chaque critère ->rôle de l'expertise importante : fait 2 inventaires : un sur les cavités et un sur les mouvements de terrain • Identifier les critères explicatifs liés à la cavité et liés à l'effondrement • Evaluation des enjeux : <ul style="list-style-type: none"> ○ Etape 1 : fixer une grille de calcul sur le département ○ Etape 2 : localiser les surfaces bâties sur lesquelles se concentrent les enjeux ○ Etape 3 : déterminer la valeur des enjeux dans chaque maille de la grille ○ Etape 4 : distinguer les communes selon leur type • Evaluation du risque : <ul style="list-style-type: none"> ○ Carte des enjeux + susceptibilité : avec croisement selon une loi d'endommagement binaire : donne la carte d'exposition au risque ○ Carte des risques : 2 cartes : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Carte synthèse départementale discrétisée selon le type de commune (urbaine, semi-urbaine, rurales) ▪ 3 classements des communes (urbaine, semi-urbaine, rurales) • Méthode scénario départementaux : permet de rendre compte des variations géographiques à l'intérieur d'une même commune. Gère de la même manière les communes avec des données et celles sans, du moment qu'elles ont les mêmes conditions 	
LIMITES	
<ul style="list-style-type: none"> • Pas de résolution suffisante pour échelle départementale pour aléa, • Confiance de diagnostic ne représente pas d'incertitude, • Exposition des enjeux traitée selon une loi binaire donc pas très réaliste, • Inventaire non exhaustive, très peu de détail sur les désordres, • Gestion du qualitatif, Gestion des effets de seuil, • Gestion du croisement des critères, • Gestion de l'incertitude liée au choix de l'expert. 	

Cartographie de la susceptibilité de présence de cavité souterraine à Reims, Bétheny, Bezannes, Cormontreuil et Saint-Léonard (51). Rapport final. BRGM/RP-67746-FR (2018)
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique 1/50 000 • Topographie : IGN, BD alti 5m • Piézomètre : BSS
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Historique et inventaire : carte d'état-major, Cassini, plan de la ville • Typologies des cavités et facteur de prédisposition : <ul style="list-style-type: none"> ○ Susceptibilité de présence de crayère : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Géologie : présence de craie ▪ Profondeur de la nappe ou épaisseur de la ZNS >7.5 ▪ Butte topographique ▪ Facteur aggravant : butte témoin, proximité par rapport à une zone d'approvisionnement historique (s'étend entre 1 et 2km), présence de cavité dans un rayon de 200m ○ Critère pris en compte pour la susceptibilité de présence de cave sur un niveau : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hauteur d'eau de la zone saturée de 2 m minimum ▪ Facteur de prédisposition supplémentaire : extension de la ville (urbain), et contour historique (époque médiévale) ▪ Présence de cave dans un rayon de 100m (zone tampon) ○ Critère pris en compte pour la susceptibilité de présence de cave sur plusieurs niveaux : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Profondeur de la nappe >5m ▪ Facteur de prédisposition : expansion urbaine, contour urbain, présence de cave dans un rayon de 100m (zone tampon) ○ Critère pris en compte pour la susceptibilité de présence d'ouvrage militaire <ul style="list-style-type: none"> ▪ Profondeur d'eau <6m ▪ Présence de tranchée ▪ Présence de cavité dans un rayon de 300m (zone tampon) • Association des diverses cartes • Carte à 1/50 000 avec susceptibilité très forte (violet), forte (rouge), moyenne (orange), faible (jaune) : carte par typologie puis carte générale
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Peu d'information sur les cavités de type ouvrage militaire, • Inventaire non exhaustif, • Niveau fort, dépend moins de l'inventaire, • Zones avec des cavités connues sont identifiées en zone de susceptibilité forte, • Susceptibilité finale ne prend pas en compte le type de cavité.

Carte régionale de l'aléa d'effondrement/glisement lié à la présence de terrains gypseux triasiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur BRGM/RP-60896-FR (2012)
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique à 1/50 000 • Fracturation: carte géologique à 1/50 000, coupe géologique : BSS • Photographies aériennes • Carte hydrogéologique • BD cavité et BD mvt
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Susceptibilité de présence de gypse • Susceptibilité de présence de cavités liée à la dissolution de gypse • Probabilité de présence à la dissolution du gypse : <ul style="list-style-type: none"> ○ Facteur aggravant (précipitation) ○ Rétro analyse par BD cavité ○ Instabilité des voûtes de la cavité formée par dissolution du gypse = facteur permanent (profondeur du toit + prop mécanique et nature du recouvrement) • Susceptibilité d'effondrement dû à des karsts de gypse : facteur aggravant (activité sismique, facteur anthropiques) et rétro analyse par BD mvt • Carte régionale à 1/50 000 : susceptibilité à effondrement (4 niveaux)
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Facteurs déterminants et aggravants choisis par analyse bibliographique, • Fiches techniques des phénomènes incomplets, • Pas de zone de sécurité (zone tampon).

<u>Cartographie de la susceptibilité de présence de cavités karstiques en Région Centre.</u> <u>Rapport final. BRGM/RP-62816-FR (2012)</u>
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique à 1/50 000 • Carte hydrogéologique • Topographie : MNT 50m • BD cavité
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Contexte géologique et hydrogéologique • Inventaire des cavités avec documentation : répartition des données sur la zone d'étude • Facteur de présence de cavité naturelle : critères explicatifs exploitables <ul style="list-style-type: none"> ○ Nature lithologique ○ Profondeur du toit de la formation encaissante ○ Epaisseur de formation ○ Nature lithologique du recouvrement • Evaluation de la susceptibilité de présence de cavités naturelles : combinaison de facteurs favorable et défavorable. <ul style="list-style-type: none"> ○ Chaque facteur de prédisposition donne lieu à l'attribution d'un indice de susceptibilité ○ 2 indices utilisés : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Théorie des évidences : quantifier le niveau de susceptibilité associé à une info d'expert qualitative (nature du substrat) ▪ Logique floue : quantifier la susceptibilité associée au facteur explicatif quantitative • Calcul du poids de chaque critère <ul style="list-style-type: none"> ○ Susceptibilité à la nature de formation : sensibilité à dissolution : 3 classes grâce à la bibliographie et l'expérience : moyenne à forte, moyenne, nulle à faible. Classer toute les couches géologiques. ○ Susceptibilité à la profondeur du toit de la formation : poids entre 0 et 1 mesure le degré de corrélation à la réalisation de l'évènement « présence de cavité » ○ Susceptibilité liée à l'épaisseur de la formation • Susceptibilité globale à la présence de cavité : après avoir défini la fonction de densité associé aux facteurs de présence, évaluer la susceptibilité globale de présence de cavité <ul style="list-style-type: none"> ○ Cartographie de la combinaison des fonctions appartenances ○ Cartographie les fonctions combinées avec les cavités naturelles <ul style="list-style-type: none"> ▪ Niveau de susceptibilité : nul, faible, moyen et fort ▪ Niveau de susceptibilité par commune
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire des cavités non exhaustif, cavité recensée mais caractéristiques peu connues, • Etablir une cartographie de susceptibilité à effondrement des cavités pour avoir des informations plus complètes.

<u>Etude de faisabilité d'une cartographie nationale de susceptibilité de présence de cavités</u>	
<u>Rapport final. BRGM/RP-70461-FR (2021)</u>	
DONNEES DE BASE	
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire : BD cavité • Carte géologique à 1/50 000 • MNT 5m • Topographie : BD topo • Occupation du sol : Corine land cover, Carte de Cassini 	
METHODOLOGIE	
<ul style="list-style-type: none"> • 2 sites tests : Seine-Maritime + Touraine : <ul style="list-style-type: none"> ○ Inventaire : positionne sur la carte géologique harmonisée ○ Poids de susceptibilité : création de carte ○ Etude de la pente avec mnt 5 m ○ Eloignement du réseau hydrographique : <ul style="list-style-type: none"> ▪ BD topo : facteur quantitatif détermine des limites supérieures et inférieures ▪ Calcul du poids d'appartenance ▪ Réalise une carte • Combinaison des facteurs : donne carte de susceptibilité de présence de cavités • Distance aux réseaux paramètres fonctionne bien, pente fonctionne mal, lithologie premier paramètre concluant • Seine Maritime : <ul style="list-style-type: none"> ○ Carte départementale harmonisée à 1/50 000 ○ Cartes géologiques à 1/250 000 et à 1/1 000 000 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Facteur de prédisposition : lithologie (poids de susceptibilité), zone de forêt, occupation du sol ▪ Combine ▪ Carte de susceptibilité de présence de cavités 	
LIMITES	
<ul style="list-style-type: none"> • MNT 5 m pas assez précis pour trouver les pentes de coteaux : MNT 1m non disponible partout, • Facteur explicatif pas toujours identifié : compliqué d'établir une carte de susceptibilité de présence de cavités, • Inventaire des cavités non exhaustif. 	

<u>Etablissement de scénarios de risques mouvement de terrain dans le département du Jura - phase 2</u> <u>BRGM/RP-62519-FR (2013)</u>
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Mnt 25m • Carte géologique à 1/50 000 • Inventaire BD mvt • Topographie : mnt 50m, IGN 1/25 000
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Scénario des risques mouvements de terrain et effondrements karstiques dans une zone pilote de 182 communes • Inventaire • Carte de susceptibilité : <ul style="list-style-type: none"> ○ Plusieurs conditions pour avoir un effondrement karstique <ul style="list-style-type: none"> ▪ Substrat rocheux de nature calcaire ou gypseuse ▪ Terrain de recouvrement présente des aptitudes à l'effondrement ▪ Epaisseur de recouvrement ne doit pas être supérieur à 50m ▪ Présence d'eau ○ Méthodologie mise en place : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Classification selon 3 degrés de sensibilité : fort, moyen, faible ▪ Différentiation des karsts nus, sous couverture meuble d'épaisseur inférieure à 50m ▪ Analyse des paramètres de prédisposition : fracturation, profondeur de la nappe, présence de zone d'endoréisme (doline, zone d'effondrement ancienne) par un mnt au pas de 25 m ▪ Sensibilité à la dissolution : sous recouvrement d'épaisseur supérieur ou égale à 50m : classification de nul à fort ▪ Analyse de la fracturation : zone tampon de 200 m autour des failles principales ▪ Analyse des zones d'endoréismes : regarde les zones supérieures à 25m ▪ Prise en compte de la nappe de profondeur inférieure à 50 ->grille d'analyse statistique, sort 3 situations qui vont correspondre à une susceptibilité modérée (correspondant à une susceptibilité faible à moyenne) ->carte de susceptibilité permet juste le classement des zones à risque dans le département • Carte des enjeux : population, réseaux de transport
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire des cavités non exhaustif, • Mnt pas assez précis.

<u>Caractérisation et cartographie de l'aléa mouvement de terrain lié aux cavités et coteaux sur Lavenay, Poncé-sur-le-Loir et Ruillé-sur-Loir (Sarthe). Rapport final BRGM/RP-62668-FR (2013) + Compléments à l'étude d'aléa mouvement de terrain sur Lavenay. BRGM/RP-65222-FR (2014)</u>
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Contexte géographique + fond ortho photo : Scan IGN 1 000 et 5 000 • Carte géologique à 1/50 000 • Inventaire : CETE • Mnt 25m
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Contexte géographique, géomorphologique, historique, géologique • Collecte des données existantes : inventaires par atlas du CETE, inventaire départemental des cavités souterraines et mouvements de terrain + enquête de terrain • Création de carte informative sur fond orthophoto de IGN à 1/5 000 montrant les divers phénomènes avec une cartographie des pentes avec MNT au 25m • Aléas : dépend de la probabilité d'occurrence = niveau de prédisposition (peu sensible à sensible), intensité (limitée à élevée). ->croisements des 2 propriétés donnent les niveaux d'aléas • Susceptibilité aux effondrements et affaissements : dépend de la présence des cavités et la possibilité qu'elle s'effondre. <ul style="list-style-type: none"> ○ Adaptation de la méthodologie car impossible de séparer totalement les variables, la précision est différente selon échelle travaillée. Distinction de certitude et quasi-certitude et estimation de la présence de cavité <ul style="list-style-type: none"> ▪ Certitude : visible sur le terrain : pour les cavités les critères retenus : géologie (épaisseur des couches), fracturation au travers des failles (tampon de 100 à 500m), intercalation de niveau perméable et imperméable ▪ Quasi-certitude : présence supposée ex : karst : répartition des effondrements selon altitude, selon lithologie, influence des fractures ▪ Estimation : non visible sur le terrain (ex : marnière) ▪ Regarde l'homogénéité de la susceptibilité ▪ Zone de susceptibilité après reprise du rapport se base sur des critères objectifs ->zone de susceptibilité = zone de danger avéré= aléa • Intensité des phénomènes : Par croisement donne les aléas à 1/5 000
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'utilisation de carte hydrogéologique (n'existe pas à l'échelle) seulement quelques informations sur des forages, • MNT pas assez précis, • Précision des cavités recensées : incertitude inférieure à 10 m proche des routes, arbres, limite parcellaire, • Taille des zones tampon choisie parmi les valeurs utilisées dans d'autres rapports. • Carte informative comporte que les effondrements localisés

<p><u>Bassin versant de la Roya (Alpes-Maritimes). Cartographie de l'aléa mouvement de terrain, échelle 1/50000. IV Contrat de Plan Etat Région Risques naturels et nuisances- Action : données, information, évaluation sur les risques naturels.</u> <u>BRGM/RP-51791-FR (2002)</u></p>
<p>DONNEES DE BASE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Carte topographie à 1/25 000 • Carte géologique à 1/50 000 • Mnt 50m • Hydrologie : modèle de drainage
<p>METHODOLOGIE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Cadre géographique • Données de base : Carte topographique, carte géologique, Mnt 50m + carte des pentes, modèle de drainage, carte informative, photographie aérienne et orthophoto • Inventaire des phénomènes • Principe de l'élaboration des cartes d'aléa mouvement de terrain : <ul style="list-style-type: none"> ○ Facteurs déterminants : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Permanent : nature du sol, discontinuité, pente, altération, végétation ▪ Déclenchant : ruissellement, niveau d'eau dans les nappes, actions anthropiques ▪ Echelle à 1/50 000 : qualitative ▪ Carte d'aléa par mouvement de terrain = carte de susceptibilité aux phénomènes • Cartographie des affaissements et effondrements : <ul style="list-style-type: none"> • Typologie, connaissance géologique, interprétation d'unité lithologique ->attribuer une valeur de susceptibilité allant de 0 à 3 • Vérification de l'interprétation sur le terrain • Synthèse des 2 donne la carte de l'aléa aux effondrements et affaissements • Aléa variant de très élevé à nul =carte de susceptibilité aux phénomènes à 1/50 000 2nd partie : carte en fonction des risques encourus (enjeux)
<p>LIMITES</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Estimation qualitative, • Carte à 1/25000 pour les zones à risque élevé, • Carte informative comporte que les effondrements localisés.

<u>Cartographie de l'aléa mouvement de terrain du département de l'Aude - Echelle 1/50 000.</u> <u>BRGM/RP-60688-FR (2011)</u>
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Géomorphologie à échelle du département : IGN 1/25000 • Carte géologique à 1/1 000 000 • Inventaire : carte géologique harmonisée à 1/50 000, photos aériennes, BD cavité • Donnée climatique : pluviométrie • Mnt 25 m
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie de l'aléa mouvement de terrain à 1/50 000 : affaissement et effondrement de cavité souterraine hors mine • Contexte géographique, géomorphologique, climatique, carte géologique • Aléa mouvement de terrain : approche expertise + approche statistique/probabiliste • Carte d'aléa effondrement réalisée à 1/125 000 et à 1/50 000 : <ul style="list-style-type: none"> ○ Distinction des couches géologiques comportant des cavités ○ Susceptibilité ○ Aléa • Carte réalisée avec la méthode probabiliste dépend de l'analyse des événements historiques, permet de définir une hiérarchisation des facteurs de prédisposition et aussi d'expertise : <ul style="list-style-type: none"> ○ Inventaire : carte géologique harmonisée, Bd Cavité, carte morphologique ○ Typologie et nature des phénomènes ○ Facteurs d'instabilité : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Permanent (de prédisposition) : pesanteur, eau, lithologie, structure des terrains, cavité souterraine, morphologie, couvert végétal ▪ Déclenchant : température, précipitation, séisme, action humaine ○ Intensité des phénomènes : faible, moyenne, forte, majeure ○ Cartographie effondrement/affaissement <ul style="list-style-type: none"> ▪ Occurrence des mouvements selon les années ▪ Intensité des phénomènes ▪ Lithologie + probabilité relative • Cartographie de la susceptibilité par phénomène : <ul style="list-style-type: none"> ○ Géologie, morphologie et occupation du sol ○ Présence de cavité effondrement et affaissement • Cartographie de l'aléa par phénomène : combinaison des paramètres de déclenchement avec la carte de susceptibilité à 1/50 000 • Choix des enjeux : territoire communal + zone urbaine construite (à 1/50 000) • Carte des risques : <ul style="list-style-type: none"> ○ Absolu : pour chaque enjeu la somme des surfaces pondérées par exposition ○ Relative : niveau de l'enjeu considéré comme taux d'exposition
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • La prise en compte des facteurs déclenchants est délicate à cette échelle, • Inventaire des cavités non exhaustive.

<u>Cartographie de l'aléa affaissement sur la commune d'Hilsprich (Moselle).</u> <u>Rapport final. BRGM/RP-62744-FR (2013)</u>
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique à 1/1 000 000 + carte structurale • Hydrogéologie : localisation des nappes + forage : mesure géophysique • Topographie : IGN
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique, forage (pour observer la nappe d'eau) • Estimation de l'intensité : PPR <ul style="list-style-type: none"> ○ Selon pente : très limitée, limitée, modérée, élevée ○ Selon variation de longueur de la structure du bâti : importance du dommage ○ Caractérisation de l'intensité : cartographie de la susceptibilité d'apparition d'un affaissement va conditionner les classes d'aléas car les intensités du phénomène seront toujours élevées dans le cas d'apparition • Probabilité d'apparition de nouveaux affaissements : dépend de la localisation des nappes et du niveau de salinité • Cartographie des zones d'aléa : très fort, fort, moyen, faible : fonction de la susceptibilité de dissolution du sel • Mesures mise en place : <ul style="list-style-type: none"> ○ Aléa très fort et fort : pas de construction possible car risque d'augmenter la vulnérabilité de l'enjeu ○ Aléa moyen et faible : pas augmenter la vulnérabilité de l'enjeu ○ Aléa faible : aucune prescription n'est applicable • Cartographie de l'aléa à l'échelle communale
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Carte d'aléa peut changer en fonction de l'état d'avancement des futurs travaux de reconnaissance, • Nouvelles investigations, • Carte informative comporte que les effondrements localisés.

Cartographie de la prédisposition aux mouvements de terrain du département du Tarn.	
Rapport final. BRGM/RP-55259-FR (2006)	
DONNEES DE BASE	
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique à 1/50 000 • Morphologie : Mnt 50m, BD alti (1/50 000) • Fracturation : carte géologique à 1/1 000 000 • Occupation du sol : BD carto • Précipitation 	
METHODOLOGIE	
<ul style="list-style-type: none"> • Carte basée sur : <ul style="list-style-type: none"> ○ Facteur de susceptibilité aux mouvements : lithologie, morphologie (pente), densité de fracturation. Ne prend pas en compte l'épaisseur des formations superficielles car mal connue (pris en compte à une échelle plus grande) ○ Facteur déclenchant : pluie, occupation du sol ○ Combinaison des 2 cartes de prédisposition • Typologie des phénomènes + inventaire réalisé par le BRGM • Méthodologie de l'expertise • Regarde les facteurs de susceptibilité (permanent) et de déclenchement <ul style="list-style-type: none"> ○ Permanent : lithologie (carte géologique), morphologie et fracturation ○ Aggravant : précipitation (quantité moyenne des précipitations sur 30 ans et leur intensité) et occupation du sol • Combinaison des facteurs : <ul style="list-style-type: none"> ○ Seuillage des facteurs : réaliser 2 à 4 classes ○ Combinaison des facteurs : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Lithologie + pente = facteur intermédiaire ▪ Facteur intermédiaire + fracturation = susceptibilité ->Tableau de combinaison des facteurs • Carte de susceptibilité : <ul style="list-style-type: none"> ○ Lithologie ○ Pente (mnt) effondrement : <ul style="list-style-type: none"> ▪ 0 à 5° fort ▪ 5 à 10 moyenne ▪ 10 à 35 faible à nulle ▪ >35 moyenne ○ Topographie ○ Fracturation : zone tampon de 500m <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dans le rayon : moyen à fort ▪ Dehors : faible à nulle ○ Précipitation : <ul style="list-style-type: none"> ▪ 600/800 mm/an : précipitation faible ▪ 800 : 1200 : moyenne ▪ 1 200 : 1 800 : forte ▪ 75 à 100 mm/24h : Intensité faible ▪ 100 :200 moyenne ▪ >200 : forte • Elaboration de carte de susceptibilité : lithologie, topographie (pente), fracturation • Carte de prédisposition au mouvement de terrain à 1/125 000 : nul à très faible, faible, moyen et fort 	
LIMITES	
<ul style="list-style-type: none"> • Adaptation des données aux différentes échelles, • Paramètre géotechnique variable, • Utilisation de différents logiciels. 	

<p>IVème Contrat de Plan Etat Région "Risques naturels et nuisances Action : Données, information, évaluation sur les risques naturels". Cartographie des mouvements de terrain dans la vallée du Bas Buëch - Laragnais - Hautes-Alpes (05). [Rapport] : Phase 1. BRGM/RP-55184-FR (2007)</p>
<p>DONNEES DE BASE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Administratif et topographie : BD cartho, Bd alti, mnt 50m, IGN 25 • Carte géologique à 1/50 000 • Hydrologie : BD Carthage, BSS • Carte lithologie à 1/1 000 000 • Inventaire BD mvt
<p>METHODOLOGIE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie de l'aléa mouvement de terrain à 1/50 000 • Type de mouvement : effondrement de cavités souterraines et affaissements <ul style="list-style-type: none"> ○ Facteur de prédisposition : création de vide, dissolution des matériaux solubles ○ Inventaire ○ Données : administratif, géologique, hydrographique, topographique, lithologie ○ Aléa : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cartographie de la région concernant aléa mouvement de terrain à 1/1 000 000 ▪ Cartographie de l'aléa mouvement de terrain réglementaire sur la commune à 1/5 000 et à 1/1 000 ▪ Cartographie sur support issue d'un atlas des mouvements de terrain sur le département à 1/50 000 ▪ Cartographie issue de données du RTM • Enjeux : milieu vivant, milieu construit • Principe de la carte d'aléa <ul style="list-style-type: none"> ○ Facteurs déterminants permanents : nature du sol, discontinuité » pente, état d'altération, couvert végétal ○ Facteurs déterminants déclenchants : ruissellement, niveau d'eau dans la nappe, action anthropique ○ Echelle à 1/50 000 estimation qualitative réductrice par rapport au PPR ou carte à 1/10 000 et 1/5 000) ○ Méthodologie : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Carte litho-stratigraphique harmonisée + inventaire + typologie : critère de sensibilité, sensibilité au mouvement de terrain (3 niveaux) + nombre d'évènement + analyse par phénomène du nombre d'intensité forte et moyenne, susceptibilité (4 niveaux) + aléa mouvement de terrain : basée sur le croisement de donnée ▪ Carte litho-stratigraphique harmonisée (1/50 000) plus important • Cartographie effondrement / affaissement <ul style="list-style-type: none"> ○ Sensibilité aux effondrements va de 1 à 6, représentée en 3 classes : <ul style="list-style-type: none"> ▪ 0 à 1 :1 ▪ 2 à 3 :2 ▪ 4 à 6 : 3 • Susceptibilité effondrement • Carte d'aléas • Deuxième phase : réalisation d'une carte à 1/25 000 pour être plus précis : supposer les enjeux pour faire une carte multi risque • Carte est utilisée pour : l'aide à la décision, sensibilisation et information à échelle régionale
<p>LIMITES</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Première partie de l'étude, nécessite une suite détaillée sur certains secteurs avec un aléa élevé et des forts enjeux, • Seulement une aide à la décision, • Inventaire des cavités non exhaustif, • Mnt pas assez précis.

<p><u>Ive contrat de plan Etat-Région "Risques naturels et nuisances - Action : Données information, évaluation sur les risques naturels".</u> <u>Cartographie régionale de l'aléa mouvements de terrain à l'échelle du 1/100 000. Année 1 : Etude de la Provence calcaire et rhodanienne.</u> <u>Rapport final. BRGM/RP-55710-FR (2007)</u></p>
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire : BD mvt, BD cavité, divers services • Carte géologique à 1/50 000 • Topographie : pente : BD atli, mnt 50m • Hydrologie : drainage : BD Carthage • Cavité exploité : BD carol
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie aléa mouvement de terrain à 1/100 000 pour avoir une cartographie régionale homogène de la susceptibilité du territoire au mvt de terrain. Carte à 1/25 000 pour les zones les plus sensibles. • Typologie des mouvements recensés (inventaire) : • Données utilisées : carte géologique, pente, drainage, digitalisation de barre rocheuse • Cartographie d'aléa mouvement de terrain effondrement/ affaissement <ul style="list-style-type: none"> ○ Formation lithologique comportant des cavités naturelles ○ Identification des formations susceptibles d'être exploitées en carrière souterraine ○ Carte des zones potentiellement exposées aux phénomènes effondrements et affaissements à 1/100 000 • Cartographie de synthèse regroupant tous les phénomènes mouvement de terrain à 1/100 000 • Prend en compte la vulnérabilité avec surface exposée, réseaux de transport • Avantage : fournit une aide à la décision pour programme de cartographie préventive • Peut faire une étude qualitative et quantitative : enjeux permettraient d'affiner la vulnérabilité et donc hiérarchiser le niveau de risque • Quantification de l'aléa : statistique
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Mnt pas assez précis, • Utilisation d'un aléa binaire, • Seulement pour l'aide à la décision, • Hiérarchiser plus précisément le niveau de risque.

<p><u>IVe contrat de plan état-région "Risques naturels et nuisances - Action : données, information, évaluation sur les risques naturels".</u> <u>Cartographie régionale de l'aléa mouvements de terrain au 1/100 000. Année 1 : Etude de la Provence calcaire et rhodanienne.</u> <u>Rapport de synthèse. BRGM/RP-56042-FR (2007)</u></p>
<p>DONNEES DE BASE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Topographie : BD alti, mnt 50m • Carte géologique à 1/250 000 • Inventaire : mouvements de terrain, rapports
<p>METHODOLOGIE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie de l'aléa à 1/100 000 : carte de susceptibilité aux mouvements de terrain • Cadre général : géologique • Typologie des mouvements de terrain recensés • Carte aléa de mouvement de terrain à 1/100 000 : qualitative <ul style="list-style-type: none"> ○ Facteurs déterminants permanent : nature géologique, pente et occupation du sol ○ Facteurs déclenchants • Création de la carte : <ul style="list-style-type: none"> ○ Formation lithologique comportant des cavités naturelles ○ Identification des formations susceptibles d'être exploitées en carrière souterraine ○ Carte des zones potentiellement exposées aux phénomènes effondrements et affaissements à 1/100 000 • Carte de synthèse avec tous les mouvements de terrain • Echelle à 1/100000, zone potentiellement exposée aux phénomènes (carte de susceptibilité aux mouvements de terrain) assimilée à des zones d'aléas.
<p>LIMITES</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire des cavités non exhaustif, • Aléa qualitatif, • Echelle très grande, joue un rôle sur la prise en compte des facteurs déterminants. • Pas d'estimation de l'intensité et de fréquence des phénomènes, • Aléa binaire.

<p>Vème Contrat de projet Etat-Région "Optimiser la gestion des ressources naturelles, prévenir et gérer les risques - Mesure : Améliorer la connaissance des risques " Cartographie régionale de l'aléa mouvements de terrain au 1/100 000.</p> <p>Synthèse. BRGM/RP-59584-FR (2011)</p>
<p>DONNEES DE BASE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Topographie : BD alti, IGN 2 000 • Carte géologique à 1/1 000 000 • Inventaire : BD cavité, BR carol, rapports
<p>METHODOLOGIE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie régionale de l'aléa mouvement de terrain à 1/100 000 et carte à 1/25000 pour zones plus sensible : carte de susceptibilité aux mouvements de terrain • Approche expertise : sur les facteurs permanents de prédisposition comme nature géologique et morphologique. Ne peut pas prendre en compte facteur de déclenchement et d'aggravation. Carte de susceptibilité. • Facteurs d'instabilité : <ul style="list-style-type: none"> ○ Facteur permanent : pesantur, eau, lithologie, structure des terrains, cavité souterraine, morphologie, couvert végétal ○ Facteur déclenchant : température, précipitation, neige, séisme, action humaine • Démarche retenue : <ul style="list-style-type: none"> ○ Facteurs déterminants : géologie (lithologie et stratigraphie), morphologie (pente, occupation du sol), présence de cavité (aléa effondrement/affaissement) ○ Ne peut pas estimer l'intensité et la fréquence des phénomènes à cette échelle • Cartographie de l'aléa effondrement à 1/100 000 : susceptibilité de présence de cavité naturelle <ul style="list-style-type: none"> ○ Identification des formations susceptibles de renfermer des cavités naturelles + zone tampon ○ Identification des formations susceptibles d'être exploitées en carrière souterraine ○ Carte d'aléa • Croisement entre aléas et enjeux par grandes entités
<p>LIMITES</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Aléa binaire : zone potentiellement exposée à l'aléa mouvement de terrain et zone de susceptibilité aux mouvements de terrain : faible à nulle. Carte très large. • Etudier les zones avec des enjeux plus fort, • Inventaire des cavités non exhaustif.

<p>Vème Contrat de projet Etat-Région "Optimiser la gestion des ressources naturelles, prévenir et gérer les risques - Mesure : Améliorer la connaissance des risques" Cartographie régionale de l'aléa mouvements de terrain au 1/100 000 - Année 3 : Etude de la Provence cristalline.</p> <p>BRGM/RP-59163-FR (2011)</p>
<p>DONNEES DE BASE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Topographie : BD alti, IGN 2 000 • Géomorphologie : Mnt 50m, Scan 25 IGN • Carte géologique à 1/50 000 • Inventaire : BD cavité, BD carol • Occupation du sol : Corine Land Cover
<p>METHODOLOGIE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Ve contrat de projet état région : cartographie régionale de l'aléa mouvement de terrain à 1/100 000 • Cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain appréhendée à partir de facteurs permanents de prédisposition (nature géologique et morphologique) • Facteurs déterminants : <ul style="list-style-type: none"> ○ Géologie et morphologie ○ Présence ou non de cavités souterraines • Carte d'aléa : <ul style="list-style-type: none"> ○ Identification susceptible de refermer des cavités naturelles ○ Identifier les formations susceptibles d'être exploitées ○ Réalisation de la carte d'aléa ○ Comparaison des résultats avec la carte de vitesse linéaire des mouvements verticaux du sol par interférométrie radar différentielle
<p>LIMITES</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire des cavités non exhaustif, • Aléa binaire, • Poursuivre les analyses sur les zones avec un fort aléa pour mieux le quantifier → réaliser une approche déterministe.

<u>Cartographie régionale de l'aléa mouvement de terrain au 1/100 000 – Année 2 : Etude de la zone alpine.</u>	
<u>Rapport final. BRGM/RP-56762-FR (2009)</u>	
DONNEES DE BASE	
<ul style="list-style-type: none"> • Topographie : BD alti, mnt 50m, Scan 25 IGN • Carte géologique à 1/50 000 • Inventaire : BD cavité, BD carol • Occupation du sol : Corine Land Cover • Hydrographie : BD Carthage 	
METHODOLOGIE	
<ul style="list-style-type: none"> • IV contrat de plan état région : cartographie de l'aléa mouvement de terrain à 1/100 000 et à 1/25 000 pour les zones plus sensibles • Document de hiérarchisation, d'information et de sensibilisation sur les risques mouvements de terrain • Cadre géologique et géographique • Typologie et nature • Inventaire des démarches méthodologiques • Méthode <ul style="list-style-type: none"> ○ Géologie, morphologie (pente, barre rocheuse, drainage), occupation du sol, précipitation ○ Facteurs d'instabilité <ul style="list-style-type: none"> ▪ Permanents : pesanteur, eau, lithologie, structure des terrains, présence de cavités souterraines, morphologie, couvert végétal ▪ Variable (déclenchement) : précipitation, neige, température, séisme, action humaine • Démarche retenue : pour la carte à 1/100 000 <ul style="list-style-type: none"> ○ Géologie (lithologie et stratigraphie) ○ Morphologie (pente, occupation du sol, zone rocheuse) ○ Présence ou non de cavité souterraine -> ne peut pas estimer l'intensité et fréquence des phénomènes avec cette méthode ->carte de susceptibilité aux mouvements de terrain et non aléas • Cartographie de l'aléa mouvement de terrain <ul style="list-style-type: none"> ○ Identification des formations susceptibles de renfermer des cavités naturelles <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mise en place d'une zone tampon entre 100 et 500m ○ Identification des formations exploitables en souterrain ○ Valorisation de la carte d'aléa réalisée lors d'une autre étude • Réalisation de carte d'effondrement/affaissement 	
LIMITES	
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire des cavités non exhaustif, • Mnt pas assez précis, • Poursuivre les analyses sur les zones avec fort aléa pour mieux le quantifier → réaliser une approche déterministe. 	

Réflexions méthodologiques pour une meilleure évaluation de l'aléa mouvements de terrain d'origine karstique.
Rapport final. BRGM/RP-66508-FR (2016)
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire : BD cavité • Carte géologique à 1/50 000 • Mnt • Hydrologie : BSS
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation de l'aléa : méthodologie basée principalement sur la probabilité de présence des effondrements karstiques. Elle ne prend pas en compte l'intensité des phénomènes associés. Cependant l'approche réglementaire consiste au croisement entre la probabilité d'un événement à se produire et son intensité • <u>Méthode pour les PPR</u> : seulement le croisement entre la susceptibilité et l'intensité pour déterminer le niveau de l'aléa. • En lien avec les cavités souterraines abandonnées. • Guide s'intéresse aux cavités souterraines abandonnées d'origine anthropique mais valable aussi pour les cavités naturelles. <ul style="list-style-type: none"> ○ Qualifier la probabilité d'occurrence = croisement entre la prédisposition à la rupture et la présomption de présence de vides → matrice de probabilité d'occurrence comprise entre forte et faible <ul style="list-style-type: none"> ▪ Prédisposition à la rupture : étude sur long terme (100 prochaines années) sur les événements passés + examen géotechnique des cavités si possible. Suffisant si les cavités sont connues. ▪ Si manque d'information, présomption de présence de vide : classement en fonction de critère historique ou technique qu'on peut classer en fonction de la présence de vide → pondérer la prédisposition d'un site par une notion de présomption intégrant les lacunes d'informations ○ Qualification de l'intensité : pour hiérarchiser les conséquences : identifier la grandeur physique la plus représentative puis la valeur prévisible puis la classe d'intensité correspondante : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pour les affaissements, regarde les pentes : création de 4 classes ; ▪ Pour les effondrements, regarde le diamètre de l'effondrement : création de 4 classes ; ▪ Effondrement de masse : 1 classe : pas de seuil proposé. ○ Déterminer les classes d'aléa et cartographie de l'aléa : croisement entre probabilité d'occurrence et intensité. Obtenir à la fin 3 ou 4 niveaux d'aléa : faible, moyen, fort, très fort. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pour les affaissements, effondrement et effondrement de masse correspond à ce tableau. • <u>Approche spécifique au karst en Afrique du Sud</u> : risque défini par un croisement triple : probabilité d'occurrence, intensité et enjeux → arbre décisionnel utilisable directement pour l'aménagement du territoire + des recommandations. Concerne 1 seul environnement karstique (sous couverture) et 2 phénomènes : fontis généré par l'effondrement d'une cavité créée dans la couverture ou par l'effondrement d'une cavité créée dans la dolomie, enfin par les dolines de soutirage générées par soutirage / suffosion des matériaux non cohésifs de la couverture. <ul style="list-style-type: none"> ○ Intensité défini par un diamètre dépendant de la profondeur des cavités et d'angle de frottement interne des matériaux de la couverture • <u>Méthode du BRGM</u>: approche multicritère selon 2 étapes : délimiter les typologies de karst et cartographier au sein de chaque typologie les critères explicatifs de la présence de désordres : <ul style="list-style-type: none"> ○ Distance aux failles/fractures, cours d'eau, occupation du sol ○ Pente ○ Typologie de la couverture → Carte de susceptibilité, peut réaliser la carte d'aléa (diamètre d'effondrement attendu : mise en pente de terrain attendu dans le cas d'affaissement) si phénomène bien décrit. En général, croisement uniquement, carte de susceptibilité et carte d'intensité pour avoir carte des aléas. ○ Méthode pragmatique et opérationnelle : cartographie au 50 000ème, ou plus fine, MNT 25 ou 30m, BD national Carthage (cours d'eau), Corine land Cover + donnée du sous-sol (BSS) pour préciser contexte hydrogéologique et BD cavité et BD MVT. Applicable aux différents contextes géologiques. <ul style="list-style-type: none"> ○ Avantage : pas forcément besoin d'avoir un inventaire exhaustif des cavités + testé avec succès dans 4 sites différents • <u>Méthode du Cerema</u> : plusieurs méthodes élaborées au cas par cas : cartographie des aléas dans le cadre d'un PPR, d'atlas départementaux, et inventaire d'événement associé ou non au diagnostic. • Probabilité d'occurrence : utilise notion de probabilité d'apparition déterminée à l'aide du nombre d'évènement ou en tenant compte de l'épaisseur de la couverture et exposition à la concentration des écoulements superficiels • Grille de caractérisation prenant en compte différent critère pour un contexte calcaire : détermination de 4 niveaux de susceptibilité. • Contexte de karst nu : prédisposition géologique (densité d'indice karstique par étage géologique) et karstique (géomorphologie du karst). <ul style="list-style-type: none"> ○ 5 classes de probabilité (affaissement et effondrement) à partir de contexte géologique, hydrogéologique et historique • Aléa mouvement de terrain d'origine karstique = PPR carte à 1/10000 et/ou à 1/5000 • Carte informative : <ul style="list-style-type: none"> ○ BD national (géorisque, BSS), carte géologique à 1/50000, mnt, donnée bibliographique, enquête de terrain pour avoir une analyse de donnée qualitative. Précise grands ensembles : hydrogéomorphologique, degré de karstification selon les formations, lithologie de la formation karstifiée, perméabilité des sols/roches, position de la nappe par rapport au niveau de base ○ Trouver des sites tests • Cartographie de la probabilité d'occurrence par approche multicritère : basé sur des critères explicatifs de l'occurrence de désordres propre à chaque type de karst • Caractérisation de l'intensité des désordres <ul style="list-style-type: none"> ○ Effondrements : profondeur (diamètre), Cerema (assez d'information pour avoir une analyse statistique = nombre d'évènement > 50) ○ Affaissements : informations sur quelques cas <ul style="list-style-type: none"> ▪ Classe d'intensité proposée dans la littérature + grille d'évaluation de l'intensité • Réalisation de la carte d'aléa par le croisement de la probabilité d'occurrence avec l'intensité <ul style="list-style-type: none"> ○ Une carte par processus (effondrement de toit, soutirage, débouillage), regroupement pour avoir 2 cartes : carte d'affaissement et carte d'effondrement. ○ Fusion des cartes : classe pour chaque condition ○ Aléa le plus fort est conservé
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Première partie de l'étude, nécessite une suite détaillée sur certains secteurs avec un aléa élevé et des forts enjeux, • Seulement une aide à la décision, • Inventaire des cavités non exhaustif, • Mnt pas assez précis.

<p><u>Cartographie à 1/1000000 de l'aléa aux mouvements de terrain de la région PACA (Provence - Alpes - Côte d'Azur).</u> <u>BRGM/RR-40702-FR (1999)</u></p>
<p>DONNEES DE BASE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire : BD mvt • Pente : Mnt 50m • Carte lithostratigraphique à 1/1 000 000 d'après carte géologique à 1/50 000
<p>METHODOLOGIE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Répertoire les mouvements grâce à la base nationale des mouvements de terrain: mouvements effondrements • Carte des pentes réalisée à partir du mnt 50m • Carte des unités lithostratigraphiques d'après la carte géologique • Carte de localisation des mouvements de terrain • Méthode utilisée pour la cartographie <ul style="list-style-type: none"> ○ Facteur pente : ne constitue pas un facteur déterminant pour un effondrement ○ Susceptibilité aux mouvements de terrain fonction de la lithologie : 3 niveaux : <ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 faible : bleu ▪ 2 moyen : jaune ▪ 3 fort : rouge ->pente et lithologie car les seules données accessibles à cette échelle • Carte d'aléa des effondrements seulement en fonction de la lithologie et non de la pente à échelle du 1/1 000 000 : uniquement sur estimation de la susceptibilité des terrains en fonction de leurs faciès, des phénomènes historiques et de la géologie • Aléa représenté sur la carte avec des figurés différents car association avec les mouvements de terrain du type glissements
<p>LIMITES</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie de synthèse à 1/1 000 000 échelle très large, • Estimation de la susceptibilité aux mouvements effondrements uniquement sur les connaissances et la carte géologique, • Pour une carte plus précise prendre en compte d'autres facteurs déterminants.

Mouvements de terrain dans le département de la Moselle - Identification des bassins de risques. BRGM/RP-51515-FR (2002)
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Carte géologique à 1/50 000 • Mnt 50m • Inventaire : BD mvt • Fond topographique : Scan 100 IGN
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Mise en place d'un PPR : analyse globale du risque mouvement de terrain à échelle du département pour l'identification d'unité homogène • 2 ans : première étape pour faire l'inventaire et la reconnaissance de la lithologie et seconde étape analyse des données • Carte des aléas aux mouvements de terrain à 1/150 000 • Expression des aléas : <ul style="list-style-type: none"> ○ Géologie régionale à 1/50 000 ○ Typologie des phénomènes : effondrement <ul style="list-style-type: none"> ▪ Typologie ▪ Description + localisation ○ Lithologie : carte du département <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pour affaissement : présence d'élément soluble (gypse) ○ Mnt à 50 m = calcul des pentes ○ Morphologie du département ○ Facteurs aggravants <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pente ▪ Réseau hydrographique ▪ Facteur minorant : terrains solubles ○ Principe et méthode de cartographie <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cartographie des zones favorables : <ul style="list-style-type: none"> • Apparition de glissement en fonction de la pente et de la lithologie • Affaissement et effondrement en fonction de la lithologie ○ Présentation de la carte : sur fond topographique SCAN 100 de IGN <ul style="list-style-type: none"> ▪ Affaissement représenté en vert et fontis en vert aussi ▪ Facteur aggravant en hachuré noir : superposé au zonage de la susceptibilité aux glissements de terrain (combinaison des versants et pendages) • Identification des bassins de risque de mouvement de terrain par le croisement de données par avis d'expert <ul style="list-style-type: none"> ○ Croisement des données permet de faire un zonage territorial hiérarchisé <ul style="list-style-type: none"> ▪ Combine avec les principaux enjeux : population, zone urbanisée, réseaux de communication ○ Bassin de risque = mettre en évidence à l'échelle du département des entités cohérentes qui regroupent une hiérarchisation des aléas mouvements de terrain et enjeux <ul style="list-style-type: none"> ▪ Somme des aléas entre 1 et 3 hors affaissement de grande longueur d'onde ▪ Somme des enjeux de 1 à 6 ▪ Croisement des 2 facteurs donne une gamme de 0 à 18 : <ul style="list-style-type: none"> • « Très fort » pour des valeurs supérieures à 7,5 ; • « Fort » entre 5 et 7,5 ; • « Moyen » entre 2,5 et 5 ; • « Faible » entre 0 et 2,5. • Carte de zones sensibles aux aléas naturels à 1/150 000
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Liste des cavités non exhaustive, • Toutes les formations superficielles ne sont pas retenues car ne sont pas pertinentes à 1/150 000, • Limite de validité de la cartographie et incertitudes : Zone tampon de 50m autour des affaissements : là où il y a une forte dissolution = horizon de protection. L'épaisseur est arbitraire et incertaine localement surtout dans les zones comportant de l'eau.

Commune de Cournon (63), Connaissance de l'aléa "effondrement de cavités souterraines" et " mouvement de terrain" : Phase 1. Rapport final. BRGM/RP-54763-FR (2006)
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire : BD mvt, archives, rapports, bibliographies, photos aériennes • Carte géologique à 1/50 000
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Cadre d'un PPR mouvement de terrain : connaissance d'aléa effondrement de cavités souterraines • Reprend le zonage du PER • Présence d'anciennes cavités : inventaire avec base de données et bibliographie, archive et historique, photo aérienne, la géologie (1/50 000) • Carte d'indice de présence de cavités souterraines à 1/7 500 • Définition et zonage de l'aléa : ni à l'échelle de la cavité ni à celle de la parcelle ; échelle à 1/7 500 <ul style="list-style-type: none"> ○ Combinaison d'indice : géologie, mode d'exploitation, indice physique, indice documentaire ○ 4 classes d'aléas : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fort (concerne une très faible superficie 0.01 km²), ▪ Moyen (superficie 0.63 km²), ▪ Faible (superficie 1.78 km²), ▪ Très faible à nulle.
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Approfondir les études pour ne plus avoir que des données bibliographiques : <ul style="list-style-type: none"> ○ avec une campagne géophysique (microgravimétrie= anomalie du champ gravitationnel du au déficit de masse dans l'écorce terrestre ; spectral analysis of surface waves), ○ Réaliser la méthode dans des zones tests pour les catégories d'aléa faible à nulle : matérialiser l'aléa cavités, • Cartographie à 1/7 500 petite échelle (communale).

Cartographie de l'aléa mouvement de terrain du département des Pyrénées-Orientales - Echelle 1/50 000
BRGM/RP-62991-FR (2013)
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Géologique à 1/1 000 000 et à 1/50 000 • Morphologie : mnt 50m + fond topo IGN 1/25 000 • Climatologie : répartition des pluies : Météo-France
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Géologie, morphologique, climatologie, regarde une carte existante des aléas (cartographie régionale de la susceptibilité aux mouvements de terrain à 1/250000 par le BRGM) • Classification des mouvements de terrain= typologie • Facteur d'instabilité : <ul style="list-style-type: none"> ○ Facteurs permanents de prédisposition : Pesanteur, eau, lithologie et agencement des matériaux, structure des terrains, présence de cavités souterraines, morphologie des terrains, couvert végétal ○ Facteurs de déclenchement : Précipitations, température, séisme, action humaine • Intensité des phénomènes : • Aléas : apparition des phénomènes, intensité, contexte géomorphologique, facteurs de déclenchement • Cartes : <ul style="list-style-type: none"> ○ Inventaire complémentaire des mouvements de terrain, cartographie d'aléas par phénomènes ○ Carte des aléas mouvements de terrain n'est pas réalisée : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Occurrence des mouvements de terrain ▪ Intensité des phénomènes : répartition selon le diamètre d'affaissement • Effondrement et affaissement : <ul style="list-style-type: none"> ○ Bilan du recensement des cavités ○ Litho-stratigraphie concernée ○ Probabilité relative d'effondrement : décomposer la probabilité d'effondrement par la formation identifiée. Ici, calcul de la densité moyenne des mouvements répertoriés et leur localisation par rapport à la distance de faille : donne une carte à 1/50 000 • Risques : <ul style="list-style-type: none"> ○ Choix des enjeux : occupation du sol : zone urbaine, réseaux routier, espace vert, zone industrielle ○ Hiérarchisation du risque : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Risque absolu : à exposition égale d'un enjeu « important » en emprise présente une valeur absolue du risque plus importante qu'un enjeu réduit. Niveau d'exposition ▪ Risque relatif : destiné à mettre en évidence les enjeux pour lesquels le niveau de risque est le plus élevé. Taux d'exposition. • Carte par phénomène au 1/50 000ème des risques absolus et relatifs <ul style="list-style-type: none"> ➔ Méthode de cartographie des aléas en fonction du type de phénomène considéré : 3 approches différentes avec des bases communes : <ul style="list-style-type: none"> ○ Inventaire complémentaire des mouvements de terrain ○ Cartographie des aléas par phénomènes ➔ Approche variée : Semi-probabiliste, Statistique, Pseudo-quantitative ➔ Facteurs intégrés sont : géologie (lithologie, stratigraphie, contexte structural), morphologie, occupation du sol ➔ Carte réalisée à échelle du 1/50 000, du 1/25 000 à titre indicatif et du 1/110 000 pour le département ➔ Pré-analyse du risque à l'échelle communale est faite : cartes sont la confrontation entre carte d'exposition des territoires aux phénomènes en intégrant les zones aménagées • Déclinaison de ces cartes en risque absolu (surface exposée) et risque relatif (surface relative du territoire communal exposé)
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire des cavités non exhaustif, • 3 approches différentes selon les données, • Carte à titre démonstratif.

Expertise de l'aléa mouvements de terrain du territoire de la commune de Farébersviller (Moselle).
BRGM/RP-52533-FR (2003)
DONNEES DE BASE
<ul style="list-style-type: none"> • Géomorphologie • Carte géologique à 1/50 000 • Hydrogéologique BSS • Mnt 50m + photo aérienne (1/3 500), Carte IGN 1/25 000
METHODOLOGIE
<ul style="list-style-type: none"> • Elaboration du PPR : mouvement de terrain : affaissement : carte d'aléa • Etude du cadre géographique, géologique et hydrogéologique • Reconnaissance des phénomènes complémentaires des désordres : carte aléa mvt de terrain à 1/150 000 d'un rapport, historique avec ancien rapport, documentation • Observation des phénomènes sur le terrain • Modélisation géologique : mnt, photographies aériennes, carte IGN : pour le contour géologique • Cartographie de l'aléa : affaissement <ul style="list-style-type: none"> ○ Principe : analyse des désordres : 3 grands groupes : glissement superficiel, affaissement lié à la dissolution de couche affleurante, affaissement lié à dissolution de couche non affleurante <ul style="list-style-type: none"> ▪ Affaissement superficiel : dépend de 2 facteurs : <ul style="list-style-type: none"> • Epaisseur de la couverture : faible • Circulation d'eau : important • Classification des épaisseurs de recouvrement en 3 classes : 0-15, 15-35, >35 : intervalle choisi >35 car existence de désordre lié aux transports routiers, 15 car meilleur définition ○ Carte de classification et en découle une carte d'aléa où le niveau est considéré élevé là où le recouvrement est <35m • Faire une étude hydrographique pour voir l'emplacement de la nappe et les zones noyées • Voir où sont localisées les failles / fracturations <ul style="list-style-type: none"> ○ Là où fracture + zone noyée : aléa fort ○ Là où zone noyée : faible ○ Si aucun facteur : très faible à nul • Carte de synthèse : combinaison des différentes cartes <ul style="list-style-type: none"> ○ Niveau allant de très faible à nul (1), à faible (2), à moyen (3) à élevé (4) ○ Code : A pour affaissement et des chiffres 1 à 4 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zone 4 : là où phénomène brutal causant un danger brutal pour la vie humaine ; ▪ Zone 3 : mouvement attendu moins brutal mais avec des conséquences économiques et sociales importantes ; ▪ Zone 2 : niveau faible : potentielle mesure prise ; ▪ Zone 1 : pas de contrainte précise.
LIMITES
<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation d'une ancienne étude pour les pendages, • Modification très importante de la carte des aléas, • Etude PPR pour compléter les analyses.

<p>Etablissement d'un Plan de Prévention des Risques concernant les mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines. Commune de Saint-Martin le Vieil. BRGM/RP-56410-FR (2008)</p>
<p>DONNEES DE BASE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Morphologique • Carte géologique à 1/50 000 • Hydrologique • Inventaire
<p>METHODOLOGIE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Cadre d'une convention pour réaliser les documents nécessaires pour la création du PPR • Carte des aléas • Contexte naturel (morphologique), géologique, hydrogéologique, historique • Recensement • Description des phénomènes : typologie et nature • Effondrement : <ul style="list-style-type: none"> ○ Facteurs permanents : présence de cavité liée au lessivage des eaux souterraines, cavités anthropiques, lithologie, nature et géométrie des phénomènes et présence de surcharges ->Epaisseur de recouvrement et hauteur des vides sont des facteurs prépondérants ○ Facteurs déclenchants : pluie, végétation et actions anthropiques ○ Intensité des phénomènes ○ Carte des aléas : jugement d'expert donc avis qualitatif des conditions de stabilité, basé sur des visites <ul style="list-style-type: none"> ▪ Niveau d'aléa est indépendant de l'intensité. Aléa est classé sur la probabilité d'occurrence des phénomènes. • Méthode : repose sur la classification des délais d'apparition des phénomènes (court, long, moyen terme) et la probabilité d'occurrence (faible, moyen, fort) • Evaluation des enjeux et vulnérabilité : <ul style="list-style-type: none"> ○ Zone de bâti, voies de communication et réseau d'eau ○ Classer les enjeux en fonction des aléas
<p>LIMITES</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Avis d'expert donc qualificatif.

<p><u>Bassin versant de la Roya (Alpes Maritimes) - Cartographie de l'aléa mouvements de terrain, échelle 1/25000 : secteurs de Breil-sur-Roya, Fontan, la Brigue, Saorge, Tende.</u> <u>BRGM/RP-52513-FR (2003)</u></p>
<p>DONNEES DE BASE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire • Mnt 50m • Topographie : IGN 1/25 000
<p>METHODOLOGIE</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie à 1/50 000 des aléas mouvement de terrain et aussi cartographie à 1/25 000 dans les zones où les risques sont plus importants : support pour les prochains projets PPR ou PLU • Cartographie à 1/50 000 : basée sur une démarche naturaliste sur des observations des phénomènes et des conditions géologiques et morphologiques <ul style="list-style-type: none"> ○ Inventaire des phénomènes ○ Typologie des mouvements de terrain observée sur le bassin ○ Analyse des différents phénomènes en fonction de la géologie et morphologie : facteurs de prédisposition = lithologie, pente, structure ○ Application de la règle qualitative d'évaluation d'aléa : combinaison des valeurs de susceptibilité ○ Restitution carte à 1/50 000 • Carte à 1/25 000 : <ul style="list-style-type: none"> ○ Collecte des données existantes + inventaire complémentaire des mouvements de terrain + indice d'instabilité: visites de terrain, observation d'images satellitaires et aériennes. Utilise un MNT : digitalisation des courbes de niveau à partir des fonds IGN ○ Identification des principaux mouvements de terrain : épaisseur des formations superficielles, cartographie du substratum et comparaison substrat/topographie ○ Analyse des facteurs de prédisposition ○ Traitement des données sous SIG ○ Vérification ponctuelle sur le terrain : affectation des valeurs de susceptibilité avec la combinaison pente/lithologie ○ Simplification des contours ○ Finalisation • Evaluation des aléas : seule la probabilité d'apparition spatiale prise en compte <ul style="list-style-type: none"> ○ Probabilité faible à nulle : mouvement très localisé avec facteur déclenchant ○ Moyenne : mouvement localisé sur le versant ○ Forte : majorité du versant ○ Aléa effondrement/ affaissement des cavités souterraines : • Résultat de la cartographie par commune : <ul style="list-style-type: none"> ○ Géographique : carte géographique + carte enjeux • Carte aléa : une par phénomène
<p>LIMITES</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire des cavités non exhaustif, • Possibilité de faire des micro zonage à échelle 1/100 000 ou 1/2 000 pour mieux gérer le risque et réaliser au mieux la prévention et prédiction du risque.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm