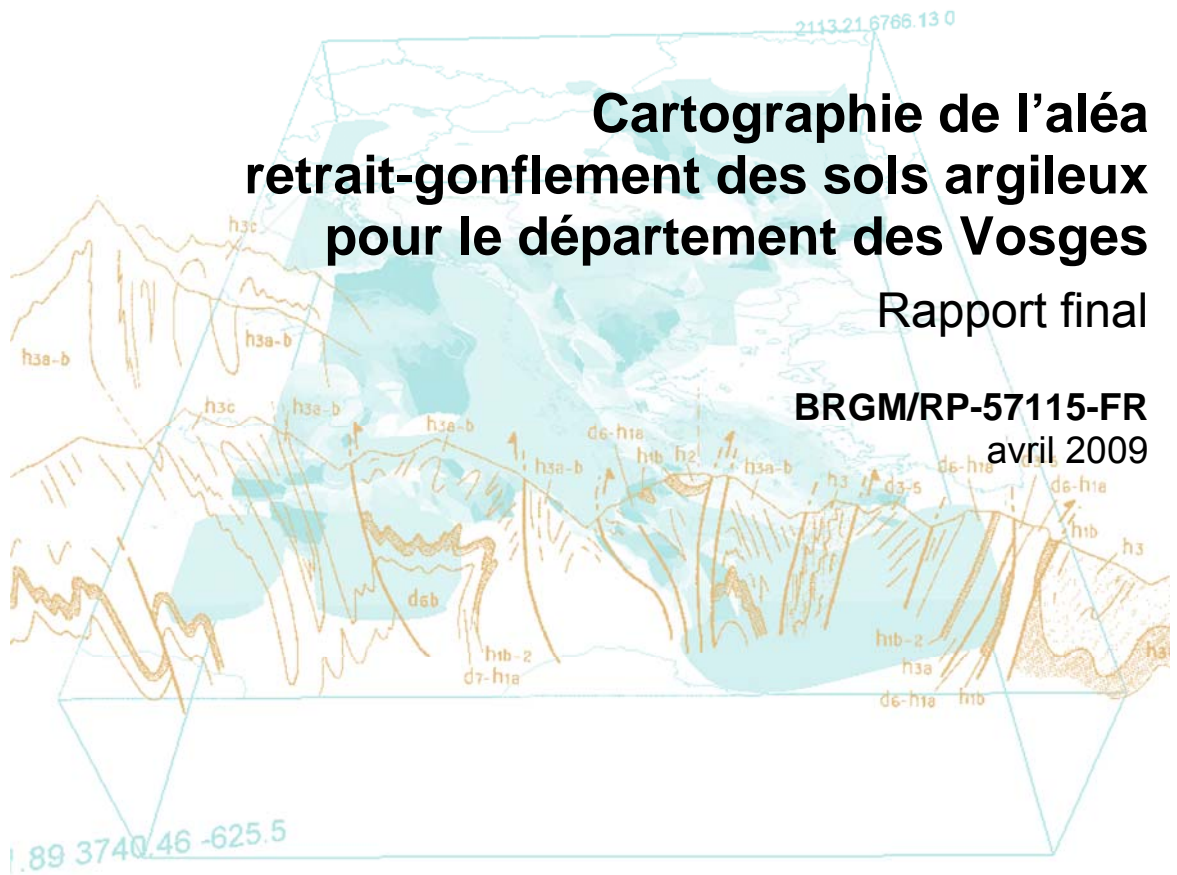


Document public



Document public

Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux pour le département des Vosges

Rapport final

BRGM/RP-57115-FR
avril 2009

Étude réalisée dans le cadre de l'opération
de service public 07RISD23 du BRGM

A. Géron, R. Dufrenoy, V. André, C. Cartannaz

Vérificateur :

Nom : Marc VINCENT

Date : 24 avril 2009

Signature :



Approbateur :

Nom : Michel AGUILLAUME

Date : 24. Avril 2009

Signature :



Mots clés : argiles, marnes, argiles gonflantes, smectites, retrait-gonflement, aléa, risque naturel, sinistre sécheresse, catastrophe naturelle, géotechnique, cartographie, Vosges, Lorraine

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

Géron A., Dufrenoy R., André V., Cartannaz C. (2009) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux pour le département des Vosges. BRGM/RP-57115-FR, 120 p., 39 ill., 5 ann., 3 cartes h.-t.

Synthèse

Les phénomènes de retrait-gonflement de certaines formations géologiques argileuses affleurantes provoquent des tassements différentiels qui se manifestent par des désordres affectant principalement le bâti individuel. En France métropolitaine, ces phénomènes, mis en évidence à l'occasion de la sécheresse exceptionnelle de l'été 1976, ont pris une réelle ampleur lors des périodes sèches des années 1989-91 et 1996-97, puis plus récemment au cours de l'été 2003.

Le département des Vosges fait partie des départements français touchés par le phénomène, puisque 143 sinistres imputés à la sécheresse y ont été recensés et localisés dans le cadre de la présente étude. A la date du 15 février 2009, 12 communes sur les 515 que compte le département ont été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle pour ce phénomène, sur des périodes comprises entre janvier 1996 et septembre 2003, soit un taux de sinistralité relativement faible de 2,33 %. Par ailleurs, d'après les données de la Caisse Centrale de Réassurance actualisées en septembre 2008, les Vosges sont actuellement situées en 76^{ème} position des départements français en termes de coût d'indemnisation engendré par ce phénomène, pour un montant cumulé d'un peu plus de 420 k€ en coûts actualisés.

Afin d'établir un constat scientifique objectif et de disposer de documents de référence permettant une information préventive, le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT) a demandé au BRGM (service géologique national) de réaliser une cartographie de cet aléa à l'échelle de tout le département des Vosges, dans le but de définir les zones les plus exposées au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux. Cette étude, réalisée par le BRGM dans le cadre de sa mission de service public sur les risques naturels, s'intègre dans un programme national de cartographie qui couvrira à terme la totalité du territoire métropolitain. En région Lorraine, les départements de Meurthe-et-Moselle, de la Meuse et de la Moselle ont déjà été traités à ce jour, de même que les départements limitrophes de la Haute-Marne et de la Haute-Saône.

L'étude a été conduite par le Service Géologique Régional Lorraine, en collaboration avec le Service Aménagement et Risques Naturels du BRGM. Le financement est assuré à hauteur de 75 % par le Fonds national de prévention des risques naturels majeurs, le complément ayant été financé par la dotation de service public du BRGM, dans le cadre d'une convention de cofinancement signée avec la Préfecture des Vosges en date du 23 mai 2007.

La démarche de l'étude a d'abord consisté à établir une cartographie départementale synthétique des formations à dominante argileuse ou marneuse, affleurantes à sub-affleurantes, à partir de la synthèse des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000. Les vingt-et-une formations ainsi identifiées et cartographiées ont ensuite fait l'objet d'une hiérarchisation quant à leur susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Cette classification a été réalisée sur la base de trois principaux critères : la caractérisation lithologique de la formation, la composition minéralogique de sa phase argileuse et son comportement géotechnique. En résulte l'établissement d'une carte départementale de susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement.

La carte d'aléa a ensuite été établie à partir de la carte de susceptibilité des formations identifiées, en y intégrant la probabilité d'occurrence du phénomène. Cette dernière a été évaluée à partir du recensement des évènements observés depuis 1996 en calculant, pour chaque formation sélectionnée, une densité de sinistres, rapportée à la surface d'affleurement réellement urbanisée, afin de permettre des comparaisons fiables entre chaque formation.

Sur cette carte, pour le département des Vosges, les zones d'affleurement des formations à dominante argileuse ou marneuse sont caractérisées par deux niveaux d'aléa (moyen et faible). Aucun secteur n'a été classé en niveau d'aléa fort, ceci par comparaison avec les cartes d'aléa établies dans d'autres départements, par application de la même méthodologie et avec les mêmes critères et seuils de classification.

- 5,08 % est caractérisée par un niveau d'aléa moyen ;
- 38,19 % est considérée comme présentant un niveau d'aléa faible.

Environ 56,73 % de la surface du département correspond à des zones *a priori* non concernées par le phénomène (y compris le réseau hydrographique).

Il n'est toutefois pas exclu que, sur ces derniers secteurs considérés comme non concernés par le phénomène, se trouvent localement des zones argileuses d'extension limitée, notamment dues à l'altération localisée des calcaires ou à des lentilles argileuses non cartographiées, et susceptibles de provoquer quelques sinistres.

Cette carte d'aléa retrait-gonflement des terrains argileux du département des Vosges, dont l'échelle de validité est le 1/50 000, pourra servir de base à des actions d'information préventive dans les communes les plus touchées par le phénomène. Elle constitue également le préalable à l'élaboration de Plans de prévention des risques naturels (PPRN), en vue d'attirer l'attention des constructeurs et maîtres d'ouvrages sur la nécessité de respecter certaines règles constructives préventives dans les zones soumises à l'aléa retrait-gonflement, en fonction du niveau de celui-ci. Cet outil réglementaire devra insister sur l'importance d'études géotechniques comme préalable à toute construction nouvelle dans les secteurs concernés par les formations géologiques à aléa moyen ou faible, notamment en raison de la forte hétérogénéité des formations du département. A défaut, il conviendra de mettre en œuvre des règles constructives type par zones d'aléa, visant à réduire le risque de survenance de sinistre.

Sommaire

1. Introduction.....	9
2. Méthodologie	11
2.1. FACTEURS INTERVENANT DANS LE RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES ..	11
2.1.1. Facteurs de prédisposition	12
2.1.2. Facteurs de déclenchement.....	15
2.2. MÉTHODOLOGIE	16
2.2.1. Cartographie des formations argileuses ou marneuses.....	17
2.2.2. Caractérisation lithologique, minéralogique et géotechnique des formations	17
2.2.3. Examen des autres facteurs de prédisposition et de déclenchement	18
2.2.4. Carte de susceptibilité	18
2.2.5. Recensement et localisation géographique des sinistres	18
2.2.6. Détermination des densités de sinistres.....	19
2.2.7. Carte d'aléa	19
3. Présentation du département des Vosges	21
3.1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE	21
3.2. CONTEXTE HYDROLOGIQUE.....	25
3.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE.....	26
3.3.1. Les nappes « superficielles »	26
3.3.2. Les nappes « profondes et continues»	26
3.4. CONTEXTE CLIMATIQUE	27
3.4.1. La normale saisonnière	28
3.4.2. La sécheresse de 2003.....	28
4. Identification et cartographie des formations géologiques à dominante argilo-marneuse.....	31
4.1. DOCUMENTS ET MÉTHODOLOGIE UTILISÉS	31
4.1.1. Documents utilisés	31

4.1.2.	Méthodologie d'établissement de la carte des formations argileuses au sens large	32
4.2.	CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL.....	33
4.3.	LITHOSTRATIGRAPHIE DES FORMATIONS ARGILEUSES AU SENS LARGE.....	37
4.3.1.	Formations superficielles du Quaternaire	37
4.3.2.	Formations du Jurassique	39
4.3.3.	Formations du Trias.....	42
5.	Caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique des formations retenues	45
5.1.	CRITÈRES DE HIÉRARCHISATION.....	45
5.1.1.	Critères retenus	45
5.1.2.	Méthode de classification	45
5.2.	CRITÈRE LITHOLOGIQUE	46
5.2.1.	Définition du critère lithologique et barème	46
5.2.2.	Caractérisation lithologique des formations argileuses ou marneuses du département des Vosges.....	46
5.3.	CRITÈRE MINÉRALOGIQUE	48
5.3.1.	Définition du critère minéralogique et barème	48
5.3.2.	Source des données.....	48
5.3.3.	Caractérisation minéralogique des formations argileuses ou marneuses du département des Vosges	52
5.4.	CRITÈRE GÉOTECHNIQUE	53
5.4.1.	Définition du critère géotechnique et barème	53
5.4.2.	Source des données.....	56
5.4.3.	Caractérisation géotechnique des formations argileuses ou marneuses du département des Vosges	57
6.	Élaboration de la carte de susceptibilité	61
6.1.1.	Détermination d'un degré de susceptibilité.....	61
6.1.2.	Susceptibilité des formations argileuses ou marneuses.....	61
6.1.3.	Carte de susceptibilité	61
7.	Recensement et localisation des sinistres – détermination du critère densité de sinistres	67
7.1.	PROCÉDURE DE DEMANDE DE RECONNAISSANCE DE L'ÉTAT DE CATASTROPHE NATURELLE	67
7.2.	IDENTIFICATION DES COMMUNES SINISTRÉES	68

7.2.1.	Localisation des communes sinistrées.....	68
7.2.2.	Analyse des périodes de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle	71
7.3.	COLLECTE DES DONNÉES DE SINISTRES	72
7.4.	REPARTITION DES SINISTRES PAR FORMATION GEOLOGIQUE ET DENSITE DE SINISTRES	73
7.5.	FRÉQUENCE D'OCCURRENCE RAPPORTÉE A LA SURFACE URBANISÉE	77
7.5.1.	Détermination de la densité de sinistres par formation	77
7.5.2.	Détermination du critère densité de sinistres	78
8.	Carte d'aléa	81
8.1.	DÉTERMINATION DU NIVEAU D'ALÉA.....	81
8.2.	CARTE D'ALÉA	82
8.3.	SYNTHESE DE L'ALEA RETRAIT-GONFLEMENT DANS LE DEPARTEMENT DES VOSGES	86
8.4.	COMPARAISON AVEC LES CARTES D'ALEA DES DEPARTEMENTS VOISINS DEJA COUVERTS.....	86
9.	Conclusion	89
10.	Bibliographie.....	91

Liste des illustrations

Illustration 1 – Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche.	11
Illustration 2 – Carte de présentation du département des Vosges (données BD Carto IGN).	22
Illustration 3 – Géomorphologie du département des Vosges	24
Illustration 4 – Précipitations et températures mini et maxi sur Golbey – période 1971/2000 (source Météo-France).	28
Illustration 5 – Assemblage des cartes géologiques à 1/50 000 du département des Vosges.	32
<i>Illustration 6 – Extrait de la carte géologique de la France à 1/1 000 000.</i>	34
<i>Illustration 7 – Carte départementale synthétique des formations argilo-marneuses.</i>	44
Illustration 8 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la nature lithologique de la formation géologique	47
Illustration 9 – Note lithologique des formations argileuses retenues	47
Illustration 10 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la minéralogie de la phase argileuse de la formation géologique	48
<i>Illustration 11 – Répartition par formation argileuse des échantillons prélevés pour analyse</i>	49
Illustration 12 – Localisation des prélèvements réalisés pour analyse minéralogique	50
<i>Illustration 13 – Résultat des analyses minéralogiques spécifiques à chaque formation argileuse du département des Vosges</i>	51
Illustration 14 – Note minéralogique des formations argileuses retenues	53
Illustration 15 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de l'indice de plasticité de la formation géologique	55

Illustration 16 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la valeur au bleu de la formation géologique	55
Illustration 17 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du retrait linéaire de la formation géologique	56
Illustration 18 – Source des données géotechniques	57
Illustration 19 – Nombre de données géotechniques exploitées	57
Illustration 20 - Synthèse des données géotechniques (Indice de plasticité, Valeurs au bleu)	58
Illustration 21 – Distribution des données géotechniques par formation	60
Illustration 22 – Barème d'évaluation de la susceptibilité globale d'une formation argileuse.	61
Illustration 23 – Degré de susceptibilité des formations.	62
Illustration 24 – Répartition des surfaces concernées par classe de susceptibilité.	63
Illustration 25 – Carte de susceptibilité du département des Vosges.	64
Illustration 26 – Classement des formations par susceptibilité et surfaces d'affleurement.	65
Illustration 27 – Arrêtés interministériels et occurrences.	69
<i>Illustration 28 – Localisation des communes concernées par un ou des arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse (à la date du 15 février 2009).</i>	70
Illustration 29 – Durée de reconnaissance par commune de l'état de catastrophe naturelle sécheresse pour la période 1996-2006.	71
Illustration 30 – Nombre de communes reconnues en état de catastrophe naturelle sécheresse pour la période 1989-2008.	71
Illustration 31 – Nombre de sinistres recensés par commune dans le département des Vosges.	73
Illustration 32 – Carte de répartition des sinistres par formation géologique.	75
Illustration 33 – Répartition des sinistres par formation géologique.	76
Illustration 34 – Extension des surfaces urbanisées du département des Vosges.	77
<i>Illustration 35 – Densité de sinistres par formation ramenée à 100 km² de surface urbanisée et détermination de la note densité de sinistres.</i>	79
Illustration 36 – Calcul du niveau d'aléa des formations argileuses et marneuses.	83
Illustration 37 – Comparaison de la superficie des formations en fonction de la classe d'aléa.	84
Illustration 38 – Classement des formations en fonction de leur niveau d'aléa.	84
<i>Illustration 39 – Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement des Vosges.</i>	85

Liste des annexes

Annexe 1 : Rappels sur le mécanisme de retrait-gonflement des argiles	99
Annexe 2 : Liste des 12 communes des Vosges reconnues en état de catastrophe naturelle au titre des mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols et dates des périodes de reconnaissance – Etat au 15 février 2009	103
Annexe 3 : Liste des sinistres "sécheresse" recensés dans le cadre de cette étude	107
Annexe 4 : Coordonnées des bureaux d'études ayant fourni des données géotechniques	111
Annexe 5 : Résultats des analyses minéralogiques réalisées au cours de cette étude	115

Liste des cartes hors-textes (1/150 000)

Carte 1 – Carte synthétique des formations argilo-marneuses
Carte 2 – Carte départementale de susceptibilité au retrait-gonflement des sols argileux
Carte 3 – Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux

1. Introduction

Les phénomènes de retrait-gonflement de certains sols argileux provoquent des tassements différentiels qui se manifestent par des désordres affectant notamment le bâti individuel. En France métropolitaine, ces phénomènes ont été mis en évidence à l'occasion de la sécheresse exceptionnelle de l'été 1976. Ils ont pris depuis une ampleur importante lors des périodes sèches des années 1989-91 et 1996-97 et, plus récemment, au cours de l'été 2003.

Selon des critères mécaniques, les variations de volume du sol ou des formations lithologiques affleurantes à sub-affleurantes sont dues, d'une part, à l'interaction eau - solide, aux échelles microscopiques et macroscopiques, et, d'autre part, à la modification de l'état de contrainte en présence d'eau. Ces variations peuvent s'exprimer soit par un gonflement (augmentation de volume), soit par un retrait (réduction de volume). Elles sont spécifiques de certains matériaux argileux, en particulier ceux appartenant au groupe des smectites (dont fait partie la montmorillonite).

Sous un climat tempéré, les argiles situées à faible profondeur sont souvent déconsolidées, humidifiées et ont partiellement épuisé leur potentiel de gonflement à l'état naturel. Mais elles sont dans un état éloigné de leur limite de retrait (teneur en eau à partir de laquelle toute diminution de cette teneur provoquera une fissuration du matériau argileux par dessiccation) et peuvent se rétracter si leur teneur en eau diminue de façon notable. Dans ce contexte, les sinistres surviennent donc surtout lorsqu'une période de sécheresse intense ou prolongée provoque l'apparition de pressions interstitielles négatives dans la tranche superficielle du sol, soumise à évapotranspiration, d'autant que les bâtiments de type maisons individuelles, souvent peu rigides et fondés superficiellement, sont particulièrement vulnérables à des tassements différentiels sous leurs semelles de fondation.

La prise en compte, par les compagnies d'assurance, des sinistres liés à la sécheresse a été rendue possible par l'application de la loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophe naturelle. Depuis le début de l'année 1989¹, plus de 7 500 communes françaises, réparties dans 90 départements, ont été reconnues en état de catastrophe naturelle à ce titre (base GASPAR²). A fin 2006, le coût des sinistres dus à la sécheresse, indemnisés en France depuis 1989 au titre du régime des catastrophes naturelles, a été évalué par la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) à environ 4,3 milliards d'euros, ce qui en fait la deuxième cause d'indemnisation derrière les inondations.

La région Lorraine a été particulièrement affectée par ce phénomène, notamment au cours de l'été 2003. Le département des Vosges se place en 76^{ème} position pour les

¹ Début d'application de cette procédure aux sinistres résultant de "*mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et la réhydratation des sols*".

² La base de Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux Risques naturels et technologiques est la référence du Ministère de l'écologie en matière de centralisation des informations sur les risques naturels à l'échelon communal (PPR, reconnaissances cat-nat, atlas des zones inondables, Document d'information communal des populations sur les risques majeurs)

coûts cumulés d'indemnisation¹. Ce département, d'une superficie de 5 874 km² compte un peu plus de 380 000 habitants. Au total, à la date du 15 février 2009, 12 des 515 communes y ont été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle sécheresse, pour des périodes allant de janvier 1996 à septembre 2003, ce qui correspond à un taux de sinistralité assez modeste de 2,33 %.

Afin d'établir un constat scientifique objectif à l'échelle de tout le département et de disposer de documents de référence permettant une information préventive, le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT) a souhaité réaliser une carte de l'aléa retrait-gonflement afin de délimiter les zones les plus exposées au phénomène. Cette étude a été confiée au BRGM qui, dans le cadre de sa mission de service public sur les risques naturels, a élaboré une méthodologie de cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux à l'échelle départementale. L'intérêt d'une telle étude est multiple :

- compréhension de la corrélation entre la nature géologique des terrains et la répartition statistique des sinistres, à l'échelle départementale, puis régionale quand tous les départements limitrophes seront étudiés ;
- élaboration d'un document de prévention, en matière d'aménagement du territoire, destiné à la fois à l'État (pour l'établissement ultérieur de Plans de Prévention des Risques naturels prenant en compte l'aléa retrait-gonflement), aux communes, aux particuliers et surtout aux maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvres désireux de construire en zone sensible, afin qu'ils prennent, en connaissance de cause, les dispositions constructives qui s'imposent pour que le bâtiment ne soit pas affecté par des désordres ;
- élaboration d'un outil à l'usage des experts pour le diagnostic des futures déclarations de sinistres.

L'étude a été conduite par le Service Géologique Régional Lorraine, en collaboration avec le Service Aménagement et Risques Naturels du BRGM. Le financement est assuré à hauteur de 75 % par le Fonds national de prévention des risques naturels majeurs, le complément ayant été financé par la dotation de service public du BRGM, dans le cadre d'une convention de cofinancement signée avec la Préfecture des Vosges en date du 23 mai 2007.

Cette étude s'intègre à un programme national de cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux qui couvrira à terme l'ensemble du territoire métropolitain. Une cinquantaine de départements (les plus touchés par le phénomène) sont déjà couverts par de telles cartes d'aléa à ce jour.

¹ Données CCR de septembre 2008, sécheresse 2003 comprise

2. Méthodologie

2.1. FACTEURS INTERVENANT DANS LE RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES

Les phénomènes de retrait-gonflement sont dus pour l'essentiel à des variations de volume de formations argileuses sous l'effet de l'évolution de leur teneur en eau, comme rappelé en annexe 1 et schématisé sur l'illustration 1. Ces variations de volume se traduisent par des mouvements différentiels de terrain, susceptibles de provoquer des désordres au niveau du bâti.

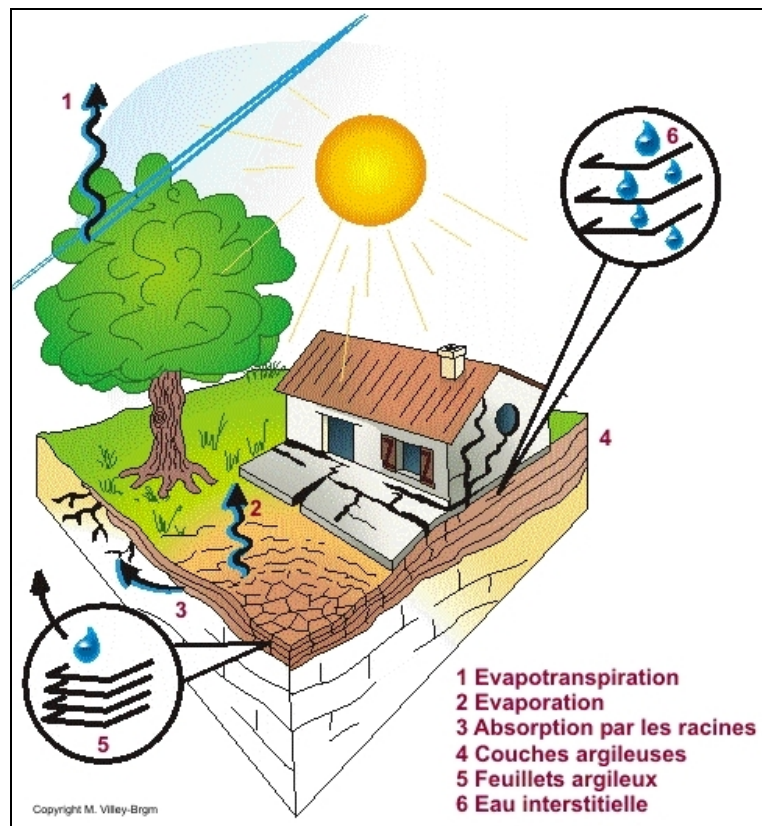


Illustration 1 – Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche.

Par définition, l'aléa retrait-gonflement est la probabilité d'occurrence spatiale et temporelle des conditions nécessaires à la réalisation d'un tel phénomène. Parmi les facteurs de causalité, on distingue classiquement des facteurs de prédisposition et des facteurs de déclenchement.

Les facteurs de prédisposition sont ceux dont la présence induit le phénomène de retrait-gonflement, mais ne suffit pas à elle seule à le déclencher. Ces facteurs sont fixes ou évoluent très lentement avec le temps. On distingue les facteurs internes, qui sont liés à la nature du sol, et des facteurs d'environnement qui caractérisent plutôt le site. Les facteurs de prédisposition permanents conditionnent en fait la répartition spatiale du phénomène. Ils permettent de caractériser la susceptibilité du milieu vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement.

Les facteurs de déclenchement sont ceux dont la présence provoque le phénomène de retrait-gonflement, mais qui n'ont d'effet significatif que s'il existe des facteurs de prédisposition préalables. La connaissance des facteurs déclenchants permet de déterminer l'occurrence du phénomène (autrement dit l'aléa et non plus seulement la susceptibilité).

2.1.1. Facteurs de prédisposition

2.1.1.1. *Contexte hydrogéologique Nature du sol*

La nature du sol constitue un facteur de prédisposition fondamental dans le mécanisme de retrait-gonflement : seules les formations géologiques présentant des minéraux argileux sont sujettes au phénomène et leur susceptibilité dépend de leur lithologie, de leur géométrie, de leur minéralogie et de leur comportement géotechnique.

La procédure d'étude de la nature du sol, basée sur l'exploitation des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000 éditées par le BRGM, comporte un inventaire des formations affleurantes à sub-affleurantes, à composante argilo-marneuse, puis leur cartographie.

La majorité des dossiers consultés montre que les sinistres sont corrélés à la présence d'une formation argileuse ou marneuse bien définie, ce qui conforte le concept adopté. Cependant, il est important de signaler qu'une carte géologique en tant que telle ne suffit pas à déterminer la répartition des sols argileux sujets au retrait-gonflement. En effet, de telles cartes ne prennent pas toujours en compte les éventuelles transformations locales du sol (principalement sous l'effet de l'altération de la roche), et les différents faciès des formations les plus superficielles ne sont pas toujours cartographiés avec précision.

En particulier certaines formations principalement calcaires sont susceptibles de s'altérer localement sous l'effet de phénomènes de karstification qui peuvent se traduire par la présence en surface de poches argileuses qui, généralement, ne sont pas identifiées sur les cartes géologiques, mais dont la seule présence suffit à expliquer certains sinistres ponctuels.

Concernant la nature des formations géologiques, les éléments qui influent sur la susceptibilité au retrait-gonflement sont en premier lieu la lithologie de la formation (c'est-à-dire principalement la proportion de matériau argileux, autrement dit d'éléments fins inférieurs à 2 μm).

En moindre proportion mais non négligeable, la géométrie de la formation argileuse influe sur la susceptibilité au retrait-gonflement. Les effets du phénomène seront d'autant plus importants que la formation sera en position superficielle et que les niveaux argileux en son sein seront épais et continus. Une alternance de niveaux argileux et de lits plus perméables (sableux, par exemple), sièges de circulations d'eau temporaires, constitue également une configuration défavorable, car à l'origine de fréquentes variations de teneur en eau dans les parties argileuses.

Un facteur prépondérant qui détermine le degré de susceptibilité d'une formation argileuse au phénomène de retrait-gonflement, est sa composition minéralogique. Une formation sera d'autant plus susceptible au phénomène que sa fraction argileuse (au sens granulométrique) contiendra une forte proportion de minéraux argileux dits "gonflants". En effet, certains minéraux argileux présentent, par rapport à d'autres, une aptitude nettement supérieure vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Il s'agit essentiellement des smectites (dont fait partie la montmorillonite), de certains minéraux argileux interstratifiés, de la vermiculite et de certaines chlorites.

Cette composition minéralogique dépend étroitement des conditions de dépôt et d'évolution diagénétique (ensemble des processus qui affectent un dépôt sédimentaire initial pour le transformer en roche). On peut donc approcher cette connaissance par une reconstitution des conditions paléogéographiques ayant présidé à la mise en place des différentes formations (dépôt sédimentaire initial). De façon plus quantitative, mais dont la valeur n'est que ponctuelle, la connaissance de la composition minéralogique d'une formation argileuse se détermine directement par des analyses diffractométriques aux rayons X. On peut enfin caractériser, par des essais géotechniques en laboratoire, l'aptitude du matériau à absorber de l'eau, voire mesurer directement sa capacité de retrait ou de gonflement. Ces deux dernières approches (caractérisation minéralogique et évaluation du comportement géotechnique du matériau) présentent l'avantage majeur de fournir des résultats quantitatifs rigoureux, mais exigent un grand nombre de mesures pour caractériser de manière statistique le comportement de chacune des formations, qui peuvent être par nature hétérogènes.

2.1.1.2. Contexte hydrogéologique

Parmi les facteurs de prédisposition, les conditions hydrogéologiques constituent un des facteurs environnementaux régissant les conditions hydrauliques *in situ*. Or la présence d'une nappe phréatique rend plus complexe le phénomène de retrait-gonflement. En effet, les conditions hydrauliques *in situ* (teneur en eau et degré de saturation) varient dans le temps non seulement en fonction de l'évapotranspiration (dont l'action est prépondérante sur une tranche très superficielle de l'ordre de 1 à 2 m d'épaisseur) mais aussi en fonction des fluctuations de la nappe éventuelle (dont l'action devient prépondérante en profondeur).

La présence d'une nappe permanente à faible profondeur permet généralement d'éviter la dessiccation de la tranche superficielle de sol. Inversement, un rabattement de cette nappe (sous l'effet de pompages ou d'un abaissement généralisé du niveau), ou le tarissement naturel des circulations d'eau superficielles en période de sécheresse, aggrave la dessiccation de la tranche de sol soumise à l'évaporation. Ainsi, dans le cas d'une formation argileuse surmontant une couche sablo-graveleuse, un éventuel dénoyage de cette dernière provoque l'arrêt des remontées capillaires dans le terrain argileux et contribue à sa dessiccation.

2.1.1.3. Géomorphologie

La topographie constitue un facteur permanent de prédisposition et d'environnement qui peut conditionner la répartition spatiale du phénomène de retrait-gonflement.

La présence d'une pente favorise le ruissellement et le drainage par phénomène gravitaire, tandis qu'une morphologie plate sera d'avantage susceptible de recueillir des eaux stagnantes qui ralentiront la dessiccation du sol. Par ailleurs, un terrain en pente exposé au sud sera plus sensible à l'évaporation du fait de l'ensoleillement, qu'un terrain plat ou exposé différemment. En outre, les formations argileuses et marneuses qui affleurent sur le flanc des vallées peuvent occasionner, localement, un fluage lent du versant et la formation de loupes argileuses. Ce phénomène vient s'ajouter aux désordres consécutifs liés à la seule dessiccation du sol.

D'autre part, il arrive souvent qu'une maison construite sur un terrain en pente soit plus sujette au problème de retrait-gonflement, en raison d'une dissymétrie des fondations lorsque celles-ci sont ancrées à une cote identique à l'amont et à l'aval. Le bâtiment se trouve alors enterré plus profondément du côté amont. De ce fait, les fondations situées à l'aval, étant en position plus superficielle, seront davantage sensibles aux variations de teneur en eau du sol. Cet effet est même parfois renforcé par une différence de nature du sol situé à la base des formations amont et aval, la couche d'altération superficielle suivant généralement plus ou moins la topographie.

Par ailleurs, les zones de plateau ont pu être soumises à des phénomènes de karstification qui se traduisent par l'existence de cavités karstiques formées aux dépens de formations calcaires et remplies d'argiles résiduelles sujettes au phénomène de retrait-gonflement.

2.1.1.4. Végétation

Il est avéré que la présence de végétation arborée à proximité d'une maison peut constituer un facteur déclenchant du phénomène de retrait-gonflement, même s'il n'est souvent qu'un facteur aggravant de prédisposition. En effet, les racines soutirent par succion (mécanisme d'osmose) l'eau du sol. Cette succion crée un gradient de la teneur en eau du sol, qui peut se traduire par un tassement localisé du sol autour de l'arbre. Si la distance au bâtiment n'est pas suffisante, cela entraînera des désordres dans les fondations. On considère en général que l'influence d'un arbre adulte se fait sentir jusqu'à une distance égale à une fois ou une fois et demie sa hauteur, mais ceci est variable selon les espèces arborées.

Il est à noter que les racines seront naturellement incitées à se développer en direction de la maison, puisque celle-ci s'oppose à l'évaporation et qu'elle maintient donc une zone de sol plus humide sous sa surface. Contrairement au processus d'évaporation, qui affecte surtout la tranche superficielle des deux premiers mètres, les racines d'arbres peuvent avoir une influence jusqu'à 4 voire 5 m de profondeur. Le phénomène sera d'autant plus important que l'arbre est en pleine croissance et qu'il a, de ce fait, davantage besoin d'eau.

Ainsi, on considère qu'un peuplier ou un saule adulte peut absorber jusqu'à 300 litres d'eau par jour en été (Habib, 1992). En France, les arbres considérés comme les plus sujets à influencer sur les phénomènes de retrait seraient les chênes, les peupliers, les saules, les cyprès et les cèdres. Des massifs de buissons ou d'arbustes situés près des façades (et notamment la vigne vierge) peuvent cependant aussi causer des dégâts.

2.1.1.5. Défauts de construction

Ce facteur de prédisposition, dont l'existence peut être révélée à l'occasion d'une sécheresse exceptionnelle, se traduit par la survenance ou l'aggravation des désordres. L'importance de ce facteur avait déjà été mise en évidence par les études menées en 1990 par l'Agence Qualité Construction et en 1991 par le CEBTP, lesquelles montraient que la plupart des sinistres concernaient des maisons individuelles dépourvues de chaînage horizontal et fondées sur semelles continues peu ou non armées et peu profondes (de 40 à 80 cm).

L'examen de dossiers d'expertises réalisées dans le département des Vosges confirme que de nombreuses maisons déclarées sinistrées présentent des défauts de conception ou de réalisation des fondations (souvent trop superficielles, hétérogènes ou fondées dans des niveaux différents) et il est probable que des fondations réalisées dans les règles de l'art auraient pu, dans de tels cas, suffire à limiter fortement, voire à éviter l'apparition de ces désordres. Cependant, l'examen des dossiers de sinistres montre que des constructions fondées sur semelles ancrées à plus de 0,80 m d'épaisseur ont aussi été affectées par le phénomène, en particulier lorsque des arbres sont plantés trop près des bâtiments. Par ailleurs, il est à noter que les désordres ne se limitent pas aux maisons récentes, mais concernent aussi des bâtiments anciens qui semblaient avoir été épargnés jusque là.

2.1.2. Facteurs de déclenchement

2.1.2.1. Phénomènes climatiques

Les phénomènes météorologiques exceptionnels constituent le principal facteur de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement. Les variations de teneur en eau du sol sont dues à des variations climatiques saisonnières. La profondeur de terrain affectée par les variations saisonnières de teneur en eau ne dépasse guère 1 à 2 m en climat tempéré, mais peut atteindre 3 à 5 m lors d'une sécheresse exceptionnelle, ou dans un environnement défavorable (végétation proche).

Les deux paramètres importants sont les précipitations et l'évapotranspiration. En l'absence de nappe phréatique, ces deux paramètres contrôlent en effet les variations de teneur en eau dans la tranche superficielle des sols. L'évapotranspiration est la somme de l'évaporation (liée aux conditions de température, de vent et d'ensoleillement) et de la transpiration (eau absorbée par la végétation). Ce paramètre est mesuré dans certaines stations météorologiques mais sa répartition spatiale est difficile à appréhender car sa valeur dépend étroitement des conditions locales de végétation. On raisonne en général sur les hauteurs de pluies efficaces qui correspondent aux précipitations diminuées de l'évapotranspiration.

Malheureusement, il est difficile de relier la répartition, dans le temps, des hauteurs de pluies efficaces avec l'évolution des teneurs en eau dans le sol (Vincent *et al.*, 2007). On observe évidemment qu'après une période de sécheresse prolongée la teneur en eau dans la tranche superficielle de sol a tendance à diminuer, et ceci d'autant plus que cette période se prolonge. On peut établir des bilans hydriques en prenant en compte la quantité d'eau réellement infiltrée, ce qui suppose d'estimer, non seulement l'évapotranspiration, mais aussi le ruissellement. Mais toute la difficulté est de connaître la réserve utile des sols, c'est-à-dire leur capacité d'emmagasiner de l'eau et de la restituer ensuite (par évaporation ou en la transférant à la végétation par son système racinaire). Le volume de cette réserve utile n'est généralement connu que ponctuellement et l'état de son remplissage ne peut être estimé que moyennant certaines hypothèses (on considère généralement qu'elle est pleine en fin d'hiver), ce qui rend extrêmement délicate toute analyse de ce paramètre à une échelle départementale. Un autre paramètre difficile à estimer de façon systématique est le volume d'eau transféré de la zone non saturée à la nappe phréatique, ainsi que le rythme de ce transfert.

2.1.2.2. Facteurs anthropiques

Il s'agit de facteurs de déclenchement qui ne sont pas liés à un phénomène climatique, par nature imprévisible, mais à une action humaine. En effet, les travaux d'aménagement, en modifiant la répartition des écoulements superficiels et souterrains, ainsi que les possibilités d'évaporation naturelle, sont susceptibles d'entraîner des modifications dans l'évolution des teneurs en eau de la tranche superficielle de sol. En particulier, des travaux de drainage réalisés à proximité immédiate d'une maison peuvent provoquer des mouvements différentiels du terrain dans le voisinage.

Inversement, une fuite dans un réseau enterré ou une infiltration des eaux pluviales en pied de façade peut entraîner un mouvement consécutif à un gonflement des argiles. Ainsi, il convient de signaler que des fuites de canalisations enterrées, souvent consécutives à un défaut de conception et/ou de réalisation au niveau des raccordements avec le bâti, constituent une source fréquente de sinistre. Une étude statistique récente (Vincent *et al.*, 2006) conduite par le bureau d'études CEBTP-Solen à partir d'un échantillon de 994 maisons sinistrées a ainsi montré que ce facteur pouvait être mis en cause dans près d'un tiers des cas étudiés.

Par ailleurs, la présence de sources de chaleur en sous-sol (four ou chaudière) près d'un mur mal isolé peut, dans certains cas, aggraver voire déclencher la dessiccation du sol à proximité et entraîner l'apparition de désordres localisés.

2.2. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie de cartographie de l'aléa développée par le BRGM a été mise au point à partir d'études similaires menées d'abord dans le département des Alpes de Haute-Provence (Chassagneux *et al.*, 1995 ; Chassagneux *et al.*, 1996) et des Deux-Sèvres (Vincent *et al.*, 1998), puis dans l'Essonne (Prian *et al.*, 2000) et en Seine-Saint-Denis (Donsimoni *et al.*, 2001). Elle a été validée par le Ministère de l'écologie (actuel MEEDDAT) et est désormais appliquée dans le cadre d'un programme qui permettra d'obtenir des résultats homogènes au niveau national (Vincent *et al.*, 2008). En ce qui concerne la région Lorraine, la cartographie du

département de Meurthe-et-Moselle a été réalisée en 2005-06 (Barchi, 2006) et a fait l'objet d'un porté à connaissance auprès des communes du département courant 2008. Celle de la Meuse a été achevée en juillet 2008 (Zornette, 2008) et celle de la Moselle en septembre 2008 (Pannet, Géron et Cartannaz, 2008). Parmi les autres départements limitrophes, la carte d'aléa retrait-gonflement est d'ores et déjà disponible en Haute-Marne (Zornette, 2007) et vient d'être achevée en Haute-Saône (Le Roy, 2009).

2.2.1. Cartographie des formations argileuses ou marneuses

Dans une première étape, les cartes géologiques éditées par le BRGM à l'échelle 1/50 000 et couvrant le département ont fait l'objet d'un travail d'harmonisation, afin d'en déduire une carte géologique départementale harmonisée (Chèvremont, 2008). Ce document a servi de point de départ pour la cartographie des formations argileuses et marneuses du département qui intègre également certaines données ponctuelles issues de coupes de forage de la Banque des données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM, ou provenant de rapports d'études géotechniques.

Pour cela, toutes les formations argileuses ou marneuses du département, y compris les formations superficielles d'extension locale, ont été inventoriées puis cartographiées. Des regroupements ont été réalisés dans une seconde étape, en considérant que des natures lithologiques voisines laissaient supposer des comportements semblables vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Cela a permis d'aboutir à la carte départementale synthétique des formations argileuses au sens large. Cette cartographie a été réalisée à l'échelle 1/50 000 (qui correspond donc à l'échelle de validité de la donnée brute), numérisée, puis synthétisée et présentée hors-texte à l'échelle 1/150 000.

2.2.2. Caractérisation lithologique, minéralogique et géotechnique des formations

L'étude des formations argileuses retenues a amené à qualifier, pour chacune d'entre elles, la proportion de matériau argileux présent dans la formation, ce qui constitue sa caractérisation lithologique.

L'analyse des notices des cartes géologiques, complétée par une revue bibliographique, a permis de définir les caractéristiques minéralogiques des formations retenues, et en particulier de répertorier la présence et la proportion des minéraux gonflants (smectites, interstratifiés...) dans la fraction argileuse.

La caractérisation du comportement géotechnique des formations argileuses du département a été essentiellement établie sur la base du dépouillement et de la synthèse des nombreux rapports d'expertise de sinistres réalisés par différents bureaux d'études.

Pour des formations géologiques qui s'étendent au delà du département et pour lesquelles les données sont rares, nous avons repris les caractéristiques recueillies à l'occasion des études effectuées dans les départements voisins, en l'occurrence la Meurthe-et-Moselle, la Meuse, la Moselle, la Haute-Marne et la Haute-Saône.

2.2.3. Examen des autres facteurs de prédisposition et de déclenchement

Les facteurs ponctuels de prédisposition ou de déclenchement que sont notamment la végétation arborée, les actions anthropiques ou les défauts de construction, n'ont pas été pris en compte dans la mesure où leur impact est purement local et ne peut être cartographié à une échelle départementale.

L'analyse des conditions météorologiques et de la répartition spatiale des déficits pluviométriques n'est pas apparue non plus comme un élément discriminant à l'échelle du département. Ce critère n'a donc pas été pris en compte dans l'élaboration de la carte de susceptibilité.

Le contexte hydrogéologique a fait l'objet d'une analyse spécifique sur la base d'éléments issus des notices de cartes géologiques et de rapports du BRGM sur le sujet. L'influence des nappes est cependant difficile à mettre en évidence à une échelle départementale dans la mesure où elle dépend souvent de conditions très locales. C'est pourquoi, ce critère n'a pas non plus été retenu dans l'élaboration de la carte de susceptibilité.

Enfin, le facteur géomorphologique n'a pas été non plus pris en compte dans la cartographie, même s'il s'agit d'un élément pouvant conditionner la survenance d'un sinistre, dans la mesure où des défauts de réalisation et de conception de fondations sont plus fréquents sur des terrains en pente et s'ajoutent à de fortes variations de teneur en eau entre l'aval et l'amont de la construction. Ainsi, il a été jugé préférable d'établir la cartographie en partant des contours des formations lithologiques plutôt que de se baser sur un découpage en unités géomorphologiques homogènes.

2.2.4. Carte de susceptibilité

La carte départementale de susceptibilité au retrait-gonflement a été réalisée en notant chacune des formations argileuses et marneuses du département, après évaluation du degré de sensibilité de ces formations. Les critères utilisés pour établir cette hiérarchisation sont les caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique de ces formations. Pour ce faire, certains bureaux d'études, maîtres d'œuvres, assureurs, experts et unités d'enseignement en géologie nous ont laissé un accès à leurs données géotechniques et minéralogiques. Cette recherche de données a été complétée par des prélèvements de terrain analysés ensuite en laboratoire.

2.2.5. Recensement et localisation géographique des sinistres

Afin d'établir la cartographie de l'aléa retrait-gonflement (qui correspond, rappelons-le, à la probabilité d'occurrence du phénomène), la carte départementale de susceptibilité au retrait-gonflement a été corrigée en prenant également en compte la sinistralité observée à ce jour pour chacune des formations identifiées comme potentiellement sujettes au phénomène.

Pour ce faire, un recensement des sinistres liés à la sécheresse a été effectué auprès des 515 communes des Vosges, et plus particulièrement sur les 12 communes du département qui avaient été concernées à la date de l'enquête par au moins un arrêté de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle au titre des "*mouvements de*

terrains différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols", publié entre mars 1998 et août 2006.

Ces données ont été complétées en premier lieu par l'ensemble des dossiers archivés en Préfecture, au Service Interministériel Régional de Défense et de Protection Civile (SIRDPC). De plus, les dossiers conservés par la Caisse Centrale de Réassurance, certaines mutuelles d'assurance et plusieurs bureaux d'études ont pu être consultés et exploités. Après élimination des doublons (sinistres récurrents sur un même site ou données identiques issues de sources différentes), ce sont 143 sites de sinistres qui ont été recensés qui ont tous pu être localisés avec précision (sur cartes topographiques de l'IGN à l'échelle 1/25 000). Ils sont répartis dans 36 communes (parmi lesquelles figurent les 12 communes qui avaient fait l'objet d'une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle à la date de l'enquête). L'échantillon peut donc être considéré comme représentatif de l'occurrence spatiale du phénomène dans le département des Vosges.

2.2.6. Détermination des densités de sinistres

Pour chacun des sinistres recensés, la nature de la formation géologique affectée a été déterminée par superposition avec la carte des formations argileuses et marneuses du département. Ceci a permis de déterminer le nombre de sinistres recensés pour chacune des formations géologiques susceptibles et, par la suite, de calculer une densité de sinistres par formation (en pondérant par la surface d'affleurement de chacune des formations, afin d'obtenir des chiffres comparables entre eux).

Dans un souci de rigueur et étant donnée la grande diversité du taux d'urbanisation d'un point à un autre du département, il est apparu nécessaire, conformément à la méthodologie adoptée au niveau national, de pondérer ces densités de sinistres par le taux d'urbanisation de chacune des formations géologiques. Ce taux a été calculé après numérisation du contour des zones urbanisées du département (à partir des cartes topographiques de l'IGN à l'échelle 1/25 000).

Ainsi, une hiérarchisation des formations géologiques argileuses et marneuses a été réalisée en fonction du taux de sinistralité ramené à 100 km² de formation géologique réellement urbanisée.

2.2.7. Carte d'aléa

La carte départementale d'aléa a été établie à partir des contours de la carte de synthèse des formations argileuses ou marneuses : le niveau d'aléa vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement a été défini en croisant, pour chaque formation, la note de susceptibilité et la densité de sinistres ramenée à 100 km² de formation urbanisée, en donnant toutefois un poids deux fois plus important à la susceptibilité. La carte obtenue est numérisée et son échelle de validité est le 1/50 000.

3. Présentation du département des Vosges

Créé à la Révolution française le 4 mars 1790, en application de la loi du 22 décembre 1789, le département des Vosges fait partie de la région Lorraine, et tire son nom du massif qui occupe une vaste partie de son territoire. Il est entouré par les départements de la Meuse et de Meurthe-et-Moselle au nord qu'il croise au "Site des 3 bornes", du Bas-Rhin et du Haut-Rhin sur son flanc est, du Territoire de Belfort ainsi que de la Haute-Saône au sud, et enfin de la Haute-Marne sur sa façade ouest. Sa superficie de 5 874 km² le place au cinquante-troisième rang des départements français.

Le département des Vosges comprend 515 communes, regroupées en 31 cantons et 3 arrondissements. Seules deux communes comptent plus de 20 000 habitants, Epinal et Saint-Dié-des-Vosges, alors que la majorité (376 communes) rassemble moins de 500 habitants. La population des Vosges était évaluée à 380 952 habitants en 1999¹, ce qui en fait le soixante-et-unième département de par le poids démographique, avec une densité moyenne de 65 habitants/km², soit 1,65 fois moins que la moyenne nationale. Elle est inégalement répartie dans l'espace en raison de l'héritage industriel (exploitation forestière et industries dérivées) qui a contribué au développement de nombreuses villes de faible taille, le plus souvent concentrées et étirées en longueur au fond des vallées. La préfecture, Epinal, est localisée au centre du territoire. Les chefs-lieux des deux autres arrondissements sont Neufchâteau pour la partie occidentale et Saint-Dié-des-Vosges pour la partie orientale.

Avec ses 289 000 hectares de forêts (illustration 2), soit un taux de boisement de 48 %, le département des Vosges est le troisième département le plus boisé de France.

3.1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE

Le relief du département dessine un espace où se mêlent plusieurs ensembles morpho-structuraux. Successivement et d'ouest en est, une série de côtes domine un plateau central qui voit s'élever sur sa bordure orientale les massifs de moyenne montagne des Vosges. Fort de ses 1 362 mètres, le massif du Hohneck est le point culminant du département et domine la ligne de crêtes qui sépare l'Alsace de la Lorraine. Le département a la particularité d'être à cheval sur trois bassins fluviaux : celui du Rhin avec la Moselle et ses affluents, dont le Madon et la Meurthe, celui du Rhône par la Saône, et celui de la Meuse qui draine l'extrême-ouest où elle reçoit les eaux du Vair.

On peut ainsi distinguer 3 unités géomorphologiques qui se caractérisent principalement par une lithologie différente. Sous l'action de l'érosion et des glaces, les particularités géologiques ont entraîné la mise en place d'une topographie propre à chacun de ces ensembles (illustration 3). D'ouest en est, on observe la plaine vosgienne (relief de cuestas) la Vôge (plateau gréseux, principalement recouvert de forêts) et le Massif vosgien.

¹ INSEE, RGP 99

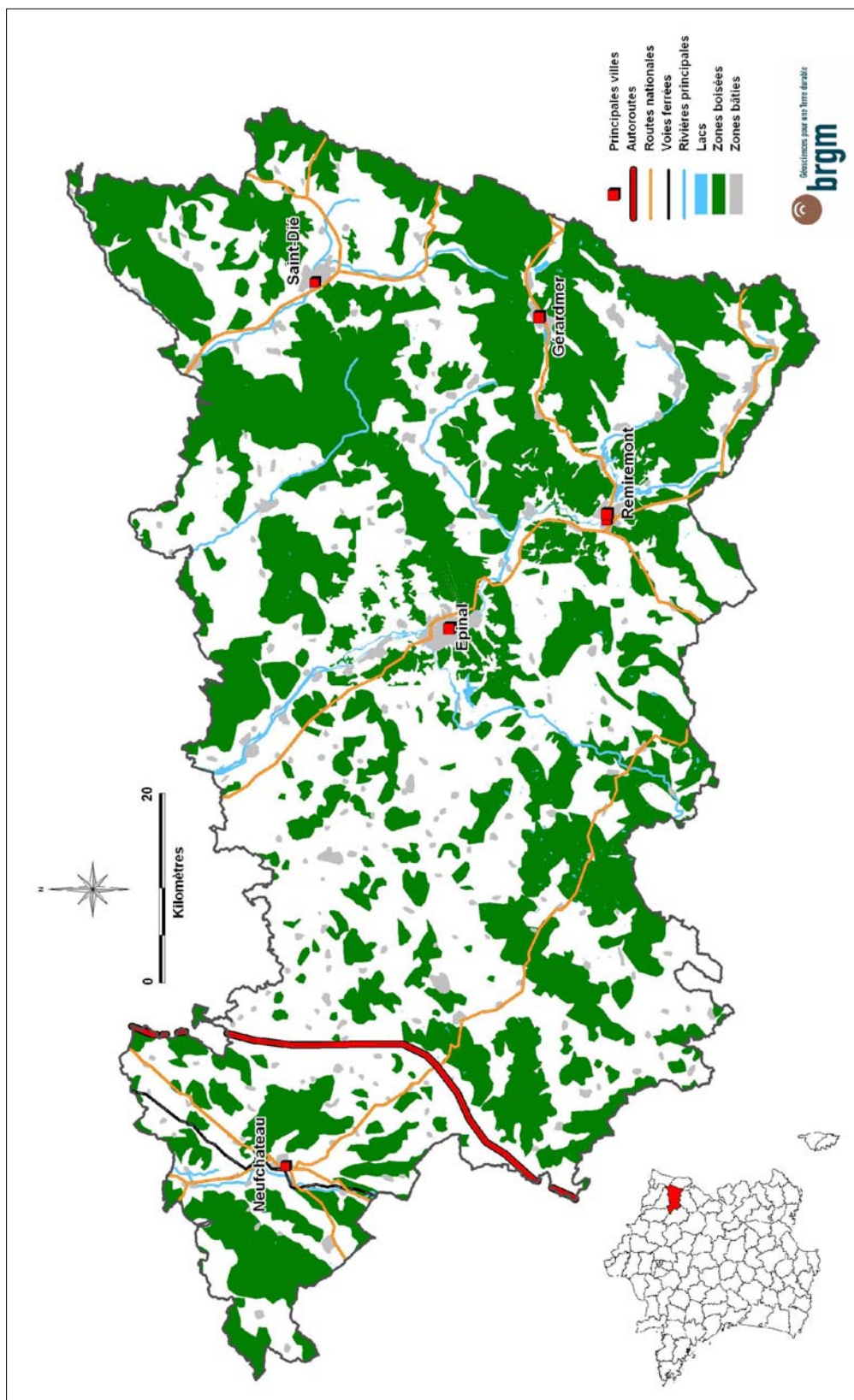


Illustration 2 – Carte de présentation du département des Vosges (données BD Carto IGN).

La plaine vosgienne : Loin d'être uniforme, ce paysage qui couvre toute la bordure occidentale du département est rythmé et dissymétrique. En effet, la vaste dépression de la plaine vosgienne se caractérise par une succession de revers de côtes calcaires ou gréseuses, culminant entre 300 et 500 mètres d'altitude, de cuestas, dont la dénivellation peut atteindre plusieurs centaines de mètres, et de plaines déprimées argilo-marneuses.

- La côte de Meuse, constituée de calcaires blancs, domine la plaine formée par les argiles de la Woèvre. Le contact entre plateau et plaine est un talus de dénivellation importante.
- La côte de Moselle est également constituée par des calcaires, et surplombe une dépression formée par les argiles grises du Toarcien. Elle peut être localement doublée, comme dans le secteur de Châtenois, où des grès forment une côte inférieure à celle des calcaires.
- La côte de l'Infralias, très peu visible dans le paysage, domine une dépression formée principalement par la vaste étendue des marnes colorées du Trias.
- La côte du Muschelkalk, plus communément appelée côte de Lorraine, est constituée de dolomies, calcaires et grès, et surmonte un plateau de constitution grès-conglomératique.

Le tracé des cours d'eau coupe perpendiculairement les plaines, et des buttes témoins ponctuent les dépressions à l'avant des côtes, vestiges d'une ancienne extension de la côte vers l'est.

Traditionnellement, les hommes ont utilisé ces terroirs de façon complémentaire, avec une exploitation sylvicole sur les plateaux, l'implantation de nombreux vergers sur les talus pour l'arboriculture, et une activité d'élevage au sein des dépressions lourdes souvent herbeuses. Ces cuestas constituent l'extrémité orientale du Bassin parisien, et dominent le plateau de la Vôge, lequel s'étend alors jusqu'aux premiers contreforts du Massif vosgien.

Le plateau de la Vôge : Ce vaste plateau, s'étendant de Remiremont à Vittel et couvrant la partie centrale du département, est essentiellement constitué de grès et conglomérats. Sa morphologie correspond à une structure en horsts et grabens. La Moselle profite d'un fossé d'effondrement au niveau d'Epinal pour franchir ce plateau, et sa vallée y est très encaissée ; les vallées de l'Augronne et de la Semouze entaillent également le plateau à la faveur de failles d'orientation SW-NE et SE-NW.

Le Massif vosgien : Relevé durant l'ère tertiaire, ce "massif ancien" se caractérise par la dissymétrie de ses versants. A un versant ouest en pente douce s'oppose un versant est (alsacien) plus raide, résultat du basculement de la bordure occidentale du fossé rhénan. On distingue, au sein de cette unité :

- les Hautes-Vosges, cristallines, qui s'étendent sur 120 km du nord au sud et sur environ 30 km d'ouest en est. Ce socle granitique est affecté de failles de direction SW-NE et SE-NW, direction se retrouvant au niveau du tracé du réseau hydrographique. Le relief des Hautes-Vosges est également marqué par les épisodes de glaciation (vallées en auges, cirques glaciaires, etc.) ;
- les Basses-Vosges, ou Vosges gréseuses, qui sont constituées de grès très anciens, et culminent à 1 008 m d'altitude par le massif du Donon.

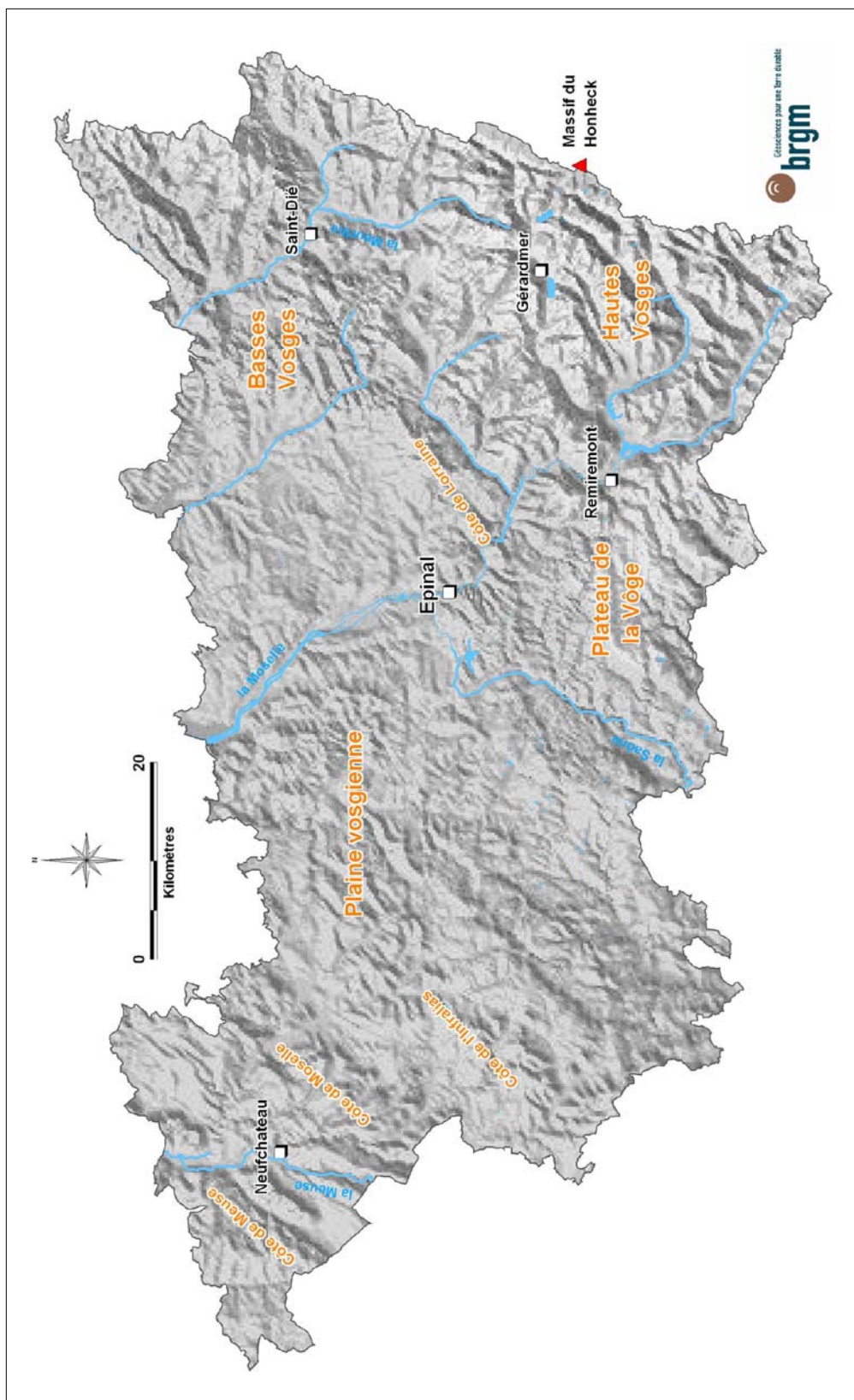


Illustration 3 – Géomorphologie du département des Vosges (d'après le Modèle Numérique de Terrain de l'IGN).

3.2. CONTEXTE HYDROLOGIQUE

Les principaux cours d'eau drainant le département des Vosges sont les suivants :

- **La Moselle**

Elle prend sa source dans le massif des Vosges sur la commune de Bussang, à une altitude de 731 m. Affluent du fleuve Rhin, la Moselle draine un bassin versant de 11 479 km². Lorsque celle-ci quitte le territoire français à Apach en Moselle, elle a parcouru près de 313 km, et son débit annuel moyen s'établit à 160 m³/seconde.

- **La Saône**

Elle prend sa source à Vioménil au pied de la falaise des monts Faucilles dans le département des Vosges à 392 m d'altitude et se jette dans le Rhône à Lyon, à l'altitude 158 m. La Saône est une rivière de 480 km de longueur, dont le débit moyen interannuel est de 175 m³/seconde.

- **La Meurthe**

La Meurthe est une rivière de Lorraine et un affluent de la Moselle qui prend sa source entre le Hohneck et le col de la Schlucht dans le département des Vosges. La longueur du cours d'eau s'estime entre 159 km et 170 km selon le type de mesure. Ses principaux affluents sont la Fave, le Rabodeau, la Plaine, la Vezouze, la Mortagne et le Sânon. Son bassin versant s'étend sur 3 085 km² et son débit moyen s'établit à 41,1 m³/seconde.

- **La Meuse**

Drainant toute la partie nord-ouest du département des Vosges, ce fleuve européen de 950 km possède un bassin relativement étroit orienté sud-nord. Prenant sa source sur le plateau de Langres en Haute-Marne, la Meuse entre dans le département des Vosges et se perd dans le sous-sol à Bazoilles-sur-Meuse pour ressurgir à Neufchâteau. Le débit moyen de la Meuse à Domrémy-la-Pucelle, avant la confluence avec le Vair, est de 13,3 m³ /seconde.

- **Le Madon**

Affluent de rive gauche de la Moselle, le Madon a une longueur de 96,9 km, et draine un bassin versant de 1 032 km². Sa source est située au pied du *Ménamont*, point culminant des monts Faucilles. Le débit moyen interannuel de la rivière à Pulligny en Meurthe-et-Moselle est de 10,6 m³ /seconde.

- **Le Vair**

Le Vair prend sa source près de Contrexéville. Après un parcours de 67 km, il se jette dans la Meuse au nord de Neufchâteau. Issu d'un plateau régulièrement enneigé des contreforts du massif vosgien, le Vair contribue fortement aux crues du fleuve Meuse. Le débit moyen interannuel ou module de la rivière à Soulosse est de 4,97 m³ par seconde.

A ces cours d'eaux il convient d'ajouter les nombreux lacs souvent confinés dans les ombilics des vallées en auge, et le plus souvent barrés par un vallum morainique. C'est le cas du lac de Gérardmer (le plus vaste) ou encore du lac de Xonrupt-Longemer.

3.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

L'abaissement du niveau des nappes en période de sécheresse ou, au contraire, leur élévation après une période de précipitations peut éventuellement se traduire par des modifications de teneur en eau (dessiccation ou imbibition) dans certaines formations géologiques argileuses ou marneuses, et contribuer ainsi au déclenchement de mouvements de terrain différentiels.

Toutefois, les variations piézométriques des principales nappes du département des Vosges jouent un rôle limité dans la variation de teneur en eau des argiles superficielles, phénomène qui est plus imputable à l'action prépondérante de l'évapotranspiration. Il n'est cependant pas exclu que des petites nappes superficielles (localisées dans des alluvions ou des lentilles sableuses), puissent jouer localement un rôle plus important. En effet, dans le cas d'une nappe à faible profondeur, les remontées capillaires atténuent la dessiccation de la zone non saturée. Inversement, en cas de baisse généralisée du niveau de la nappe, la dessiccation de la zone non saturée sera d'autant plus importante. Par ailleurs, dans le cas d'une alternance de couches argileuses et sableuses, les niveaux sableux seront sujets à des fluctuations rapides de teneur en eau, qui influenceront directement sur la teneur en eau des argiles sus-jacentes, donc sur le retrait ou le gonflement de ces dernières.

Au regard de la problématique du retrait-gonflement des argiles, les nappes des Vosges peuvent être classées en deux grands ensembles : d'une part, les nappes « superficielles », et d'autre part les nappes « profondes » (comme celle des grès vosgiens et des calcaires jurassiques).

De manière générale, les nappes des Vosges sont peu épaisses (sauf dans la vallée de la Meuse) et ont des perméabilités importantes. Les alluvions qui les constituent peuvent être recouvertes par des limons et les nappes alluviales sont en liaison hydraulique avec le cours d'eau.

3.3.1. Les nappes « superficielles »

Alluvions de la Meurthe

La nappe des alluvions de la Meurthe semble inexploitable dans les Vosges. Un puits y a été construit pour alimenter l'agglomération d'Hériménil (feuille géologique de Lunéville) et son débit (4 m³/h aux essais) n'a cessé de diminuer.

Alluvions de la Moselle

Les alluvions récentes de la Moselle contiennent une nappe importante exploitée par de multiples puits pour les besoins des communes qui jalonnent son cours. Elles sont alimentées par la Moselle et par un ruissellement important qui lessive les versants à substratum essentiellement daté du Keuper, chargé d'évaporites.

3.3.2. Les nappes « profondes et continues »

Les grès vosgiens

Les grès du Trias inférieur affleurent à la périphérie des Vosges cristallines. Dans sa partie captive, la nappe des grès vosgiens présente une évolution piézométrique très

lente. L'eau se minéralise au fur et à mesure que l'on s'éloigne des zones d'affleurement. Cette nappe constitue une des principales ressources en eau de la Lorraine. Dans tout le Bassin parisien ce vaste ensemble hydrogéologique représente une superficie de l'ordre de 40 000 km². L'épaisseur moyenne des grès est de l'ordre de 200 mètres. Cette nappe est largement exploitée pour l'alimentation en eau mais d'autres domaines sont également concernés (thermalisme, géothermie, stockage de gaz).

Les calcaires du Muschelkalk

Les calcaires du Muschelkalk supérieur sont généralement épais de 30 à 40 mètres mais ils comportent des niveaux de dolomies et de calcaires argileux. A l'affleurement, ces roches forment un aquifère fissuré, parfois karstique. La nappe est drainée par de nombreux cours d'eau lorrains. Les eaux minérales de Vittel et de Contrexéville sont issues des calcaires dolomitiques du Muschelkalk moyen.

Les grès du Rhétien

Les grès du Rhétien renferment une nappe exploitable captée en divers points par gravité ou forage (Afracourt). Les débits sont toujours modestes (quelques m³/h) du fait de la médiocre perméabilité de la matrice (la proportion d'argile pouvant être supérieure à 50 %) mais peuvent se révéler suffisants sur le plan local.

Les calcaires du Sinémurien/Hettangien

La nappe présente dans ces calcaires alimente un certain nombre d'émergences au contact avec la couche géologique des *Argiles de Levallois*. De nombreux puits y sont également forés. Cependant, les eaux fournies sont de qualité médiocre, toujours polluées chimiquement et bactériologiquement, avec un débit directement conditionné par l'importance des précipitations.

Les calcaires du Dogger

Cet aquifère multicouche est constitué par les calcaires oolithiques du Bajocien supérieur et du Bathonien moyen, les calcaires à polypiers et à entroques et les calcaires sableux du Bajocien moyen et inférieur. L'épaisseur du Bajocien varie entre 110 et 130 mètres et celle du Bathonien de 0 à 50 mètres. Bien qu'il existe plusieurs niveaux aquifères dans le Bajocien et le Bathonien supérieur, dans l'ensemble, il s'agit de réservoirs à forte perméabilité ou les circulations karstiques sont bien développées avec des vitesses élevées (de 150 à 500 m/h).

3.4. CONTEXTE CLIMATIQUE

Le département des Vosges connaît un climat semi-continental. L'altitude et l'orientation nord-sud du massif sont des paramètres influant directement sur le climat, et qui expliquent le régime abondant des précipitations. Le département a ainsi donné son nom à ce type de climat appelé "vosgien" auquel il est soumis en totalité.

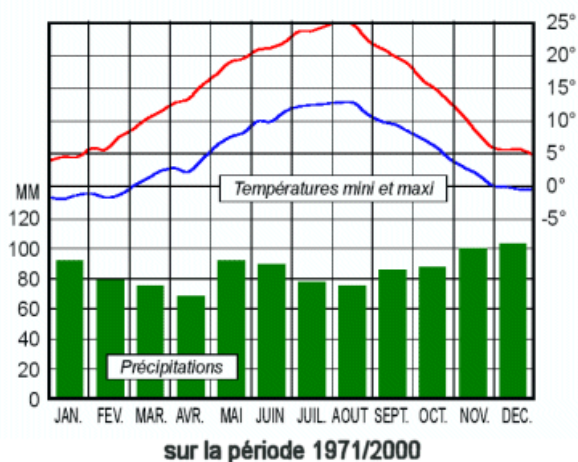
3.4.1. La normale saisonnière

Le département des Vosges est caractérisé par des hivers longs, s'étalant souvent de novembre à fin mars, et rigoureux (les températures peuvent régulièrement descendre à -10°C). A l'inverse, les étés sont chauds et fréquemment orageux, ce qui est caractéristique des climats à tendance continentale. Ce contraste est encore accentué dans la moitié montagneuse orientale du département. Les saisons intermédiaires, printemps et automne, sont elles aussi relativement bien marquées.

Le régime des précipitations permet de distinguer deux zones principales. La première au nord-ouest, est relativement sèche (région de Charmes et Mirecourt), alors que la seconde, au sud-est, de par le barrage naturel que constitue le massif (effet de Foehn), est quant à elle très arrosée, surtout dans les hautes vallées et les reliefs où les précipitations atteignent 2 000 mm par an.

Le graphique (illustration 4) correspond aux enregistrements effectués sur la station météorologique de Golbey pour la période 1971 – 2000, et indique également les principaux records enregistrés à cette station depuis 1949. Le climat ainsi caractérisé (précipitations et températures minimales et maximales) est assez représentatif de celui de tout le département des Vosges.

Normales de températures et de précipitations à Golbey



Quelques records depuis 1949 à Golbey

Température la plus basse	-23°C
Jour le plus froid	19/01/1966
Année la plus froide	1972
Température la plus élevée	$37,4^{\circ}\text{C}$
Jour le plus chaud	31/07/1983
Année la plus chaude	2000
Hauteur maximale de pluie en 24h	64,4 mm
Jour le plus pluvieux	12/11/1996
Année la plus sèche	1976
Année la plus pluvieuse	1965

Illustration 4 – Précipitations et températures mini et maxi sur Golbey – période 1971/2000 (source Météo-France).

3.4.2. La sécheresse de 2003

Durant l'année 2003, le département des Vosges a connu, à l'instar de nombreux autres, un épisode climatique des plus exceptionnels.

L'intensité extrême de cette sécheresse a provoqué l'assèchement temporaire de la source de la Moselle à Bussang. Durant cette période, les rivières ont dépassé leur

étiage vingtenal (sauf pour la vallée du Madon) provoquant une surmortalité piscicole. Si les nappes phréatiques les plus importantes (du Dogger et du Muschelkalk) ont été relativement préservées, les plus modestes de ces aquifères, ont été localement très affectés. Ces petits aquifères étant sources d'alimentation de nombreux réseaux d'eau potable, 70 communes se sont ainsi vues menacées de privation. Cette sécheresse inhabituelle a engendré une forte baisse des rendements agricoles et à également fragilisé la forêt vosgienne.

Le record absolu de température pour le département des Vosges durant cette période a été enregistré le 9 août 2003 à Epinal, où la température a atteint 38,0 °C (le précédent record en date remontait au 31/07/1983, avec 37,4 °C).

Avec presque neuf jours consécutifs de températures supérieures à 35,0 °C, le département des Vosges a également connu un record de durée d'ensoleillement de 309 heures et 45 minutes.

4. Identification et cartographie des formations géologiques à dominante argilo-marneuse

4.1. DOCUMENTS ET MÉTHODOLOGIE UTILISÉS

L'objectif est de disposer d'une carte des formations géologiques à dominante argilo-marneuse du département des Vosges, en préalable à l'identification des zones sensibles au retrait-gonflement.

La première étape a consisté à cartographier toutes les formations argilo-marneuses du département, y compris les formations superficielles d'extension locale, pour en dresser un inventaire et synthétiser les différentes cartes géologiques prises en compte. Des regroupements ont été réalisés dans une seconde étape, en considérant que des natures lithologiques voisines laissent supposer des comportements semblables vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Cela a permis d'aboutir à la carte départementale synthétique des formations argileuses au sens large.

4.1.1. Documents utilisés

Cette cartographie a été réalisée pour l'essentiel à partir des cartes géologiques éditées par le BRGM à l'échelle 1/50 000 et de la carte départementale géologique harmonisée établie spécifiquement dans le cadre de la présente étude (Chèvremont, 2008). Les cartes à 1/50 000, levées pour la plupart entre la fin des années soixante et celle des années quatre-vingt (la plus récente datant de 1988) avec une représentation répondant aux connaissances de l'époque, peuvent présenter localement des lacunes en ce qui concerne notamment les formations superficielles et leur fiabilité ponctuelle est parfois limitée. Elles ont été partiellement complétées par la consultation de la Banque des données du Sous-Sol (BSS) gérée par le Service Géologique Régional du BRGM, même si toutes les données disponibles n'ont pu être intégrées en raison de leur nombre très élevé. Les études géotechniques recueillies spécifiquement dans le cadre de la présente opération ont aussi été prises en compte pour corriger localement la carte des formations à composante argileuse. Par ailleurs, l'analyse des publications scientifiques portant sur la zone d'étude a permis d'améliorer la connaissance de la lithologie et de la minéralogie de certaines formations. Cette cartographie a été réalisée à l'échelle 1/50 000 (qui correspond donc à l'échelle de validité de la donnée brute), numérisée, puis synthétisée.

L'assemblage (illustration 5) des cartes géologiques au 1/50 000 comporte tout ou partie des 24 coupures suivantes : Gondrecourt-le-Château (266), Vézelize (267), Bayon (268), Lunéville (269), Cirey-sur-Vezouze (270), Doulaincourt (301), Neufchâteau (302), Châtenois (303), Mirecourt (304), Rambervillers (305), Saint-Dié (306), Sélestat (307), Bourmont (337), Vittel (338), Epinal (339), Bruyères (340), Gérardmer (341), Bourbonne-les-Bains (373), Monthureux-sur-Saône (374), Plombières-les-Bains (375), Remiremont (376), Munster (377), Giromagny (411), et Thann (412). Les références détaillées de ces différentes cartes géologiques sont précisées en bibliographie.

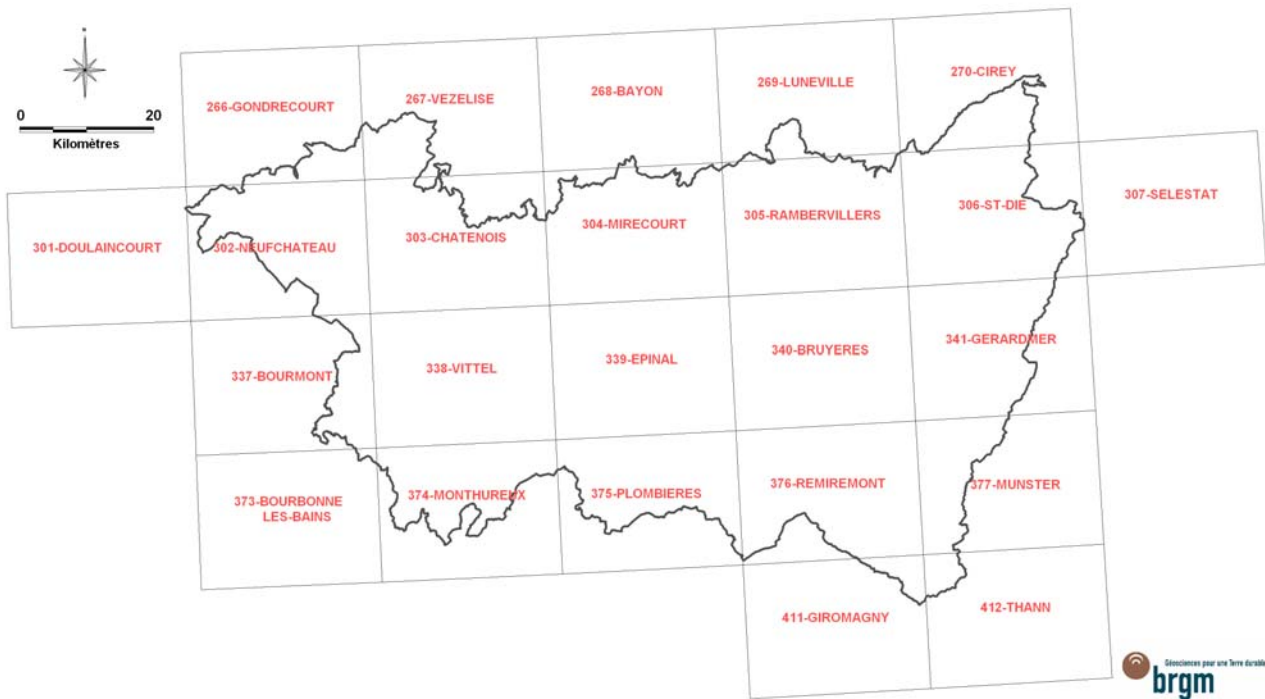


Illustration 5 – Assemblage des cartes géologiques à 1/50 000 du département des Vosges.

A partir des cartes géologiques à 1/50 000 ont été identifiées les formations argileuses et marneuses ainsi que toute formation pouvant renfermer des intercalations ou des lentilles argileuses et marneuses.

4.1.2. Méthodologie d'établissement de la carte des formations argileuses au sens large

Une carte de ces différentes formations a été établie en homogénéisant et raccordant entre elles les 24 coupures géologiques à l'échelle 1/50 000. Elle sert de support à l'élaboration de la carte finale de l'aléa retrait-gonflement.

Dans certains cas, les argiles ou marnes constituent la majeure partie de la formation retenue. C'est par exemple le cas des *Marnes à Zeilleria* et *Marnes à Amaltheus* ou des *Argiles à Promicroceras* qui présentent un faciès argilo-marneux sur la quasi-totalité de leur épaisseur. Mais, dans la majorité des cas, les formations géologiques argileuses ou marneuses du département des Vosges sont relativement hétérogènes. Il peut s'agir :

- soit de formations intrinsèquement hétérogènes, qui sont constituées d'un mélange de différents matériaux dont des argiles ou des marnes, mais également des éléments plus grossiers (limons, sables, graves...). L'argile est soit mélangée avec les autres constituants, soit présente sous la forme de niveaux individualisés, séparés les uns des autres par des lits intercalaires non argileux, répartis selon une séquence complexe et qui peut présenter des

variations spatiales. Dans ces conditions, il n'est pas possible, à l'échelle départementale, de distinguer précisément les zones contenant de l'argile de celles où elle est totalement absente. L'ensemble de ces formations par nature hétérogènes a été considéré comme argileux ;

- soit de formations à la base très peu argileuses, mais qui, du fait de leur altération, présentent en de nombreux secteurs des faciès argileux, notamment dans les premiers mètres de sol (cas notamment des *Calcaires et marnes à gryphées*). Aussi, il a été décidé de considérer l'ensemble de ces formations comme argileuses, d'autant plus qu'elles ont occasionné un nombre de sinistres non négligeable.

L'hétérogénéité de ces formations est bien sûr prise en considération lors de la caractérisation de leur susceptibilité vis-à-vis du retrait-gonflement, notamment au travers de la note lithologique.

La carte des formations argileuses des Vosges constitue finalement une représentation interprétée des zones potentiellement sujettes au phénomène de retrait-gonflement, en fonction des données actuellement disponibles au travers de la représentation cartographique des formations superficielles du département.

Vingt-et-une formations à composante argileuse sont ainsi retenues sur cette carte (Illustration 7) qui est présentée également en carte hors-texte à l'échelle 1/150 000.

4.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL

Une carte géologique très simplifiée, extraite de la carte de France à l'échelle 1/1 000 000, résume cette présentation (illustration 6). Deux entités géologiques sont présentes dans le département des Vosges, lequel est couvert sur environ 75 % de sa superficie par une unité formée de roches sédimentaires et pour le quart restant par une unité formée de roches cristallophylliennes.

L'histoire géologique de l'unité sédimentaire correspond à celle de la bordure orientale du Bassin de Paris.

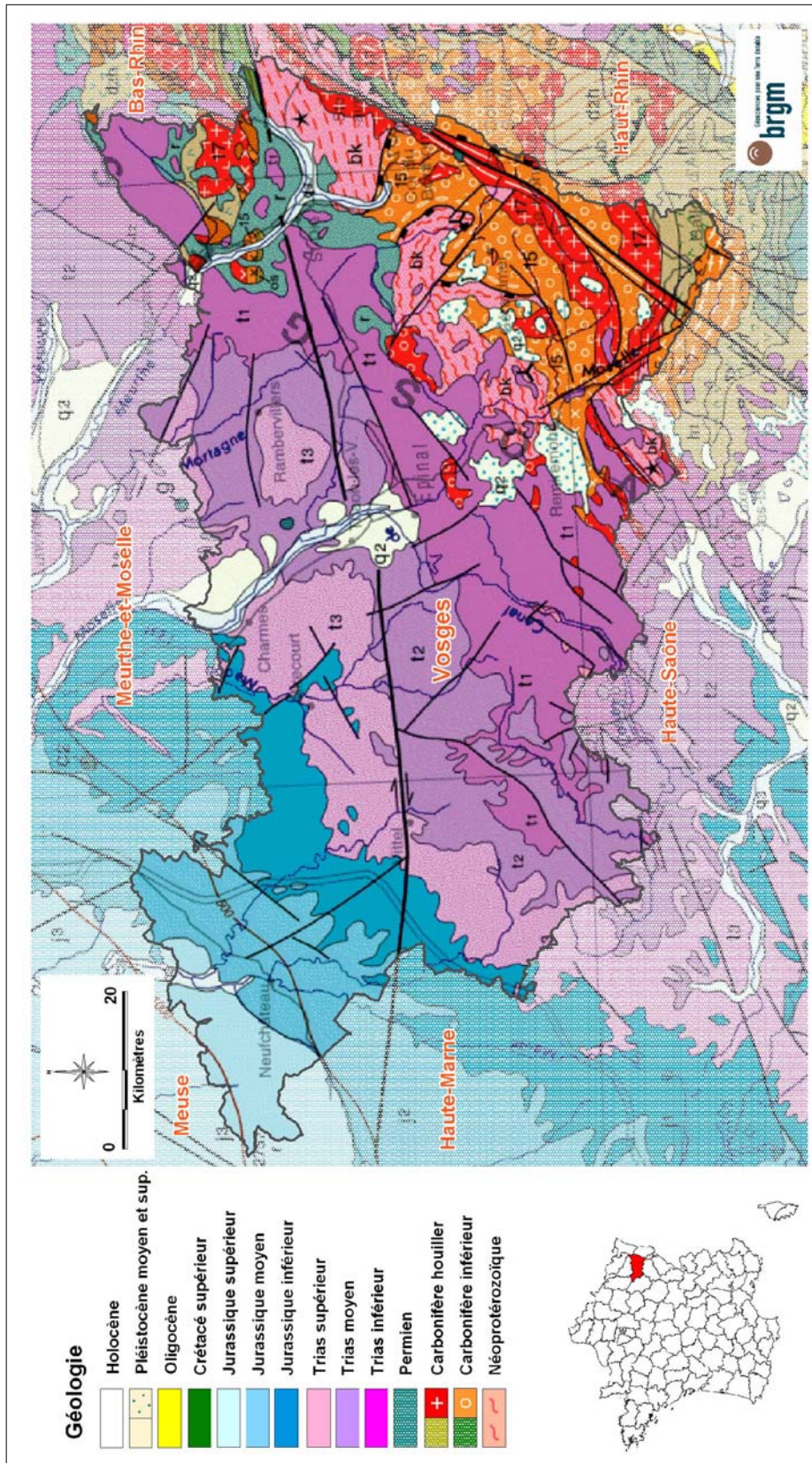


Illustration 6 – Extrait de la carte géologique de la France à 1/1 000 000.

Le bassin sédimentaire

Après l'orogénèse hercynienne, l'érosion qui se développe à la fin du Primaire transforme la bordure orientale du futur bassin en une vaste dépression ceinturée de reliefs en cours de démantèlement. Deux grands cycles sédimentaires se succèdent :

- du Permien au Keuper

Au cours du Permien, sous un climat de type tropical, les dépressions tectoniques sont comblées de formations détritiques, tandis que le Trias inférieur montre encore des faciès fluviatiles auxquels succèdent les *Grès coquilliers* du Muschelkalk inférieur.

Au Muschelkalk moyen et supérieur, la région est transgressée progressivement par la Mer germanique qui dépose en premier lieu des séries argilo-évaporitiques lagunaires, puis franchement marines, calcaires.

L'arrivée de la Lettenkohle annonce la tendance de cette mer au confinement (dolomitisation).

Lors du Keuper, le confinement du domaine marin se poursuit en régime d'aridité renforcée (faciès argilo-évaporitique des *Marnes irisées*). Le tout est entrecoupé, surtout au Keuper moyen, de courtes périodes de variations climatiques qui se traduisent par des épisodes gréseux (*Grès à roseaux*, *Grès rhétiens* ou *infraliasiques*) ou dolomitiques (*Dolomie de Beaumont*) (Durand, 1972).

- pendant le Jurassique

Au Lias, la Mer germanique progresse à nouveau vers l'ouest et réalise sa jonction avec d'autres domaines marins septentrionaux tandis que la subsidence du bassin océanique (futur Bassin de Paris) s'accroît. D'abord faible à l'Hettangien avec le faciès calcaire des *Calcaires à gryphées*, elle devient plus forte au Lotharingien (marnes et argilites à ammonites) et ne présente plus que de minces épisodes carbonatés (*Calcaire ocreux*, *Calcaire à bélemnites*). Au Pliensbachien et au Toarcien la tendance régressive est nette avec une sédimentation à dominante argileuse et gréseuse (*Argiles à Amaltheus*, *Grès médioliasiques*, *Schistes carton*, *Grès médioliasiques*, *Grès supraliasiques*).

Durant le Dogger, la région est à nouveau transgressée par pulsions successives. Une mer chaude venant du sud par le seuil morvano-vosgien instaure tout d'abord un régime complexe de plate-forme superficielle et de barrière à sédimentation essentiellement carbonatée, souvent récifale (*Calcaires à polypiers*), puis péri-récifale (*Oolithe miliaire*) qui devient franchement marine (*Marnes à rhynchonelles*, *Argiles de la Woëvre*). Les derniers dépôts émergés dans le secteur du département des Vosges datent de la fin du Jurassique.

Alors que les dépôts sédimentaires d'âge triasique semblent à première vue épais et homogènes, ceux d'âge jurassique présentent de fortes variations latérales de faciès. Ainsi, une formation peut présenter ponctuellement une dominante marno-argileuse et latéralement à courte distance une dominante de calcaire oolithique.

L'évolution est ensuite strictement continentale, avec la mise en place de la grande surface d'érosion cénozoïque et crétacée, et l'installation du réseau hydrographique en

liaison avec les mouvements épirogéniques (soulèvement des Vosges, subsidence du centre du bassin, effondrement du Fossé rhénan), puis avec le dégagement du modelé actuel (phases périglaciaires et inter-périglaciaires du Cénozoïque-Quaternaire).

Toute la tectonique du revêtement sédimentaire de la Lorraine est étroitement tributaire de son soubassement ancien. Deux accidents prennent une importance de premier plan. La faille de Metz qui marque en profondeur la limite septentrionale du bassin houiller lorrain, et la faille de Vittel, plus remarquable par sa longueur que par ses rejets toujours modestes, puisqu'elle se prolonge vers l'ouest jusqu'au Pays de Bray et vers l'est à travers les Vosges et le Fossé alsacien, jusqu'au nord de la Forêt Noire.

Le massif des Vosges

L'histoire géologique des Vosges orientales s'inscrit dans le cadre de l'évolution de la chaîne hercynienne. Si la majeure partie du territoire, environ les trois-quarts, est constituée par des formations sédimentaires datées du Buntsandstein au Séquano-Rauracien, le quart restant est formé quant à lui de roches cristallophylliennes au sens large (granites, roches volcaniques, gneiss, etc.). On retrouve également dans la partie orientale du département de nombreuses formations issues des glaciations du quaternaire. Deux ensembles sont définis (Lexa-Chomard A, Pautrot C et coll., 2006) :

- les Vosges cristallines à l'est du département, dont la génèse remonte au Paléozoïque. Ce socle est majoritairement constitué de roches plutoniques et volcaniques (vaugnérites, granite de Senones, des Crêtes, de Tholy, microgranite, granodiorite, etc....). Les autres roches présentes sont des migmatites, des gneiss ou encore des granito-gneiss ;
 - les Vosges gréseuses correspondent en grande partie au plateau de la Vôge (illustration 3). Les formations datent du Permien et du Trias inférieur (Buntsandstein).
- L'ère primaire

Au cours du Dévonien, se développe un important volcanisme au nord et au sud des Vosges, dû à la collision des deux plaques (Gondwana et Laurentia-Baltica) issues du supercontinent de la Pangée.

Lors du Carbonifère, les reliefs sont vigoureux et les altitudes importantes, accordant aux Vosges une physionomie proche de celle de l'Himalaya actuelle.

Pendant le Permien une intense érosion laisse la place à une pénéplaine ; les granites servent alors de substratum à la sédimentation alluviale ou éolienne de démantèlement de cette chaîne.

La fin du Paléozoïque voit le comblement des principales dépressions résultant de l'orogénèse hercynienne. Les bassins d'accumulation sédimentaire, notamment ceux de Saint-Dié, du Val d'Ajol, et de Giromagny en témoignent.

- L'ère Secondaire

Le relatif calme tectonique et les sédimentations d'origines diverses favorisent le dépôt de puissantes séries sédimentaires affectées d'un pendage faible vers l'ouest (formation de la bordure orientale du Bassin de Paris).

Il est toutefois probable, qu'à la fin du Jurassique, la région correspondant à l'emplacement actuel du département des Vosges soit temporairement immergée.

- Le Tertiaire

La mise en place de la chaîne alpine au cours du tertiaire relève les Vosges et l'érosion amène une nouvelle fois à l'affleurement les formations cristallines du socle hercynien. La vieille pénéplaine post-hercynienne fossilisée sous ses dépôts sédimentaires permien est ainsi affectée et « cassée » en blocs jouant les uns par rapport aux autres. Ainsi peut s'expliquer la double dissymétrie du relief, une élévation plus importante du massif dans sa partie sud, et un flanc occidental qui dessine un vaste plan incliné descendant progressivement vers le Bassin parisien, par opposition à un flanc oriental plongeant de manière abrupte vers le Fossé rhénan.

L'érosion de la couverture sédimentaire a conduit, en particulier au sud du massif, à la mise à l'affleurement des granites, schistes et gneiss, individualisant ainsi les Hautes-Vosges cristallines. Cette surface « exhumée » est par conséquent une surface tronquée, c'est-à-dire présentant un hiatus stratigraphique total ou partiel. Au nord et à l'ouest, la couverture gréseuse encore en place forme ainsi les Basses-Vosges gréseuses.

- Le Quaternaire

Le Pléistocène est caractérisé par des changements climatiques très importants, rythmés par la succession de périodes glaciaires et interglaciaires, dont les dernières ont laissé des témoignages très importants dans le Massif vosgien, alors recouvert par les glaciers (Flageollet, 2002).

4.3. LITHOSTRATIGRAPHIE DES FORMATIONS ARGILEUSES AU SENS LARGE

Ce chapitre dresse l'inventaire des formations géologiques argileuses au sens large du département des Vosges retenues dans le cadre de cette étude (illustration 7). Une brève description en est ici présentée, basée principalement sur les notices géologiques à l'échelle du 1/50 000, ainsi que sur la Synthèse géologique du Bassin de Paris (Mégny, 1980) pour la partie spécifique à la Lorraine.

Les formations sont décrites depuis les plus récentes jusqu'aux plus anciennes.

4.3.1. Formations superficielles du Quaternaire

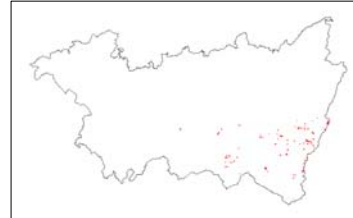
Seules ont été retenues celles dont la nature, la situation ou l'extension le justifient. Certaines formations quaternaires telles les formations limoneuses, glaciaires et d'altération se présentent sous la forme soit de lambeaux localisés, soit d'une véritable couverture dont l'épaisseur peut varier de quelques décimètres à plusieurs mètres, mais elles peuvent ainsi ne pas être représentées sur les cartes géologiques.

En effet, une carte géologique est une représentation interprétative correspondant à des critères de choix du ou des auteurs en fonction des attentes de la communauté scientifique à l'époque de la réalisation de la carte.

De plus, l'échelle du 1/50 000 est souvent mal adaptée à la représentation de plaquages superficiels de faible extension, constitués d'argiles d'altération qui peuvent s'exprimer sous différentes formes : poche d'argile, karst, zone fracturée, lentille de colluvions, etc.

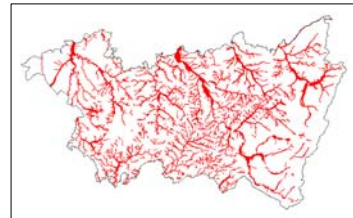
4.3.1.1. Dépôts tourbeux [Tz]

Ont été groupés dans cet ensemble : des tourbes franches et des dépôts plus ou moins tourbeux. La plupart de ces formations sont des tourbières à Sphaigne, fossiles ou actuelles, et sont généralement de faible extension. Bien que d'épaisseur moyenne inférieure à 2 mètres, les tourbières peuvent localement dépasser 5 mètres (tourbières du Rosely).



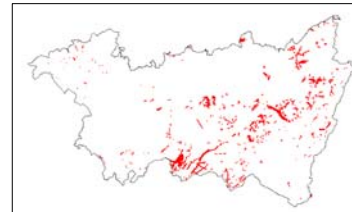
4.3.1.2. Alluvions fluviales récentes à actuelles, Holocène [Fz]

Les alluvions récentes sont essentiellement formées de matériaux fins : argiles, limons, sables, parfois mêlés à des matériaux grossiers, et résultent essentiellement des apports et remaniements qui se produisent lors des inondations saisonnières. Leur épaisseur moyenne est de l'ordre de 1 mètre, mais elles peuvent dépasser 10 mètres par endroit.



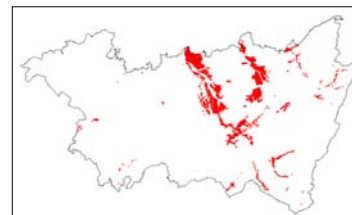
4.3.1.3. Dépôts de versants : éboulis, colluvions, Holocène [E]

Ces dépôts masquent le substrat. Les éboulis sont formés de débris rocheux hétérométriques, le long du socle cristallin, et montrent souvent une alternance de lits grossiers et fins qui n'est pas sans rappeler la disposition des grouines calcaires fréquentes en Lorraine. Ils témoignent de l'importance des phénomènes cryoclastiques des périodes froides. Les colluvions sont surtout formées de sables et d'argiles enrobant des matériaux grossiers en proportions variables. L'épaisseur de ces dépôts peut atteindre 20 mètres.



4.3.1.4. Alluvions anciennes, Pléistocène [Fx-y]

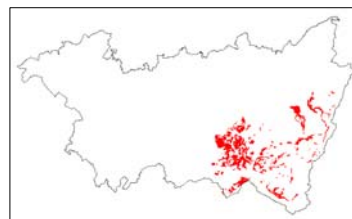
Des lambeaux de hautes et basses terrasses ont été caractérisés entre la vallée de la Vraine et celle du Vair. Ces alluvions sont formées par un matériau limono-argileux ou limono-sableux de couleur rougeâtre à lie-de-vin. On rencontre également dans cette couche limoneuse de nombreuses passées riches en galets de quartz et de quartzite. Les alluvions



anciennes ont une épaisseur variant de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres.

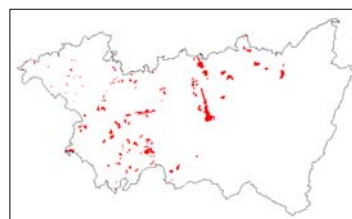
4.3.1.5. Formations fluvio-glaciaires, Pliocène-Pléistocène [G]

Le terme fluvio-glaciaire est utilisé ici au sens large, et considère principalement les alluvions et formations déposées par les eaux de fusion des glaciers. Ces formations sont surtout développées dans les vallées où l'amont a été fortement englacé. A l'exception des passées sableuses et de certains deltas glacio-lacustres sableux, les formations fluvio-glaciaires sont généralement très grossières. Leur mauvais tri et l'importance relative de la matrice sableuse ou sablo-argileuse, n'est pas sans rappeler les moraines.



4.3.1.6. Limons de plateaux et ferricrètes, Pléistocène à Holocène [LP-F]

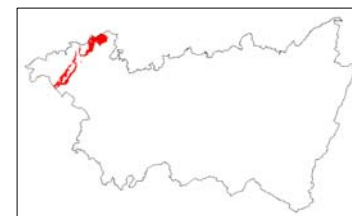
Les limons résultent de l'altération des calcaires avec dépôts d'un résidu à constituant de base argileux. Ils sont de teinte brune, beige clair à roux. Leur épaisseur de plusieurs décimètres peut exceptionnellement atteindre 2 à 3 mètres, en fonction du substratum sous-jacent. Certains placages sont riches en grains et plaquettes de limonite (fer fort).



4.3.2. Formations du Jurassique

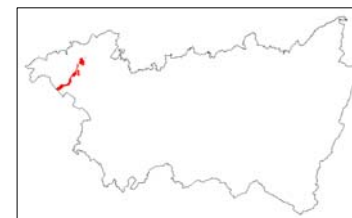
4.3.2.1. Argiles de la Woëvre, Callovien-Oxfordien [j4-5]

Ces argiles épaisses de 50 à 120 m selon les endroits, se biseautent vers le sud-ouest, alors qu'elles atteignent de 115 à 120 mètres vers Neufchâteau. Argiles plastiques de teinte gris-bleu, elles alternent parfois avec quelques bancs calcaires marneux très fossilifères (ammonites pyriteuses et *Liogryphéa dilatata* Sow.). Ces dépôts argileux marquent l'enneigement généralisé des plates-formes carbonatées développées au cours du Dogger.

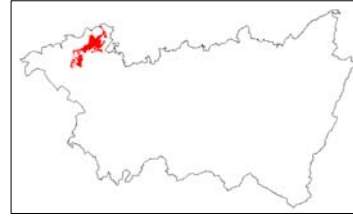


4.3.2.2. Dalle nacrée et calcaires oolithiques, Callovien inférieur [j3-4]

Le Callovien débute avec un horizon qui subit d'importantes variations de faciès. Dans la région de Neufchâteau, il s'agit même de marnes et de marno-calcaires sablo-micacés, feuilletés plus ou moins argileux. A Liffol-le-Grand, apparaît un brutal changement de faciès, c'est la dalle nacrée qui prévaudra au sud. Ce passage latéral des marnes au calcaire se fait par des lentilles marneuses sablo-micacées.

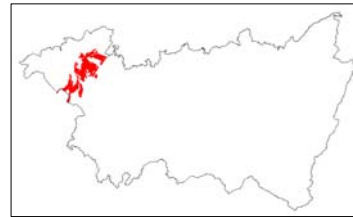


4.3.2.3. Marnes à rhynchonelles, Bathonien moyen à supérieur [j3b-c]



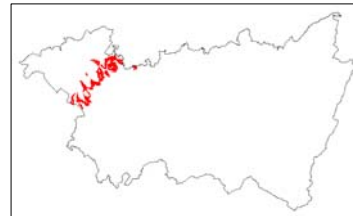
Ces Marnes sont essentiellement marno-argileuses et sont caractérisées par la présence de brachiopodes, les rhynchonelles. Les Caillasses à *Anabacia* peuvent être à la base de cet étage et disparaissent au nord de Neufchâteau (feuille de Vézelize). Au sud-ouest d'une ligne Neufchâteau / Bazoilles, la lithologie passe à un calcaire franchement compact. C'est pourquoi il a été décidé de ne conserver que la partie septentrionale de cette formation dans la carte des formations argilo-marneuses.

4.3.2.4. Marnes de Longwy, Marnes à Liostrea acuminata, Bajocien moyen [j2c]



Cette mince séquence est constituée d'un complexe marno-calcaire oolithique à passées argileuses parfois très fossilifère de quelque mètres de puissance. Les *Marnes de Longwy* disparaissent progressivement du nord-est au sud-ouest de la Lorraine par biseutage stratigraphique, et sont alors remplacées par un calcaire oolithique compact. Le changement de faciès s'effectue vers Neufchâteau, où la séquence initiale laisse place aux *Marnes à Liostrea acuminata*, que l'on retrouve en Haute-Marne.

4.3.2.5. Schistes carton, Marnes à septaria et Grès supraliasiques, Toarcien [l4]



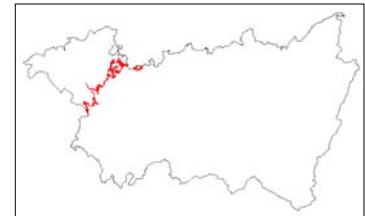
Le Toarcien est constitué par une série essentiellement argilo-marneuse de trois couches distinctes dont les limites ne sont que très rarement observables dans le paysage, du fait de la végétation.

Au sommet de la série, le *Grès supraliasique* est représenté par un calcaire plus ou moins gréseux ou argileux (ces grès peuvent être désignés par les termes de grès argilo-micacés, de calcaire sableux ou encore de marnes gréseuses micacées). Leur puissance atteint une dizaine de mètres en Lorraine centrale.

Les *Marnes à septaria*, qui leur succèdent, sont formées d'argiles sableuses gris-bleu micacées contenant des nodules ou des bancs calcaires. Leur épaisseur varie de 40 à 60 mètres dans toute la Lorraine.

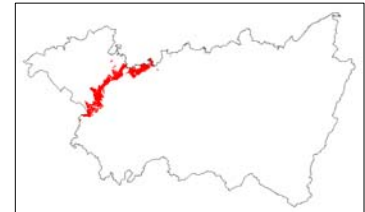
Enfin, à la base, se rencontrent les *Schistes carton*, qui sont des shales pyriteux et bitumineux, dont la matrice de teinte sombre est constituée d'argile et de matière organique. Bien que très compactes à l'état sain, ces argiles deviennent friables lors de leur altération, et se transforment alors rapidement en argiles plastiques où subsistent quelques nodules résiduels. Cette altération provoque des problèmes de stabilité de pentes et des désordres causés par le gonflement (Rakotondratsima, 1995 ; Montjoie et Schroeder, 2007).

4.3.2.6. Grès médioliasiques, Domérien supérieur [I3c]



Dans les Vosges, les *Grès médioliasiques* sont des calcaires plus ou moins gréseux parfois massifs, finement micacés. Leur épaisseur varie entre 16 et 18 mètres. Ces grès sont de teinte jaunâtre ou ferrugineuse en surface et gris bleu à gris clair en profondeur. Des variations latérales de faciès accroissent localement la proportion des intercalations marneuses (Aouze – Imbrécourt).

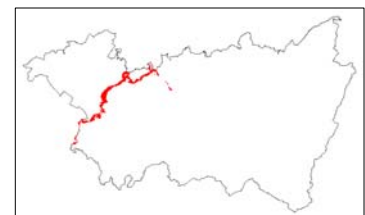
4.3.2.7. Marnes à Zeilleria et Marnes à Amaltheus, Carixien à Domérien inférieur [I2-3a]



La couche des *Marnes à Amaltheus* du Domérien inférieur est constituée d'argilites silteuses plus ou moins micacées, fossilifères en Lorraine centrale. Ces marnes sont bien représentées au pied de la cuesta correspondant à la côte de Moselle, et ont une puissance de plusieurs dizaines de mètres. Les argilites de cette série fluent où elles affleurent, selon la pente et leur niveau d'altération.

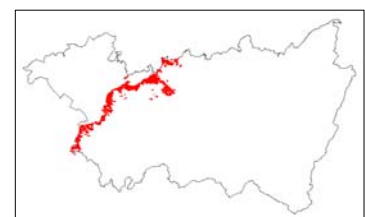
Les *Marnes à Zeilleria* (*Zeilleria numismalis*), sont des marnes schisteuses d'épaisseur variable entre 1 et 13 mètres. Elles peuvent être localement absentes.

4.3.2.8. Argiles à Promicroceras, Lotharingien [I2b1]



Les *Argiles à Promicroceras* sont des argilites feuilletées gris-bleu, parfois sableuses, finement micacées, à nodules calcaires souvent phosphatés. La puissance de la formation diminue du nord au sud de la Lorraine. D'une cinquantaine de mètres en Moselle, elle n'est plus que de 20 mètres dans les Vosges. Les affleurements sont rares et souvent temporaires.

4.3.2.9. Calcaire et marnes à gryphées, Hettangien-Sinémurien [I1-2a]

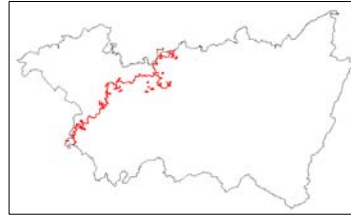


Formation typique dans toute la Lorraine, le *Calcaire à gryphées* correspond à une alternance monotone de calcaire et de marnes gris-bleu à passées pyriteuses et bitumineuses, généralement très fossilifère (*Gryphæa arcuata*) à la limite des bancs calcaires. L'épaisseur des bancs marno-argileux est généralement inférieure à 50 centimètres mais peut atteindre 2 mètres en Lorraine septentrionale. La puissance globale de la formation est d'environ 40 mètres.

4.3.3. Formations du Trias

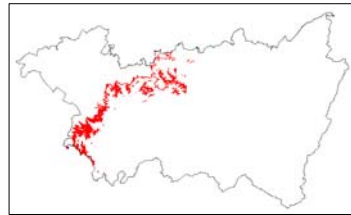
4.3.3.1. Argilites rouges de Levallois, Rhétien supérieur [t7b]

Argilites rouges lie-de-vin, d'une puissance moyenne de 4 à 10 m en Lorraine centrale, pratiquement azoïques, onctueuses au toucher, souvent feuilletées, elles constituent un ensemble homogène. Bien que les coupes de bonne qualité soient très rares, leur faciès caractéristique fait de ces argilites un niveau repère cartographique remarquable sur toute la Lorraine.



4.3.3.2. Grès infraliasiques, Rhétien inférieur [t7a]

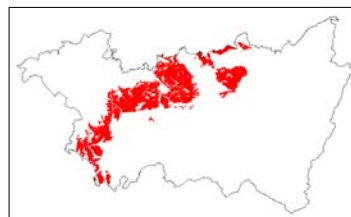
Sous un amas de schistes noirs plus ou moins friables et altérables en paillettes après exposition à l'air, grasses au toucher et de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur, se présente un massif de grès quartzeux blanchâtre, jaunâtre ou grisâtre constituant un banc massif d'une puissance de 10 mètres environ dans les Vosges. Ces grès sont parfois faiblement micacés, à ciment légèrement calcaire ou siliceux, pyriteux avec débris de ligneux, lardé de joints argileux verts et noirs. Au nord de Bulgnéville, les argiles noires sont prépondérantes et le massif gréseux ne subsiste que par quelques bancs minces intercalés de schistes noirs.



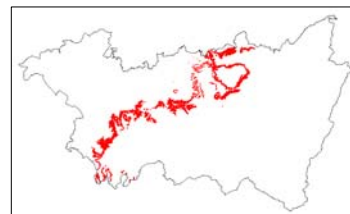
4.3.3.3. Marnes irisées et Grès à roseaux, Keuper moyen et supérieur [t6d]

Le groupe des Marnes irisées comprend trois ensembles :

- les *Marnes irisées supérieures* sont constituées d'une succession de marnes plus ou moins argileuses ou dolomitiques, friables et bariolées. La partie sommitale correspond aux *Argiles bariolées dolomitiques* qui sont des marnolites verdâtres, violacées, rougeâtres, lilas, avec intercalations de bancs minces de dolomie marneuse gris verdâtre ou jaunâtre. En dessous de trouvent les *Argiles rouges de Chanville*, renfermant du gypse et de l'anhydrite (minéraux souvent éliminés par dissolution) dont l'épaisseur d'une dizaine de mètres est constante sur la majeure partie de la région, mais diminue cependant au sud, pour disparaître aux abords de Mirecourt ;
- les *Marnes irisées moyennes*, où sont représentées les *Argiles bariolées intermédiaires* ainsi que les *Grès à roseaux*. Ces derniers sont des grès fins micacés plus ou moins argileux, de couleur gris verdâtre à rougeâtre, et présentent une puissance d'environ 12 mètres. On y recense des empreintes de débris végétaux (*Equisetum*, *Calamites*) ;
- les *Marnes irisées inférieures* dessinent un puissant massif marneux et gypseux (100 à 200 mètres d'épaisseur). Ces marnes sont de couleur variable et contiennent de nombreuses couches, lentilles ou amas de dolomie, de gypse et d'anhydrite.

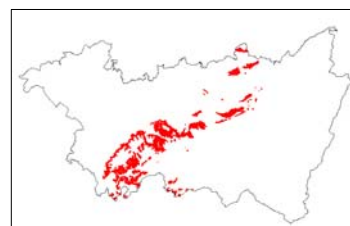


4.3.3.4. Dolomies et argiles de la Lettenkohle, Keuper inférieur et Lettenkohle [t6a]



Les argiles de la Lettenkohle, aussi appelées *Marnes à plantes*, constituent une masse intercalée entre deux niveaux de dolomie. Le lithofaciès le plus fréquent est une argilite feuilletée vert-noirâtre, très pauvre en carbonates. Les argiles passent souvent vers le haut à des silts, parfois des grès fins, micacés, plus ou moins riches en débris végétaux ligniteux. L'épaisseur varie de 15 à 20 mètres en moyenne en Lorraine septentrionale, jusqu'à moins de 10 mètres vers les Vosges.

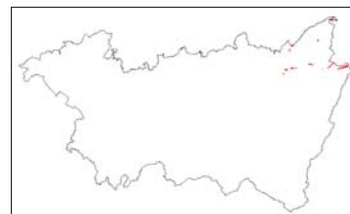
4.3.3.5. Couches grises et Couches rouges, Muschelkalk moyen [t4]



Les *Couches grises* sont des marnes plus ou moins dolomitiques, surtout dans leur partie supérieure, renfermant des niveaux salifères (gisements exploités), de l'anhydrite en bancs massifs et du gypse. Les puissances extrêmes varient de 10 à 80 mètres. Le passage au niveau inférieur se distingue par le changement de couleur très brutal lié à la variation de faciès.

Les *Couches rouges*, localement appelées *Argiles de Pexonne*, sont des argiles bariolées rouges (teinte dominante), vertes et grises, très finement micacées, à imprégnations gypseuses et passées sablo-gréseuses et/ou dolomitiques. Leur épaisseur est généralement comprise entre 20 et 25 mètres.

4.3.3.6. Schistes et grauwackes, Ordovicien-Dévonien [s]



Localisés sur la feuille de Cirey-sur-Vezouze, les schistes noirs et les grauwackes ont subi un métamorphisme thermique lié à la mise en place des formations granitiques.

Les schistes de Steige et de Saint-Michel-sur-Meurthe (feuille de Saint-Dié), s'étendent de l'est jusqu'à la plaine d'Alsace bien qu'ils n'affleurent que sur 5 kilomètres dans le département des Vosges. Les schistes de Saint-Michel-sur-Meurthe, plus anciens que les schistes de Steige (Silurien), sont fait de minéraux argileux (phyllosilicate) et de quartz, avec des pigments ferrugineux dont le degré d'oxydation peut donner une alternance de lits verts ou violets. Cette bande de schistes est suivie plus à l'est par la série métamorphique de Villé qui va du schiste noir aux schistes noduleux micacés.

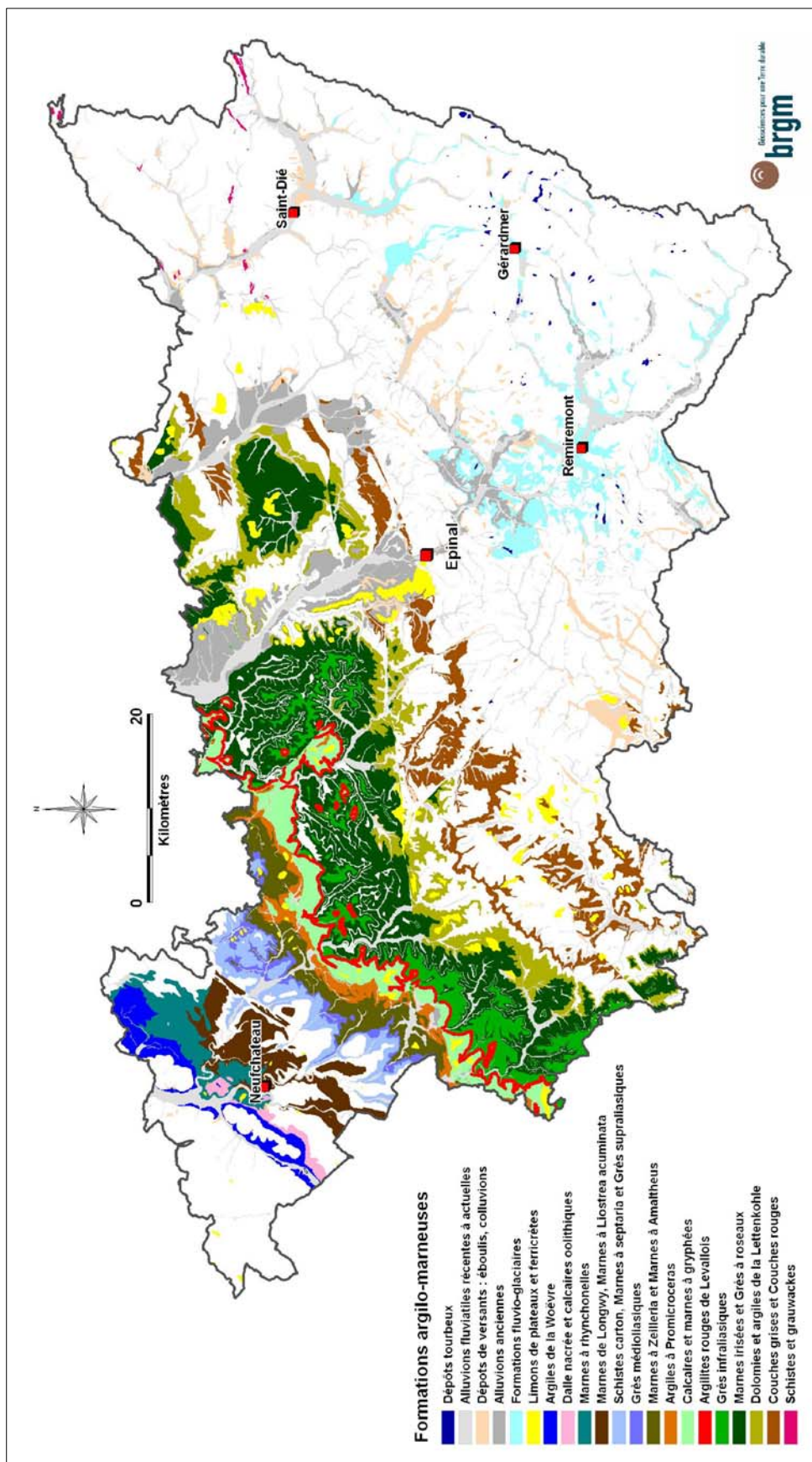


Illustration 7 – Carte départementale synthétique des formations argilo-marneuses.

5. Caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique des formations retenues

5.1. CRITÈRES DE HIÉRARCHISATION

5.1.1. Critères retenus

Les critères retenus pour l'élaboration de la carte de susceptibilité au phénomène de retrait-gonflement concernent la nature lithologique des formations affleurantes à sub-affleurantes, la minéralogie de leur phase argileuse et le comportement géotechnique du matériau. La carte de susceptibilité ainsi élaborée correspond donc à une hiérarchisation des formations géologiques identifiées, en prenant en compte uniquement ces trois critères.

En effet, d'autres critères de susceptibilité à l'aléa retrait-gonflement, tels que le contexte hydrogéologique, la topographie, la végétation ou le type de fondation du bâti, n'ont pas été pris en compte, la plupart de ces facteurs n'intervenant que de manière très locale et ne pouvant par conséquent être cartographiés à l'échelle départementale.

5.1.2. Méthode de classification

Rappelons que le document de base utilisé pour élaborer la carte de susceptibilité est la carte synthétique des formations argileuses et marneuses du département (illustration 7), laquelle a été établie en tenant compte essentiellement de la nature lithologique des formations.

La seconde étape de cette cartographie consiste à hiérarchiser les formations argileuses et marneuses ainsi identifiées, en fonction de leur plus ou moins grande susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Cette hiérarchisation est basée sur la prise en compte de caractéristiques déterminées, estimées pour chacune des vingt-et-une formations sélectionnées :

- la nature lithologique des terrains constituant en majorité la formation ;
- la composition minéralogique de sa phase argileuse, évaluée à partir de la proportion de minéraux gonflants (smectites et interstratifiés) ;
- le comportement géotechnique du matériau, évalué à partir de la réactivité du sol vis-à-vis de l'eau, caractérisée par la valeur de bleu, et dans une moindre mesure par l'importance du retrait possible (mesures de retrait linéaire) en cas de dessèchement, ainsi que par l'étendue de son domaine plastique, évaluée par son indice de plasticité.

Dans le but d'obtenir un moyen pratique de hiérarchisation entre les différentes formations, la règle adoptée a consisté à utiliser des *valeurs seuils*, couramment admises dans la littérature, distinguant quatre degrés de susceptibilité (faible, moyenne, forte et très forte). Pour permettre la réalisation de calculs, les grandes classes lithologiques distinguées ont également été affectées d'une note. Les

caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique des vingt-et-une formations sont successivement présentées dans les paragraphes suivants.

Les sources des données ici présentées proviennent du BRGM et de la bibliographie scientifique, mais également de l'aimable collaboration volontaire de bureaux d'études et organismes privés ou publics. Les dossiers ont été en partie transmis par les communes en retour de courrier d'enquête, et en partie consultés en archives soit directement auprès de certains bureaux d'étude (ANTEA, GEOTEC, Fondasol), soit auprès de l'administration (service de protection civile à la préfecture, DDE, CETE, Caisse Centrale de Réassurance), soit auprès de certaines assurances (MAIF, MATMUT).

5.2. CRITÈRE LITHOLOGIQUE

5.2.1. Définition du critère lithologique et barème

Ce premier critère, de nature essentiellement qualitative, est utilisé pour caractériser la lithologie des matériaux dominants dans la formation. Il permet de distinguer les terrains essentiellement argileux, de ceux où l'argile est minoritaire. Ce critère intègre donc l'hétérogénéité des formations. L'épaisseur de la formation entre également en ligne de compte, puisque les formations argileuses peu épaisses présentent un potentiel de retrait ou de gonflement moindre que les formations puissantes. Par convention, la note maximale est attribuée à une argile ou une marne épaisse et continue et la note minimale à une formation hétérogène, présentant des termes argileux non prédominants et discontinus, par exemple sous forme de poches ou de lentilles.

Cette caractérisation lithologique des formations est établie sur la base de l'expertise du géologue régional et ne peut être totalement dépourvue d'une certaine subjectivité dans son appréciation. Le barème utilisé pour distinguer les différentes classes lithologiques est précisé dans le tableau de l'illustration 8.

5.2.2. Caractérisation lithologique des formations argileuses ou marneuses du département des Vosges

La note lithologique de chacune des formations argileuses ou marneuses a été déterminée à partir des notices des différentes cartes géologiques à 1/50 000 et de la Synthèse géologique du Bassin de Paris (Mégny, 1980), dont on retrouve les principaux éléments dans le paragraphe 4.3. Les notes lithologiques attribuées à chacune des vingt-et-une formations sont présentées sur l'illustration 9.

Au final, trois formations obtiennent une note de 4, qui qualifie les formations essentiellement argileuses continues de plus de 3 m d'épaisseur. Il s'agit des *Argiles de la Woëvre*, des *Schistes carton*, *Marnes à septaria* et *Grès supraliasiques* et des *Argiles à Promicroceras*.

Une note de trois a été attribuée à cinq formations, au regard de la composante argileuse qui est dominante au sein de la formation.

Six formations ont reçu une note lithologique de 2, ce qui signifie que le terme argileux n'y est pas prédominant.

Enfin, la note minimale de 1 a été attribuée à sept formations, car l'argile y est minoritaire par rapport aux autres éléments plus grossiers.

Type de formation	Susceptibilité	Note lithologique
Formation non argileuse mais contenant localement des passées ou des poches argileuses (ex : alluvions avec lentilles argileuses, calcaire avec poches karstiques, ...)	faible	1
Formation présentant un terme argileux non prédominant de type calcaire argileux ou sable argileux	moyenne	2
Formation à dominante argileuse, présentant un terme ou une passée non argileuse (ex : alternance marno-calcaire ou sablo-argileuse) ou très mince (moins de 3 m)	forte	3
Formation essentiellement argileuse ou marneuse, d'épaisseur supérieure à 3 m et continue	très forte	4

Illustration 8 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la nature lithologique de la formation géologique

N°	Code	Nom de la formation argileuse	Note lithologique
1	Tz	Dépôts tourbeux	3
2	Fz	Alluvions fluviales récentes à actuelles	1
3	E	Dépôts de versants : éboulis, colluvions	1
4	Fx-y	Alluvions anciennes	1
5	G	Formations fluvioglaciales	1
6	LP-F	Limons de plateaux et ferricrètes	2
7	j4-5	Argiles de la Woèvre	4
8	j3-4	Dalle nacrée et calcaires oolithiques	1
9	j3b-c	Marnes à rhynchonelles	3
10	j2c	Marnes de Longwy, Marnes à Liostrea acuminata	2
11	l4	Schistes carton, Marnes à septaria et Grès supraliasiques	4
12	l3c	Grès médioliasiques	1
13	l2-3a	Marnes à Zeilleria et Marnes à Amaltheus	3
14	l2b1	Argiles à Promicroceras	4
15	l1-2a	Calcaires et marnes à gryphées	2
16	t7b	Argilites rouges de Levallois	3
17	t7a	Grès infraliasiques	2
18	t6d	Marnes irisées et Grès à roseaux	2
19	t6a	Dolomies et argiles de la Lettenkohle	2
20	t4	Couches grises et Couches rouges	3
21	s	Schistes et grauwackes	1

Illustration 9 – Note lithologique des formations argileuses retenues

5.3. CRITÈRE MINÉRALOGIQUE

5.3.1. Définition du critère minéralogique et barème

Les phénomènes de retrait-gonflement s'expriment préférentiellement en présence des minéraux argileux appartenant au groupe des smectites (montmorillonite, beidellite, nontronite, saponite, hectorite, sauconite) et, dans une moindre mesure, au groupe des interstratifiés, alternance plus ou moins régulière de feuillets de natures différentes, par exemple smectites/illite ou illite/smectites. La caractérisation minéralogique des argiles se détermine par des analyses de diffractométrie aux rayons X.

Le critère minéralogique est basé sur le pourcentage moyen de minéraux gonflants (smectites et interstratifiés) présents dans la phase argileuse. Les notes de 1 à 4 sont attribuées en fonction des coupures suivantes (illustration 10) :

% moyen de minéraux gonflants	Susceptibilité	Note minéralogique
< 25 %	faible	1
25 à 50 %	moyenne	2
50 à 80 %	forte	3
> 80 %	très forte	4

Illustration 10 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la minéralogie de la phase argileuse de la formation géologique

5.3.2. Source des données

D'une façon générale, les dossiers de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ne présentent aucune caractérisation qualitative et quantitative des minéraux argileux composant les formations géologiques identifiées comme sensibles. De rares rapports d'expertise de bâti sinistré, réalisés à la demande des compagnies d'assurance, indiquent parfois la nature minéralogique des argiles mais généralement sans la quantifier.

Très peu d'informations ont pu être extraites de la bibliographie sur ce thème. Concernant les dossiers consultés, seuls les rapports du bureau d'étude ANTEA contenaient des données minéralogiques exploitables pour l'étude. Malgré tout, leur nombre insuffisant n'a pas permis de caractériser l'ensemble des formations. Une campagne d'échantillonnage spécifique a dû être effectuée dans le cadre de la présente étude.

Ainsi, quarante-trois prélèvements (en moyenne deux par formation), ont fait l'objet d'une analyse diffractométrique aux rayons X. La méthode utilisée est présentée en annexe 5 avec les résultats détaillés.

Rappelons que cet échantillonnage, bien que trop limité pour pallier l'hétérogénéité des formations en question, donne tout de même des indices fiables et réels sur la composition minéralogique de ces formations. Seules les formations alluvionnaires

n'ont pas fait l'objet de prélèvement, car les données issues des études réalisées dans les départements voisins ont été jugées suffisantes.

N°	Code	Nom de la formation argileuse	Points		
			P1	P1(reserve)	
1	Tz	Dépôts tourbeux	P1	P1(reserve)	
2	Fz	Alluvions fluviatiles récentes à actuelles	non prélevés		
3	E	Dépôts de versants : éboulis, colluvions	P3	Peb	
4	Fx-y	Alluvions anciennes	non prélevés		
5	G	Formations fluvioglaciaires	P5abis	P5b	Pmo
6	LP-F	Limons de plateaux et ferricrètes	P6abis	P21abis	P21bbis
7	j4-5	Argiles de la Woèvre	P7a	P7b	
8	j3-4	Dalle nacréée et calcaires oolithiques	P8abis	P8b	
9	j3b-c	Marnes à rhynchonelles	P9a	P9b	
10	j2c	Marnes de Longwy, Marnes à Liostrea acuminata	P10a	P10bbis	
11	l4	Schistes carton, Marnes à septaria et Grès supraliasiques	P11b	Psc	
12	l3c	Grès médioliasiques	P12abis	P12bbis	
13	l2-3a	Marnes à Zeilleria et Marnes à Amaltheus	P13a	P13b	
14	l2b1	Argiles à Promicroceras	P14abis	P14b	
15	l1-2a	Calcaires et marnes à gryphées	P15b	P15abis	
16	t7b	Argillites rouges de Levallois	P16b	Pal	P16quat
17	t7a	Grès infraliasiques	P17bbis	P17quat	
18	t6d	Marnes irisées et Grès à roseaux	P18bbis	P18a	
19	t6a	Dolomies et argiles de la Lettenkohle	P19a	P19bbis	
20	t4	Couches grises et Couches Rouges	P20abis	P20bbis	
21	s	Schistes et grauwackes	P22a	P22bbis	

Illustration 11 – Répartition par formation argileuse des échantillons prélevés pour analyse

La localisation des prélèvements effectués est précisée sur la carte de l'illustration 12. Les résultats des analyses diffractométriques aux rayons X sont résumés dans l'illustration 13 et présentés de manière plus détaillée en annexe 5.

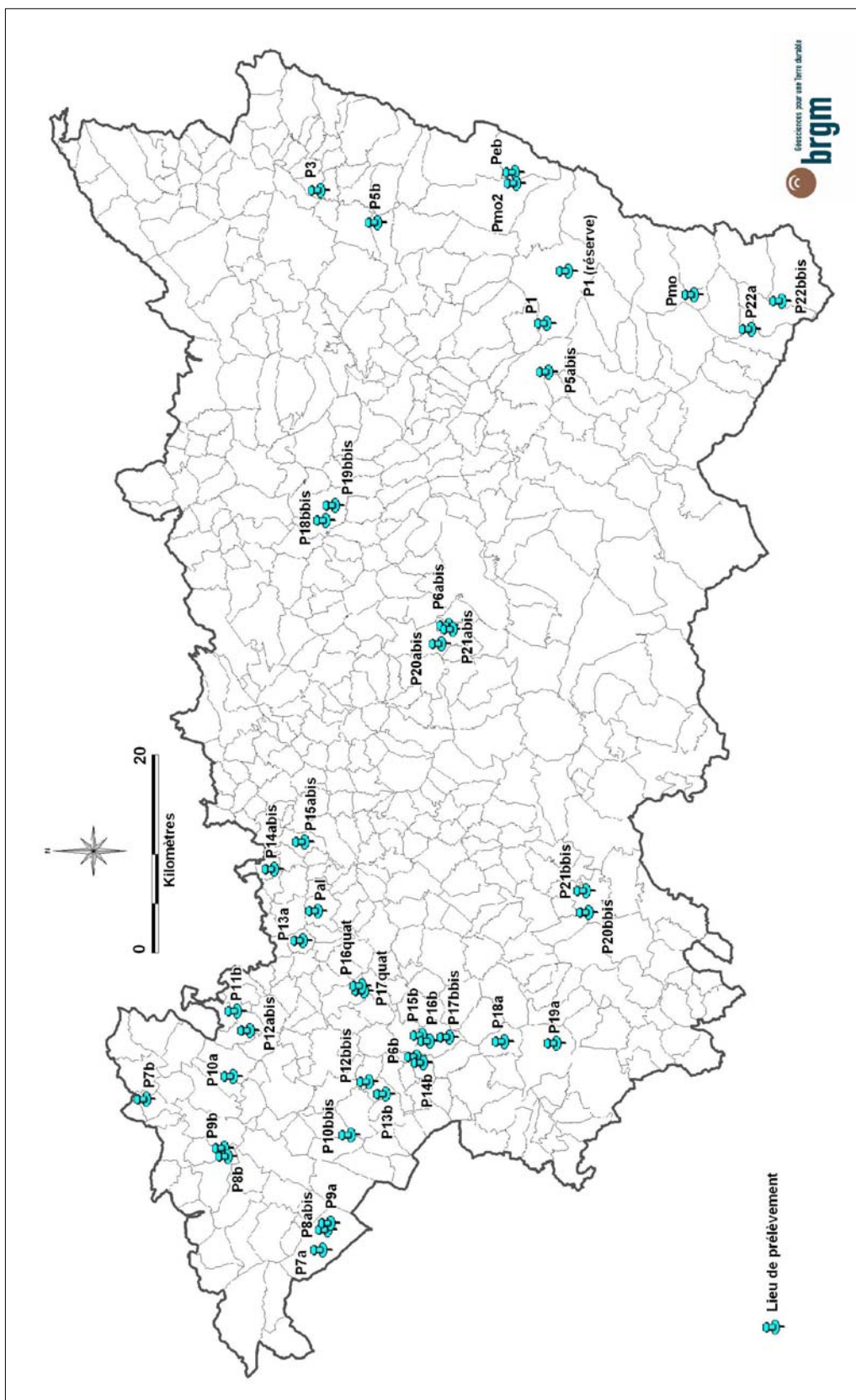


Illustration 12 – Localisation des prélèvements réalisés pour analyse minéralogique

Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux pour le département des Vosges

N°	Code	Nom de la formation géologique	Source	illite	l-non gonflants / vermiculite	Chlorite	kaolinite	Minéraux gonflants (smectite + I-S)	Moyenne
1	Tz	Dépôts tourbeux	P1	-	-	-	-	-	-
			P1 (res)	-	-	-	-	-	
2	Fz	Alluvions fluviales récentes à actuelles	Rg52	20	0	5	30	45	45,8
			Rg57	26	8	7	11	47,5	
			Rg55	19	0	11	25	45	
3	E	Dépôts de versants : éboulis, colluvions	P3	27	35	10	14	14	15,5
			Peb	33	20	15	15	17	
4	Fx-y	Alluvions anciennes	Rg52	15	0	10	20	55	51,3
			Rg57	26	0	9	31	34	
			Rg55	12,5	0	0	22,5	65	
5	G	Formations fluvioglaciales	Pmo	46	10	21	10	13	8,0
			Pmo2	53	10	11	12	14	
			P5abis	60	15	11	9	5	
			P5b	15	50	20	15	0	
6	LP-F	Limons de plateaux et ferricrètes	P6abis	21	25	12	21	21	16,5
			P6b	15	0	15	25	45	
			P21abis	35	20	10	35	0	
			P21bbis	54	10	3	33	0	
7	j4-5	Argiles de la Woèvre	P7a	10	15	10	28	37	41,5
			P7b	19	15	6	14	46	
8	j3-4	Dalle nacrée et calcaires oolithiques	P8abis	40	0	5	30	25	34,5
			P8b	17	0	4	35	44	
9	j3b-c	Marnes à rhynchonelles	P9a	33	0	8	25	34	44,5
			P9b	20	0	10	15	55	
10	j2c	Marnes de Longwy, Marnes à Liostrea acuminata	P10a	13	24	10	33	20	35,0
			P10bbis	25	0	5	20	50	
11	l4	Schistes carton, Marnes à septaria et Grès supraliasiques	Psc	30	10	7	33	20	10,0
			P11b	12	15	15	58	0	
12	l3c	Grès médioliasiques	P12abis	23	4	15	46	12	6,0
			P12bbis	19	11	10	60	0	
13	l2-3a	Marnes à Zeilleria et Marnes à Amaltheus	P13a	13	10	8	34	35	28,5
			P13b	11	13	8	46	22	
14	l2b1	Argiles à Promicroceras	P14abis	14	23	10	43	10	22,0
			P14b	23	0	8	35	34	
15	l1-2a	Calcaires et marnes à gryphées	P15abis	32	15	4	20	29	39,5
			P15b	26	0	5	19	50	
16	t7b	Argilites rouges de Levallois	Pal	20	0	10	40	30	42,7
			P16b	21	0	11	21	47	
			P16quat	17	0	11	21	51	
17	t7a	Grès infraliasiques	P17bbis	16	20	5	12	47	46,0
			P17quat	26	0	12	17	45	
18	t6d	Marnes irisées et Grès à roseaux	P18a	41	12	5	10	32	48,5
			P18bbis	20	10	5	0	65	
19	t6a	Dolomies et argiles de la Lettenkohle	P19a	42	19	10	2	27	24,0
			P19bbis	68	8	2	1	21	
20	t4	Couches grises et Couches rouges	P20abis	16	0	2	1	81	78,5
			P20bbis	19	0	4	1	76	
21	s	Schistes et grauwackes	P22a	6	63	14	7	10	7,5
			P22bbis	5	25	55	10	5	

N B : Les données en rouge proviennent des rapports retrait-gonflement de Haute-Marne, de Meuse et de Moselle

Illustration 13 – Résultat des analyses minéralogiques spécifiques à chaque formation argileuse du département des Vosges

5.3.3. Caractérisation minéralogique des formations argileuses ou marneuses du département des Vosges

La détermination du pourcentage moyen de minéraux gonflants pour la caractérisation minéralogique des formations argileuses ou marneuses du département a été faite en prenant en compte l'ensemble des informations disponibles. En particulier, les données déjà traitées et issues de départements limitrophes ou proches (Meuse, Haute-Saône, Meurthe-et-Moselle, Moselle et Haute-Marne) sont également mentionnées car cela peut aider à caractériser certaines formations d'extension régionale, même si cette interprétation nécessite une certaine prudence pour tenir compte d'éventuelles variations latérales de faciès. Les valeurs issues de ces départements sont cependant globalement cohérentes avec celles recueillies dans les Vosges.

Les éventuelles disparités identifiées s'expliquent en partie par un nombre de données souvent trop faible pour caractériser de manière statistique des formations globalement assez hétérogènes. C'est le cas notamment des *Marnes de Longwy*, *Marnes à Liostrea acuminata* pour lesquelles seulement trois analyses ont été recueillies sur l'ensemble des 6 départements (dont deux issues de la présente étude). Il en est de même pour les *Dépôts de versants : éboulis, colluvion ; Limons de plateaux et ferricrètes* (avec cependant quatre données sur onze provenant des Vosges). Pour les *Schistes carton*, *Marnes à septaria* et *Grès supraliasiques*, six résultats d'analyse seulement sont exploitables dont un tiers issu des Vosges. Quant aux *Dolomie et argiles de la Lettenkohl*, le nombre de données recueillies est de cinq dont deux issues de la présente étude.

Du fait de cette faible valeur statistique et de la disparité des données exploitables, les notes minéralogiques attribuées ne sont donc pas de simples moyennes arithmétiques mais des indications évaluées au vu de l'ensemble des données disponibles et tenant compte de l'hétérogénéité de faciès présents au sein de la formation. Ceci est d'autant plus vrai que certains pourcentages de minéraux gonflants se situent à la frontières entre deux notes minéralogiques (c'est le cas notamment des *Argiles à Promicroceras* dont la moyenne de minéraux gonflants dans les départements limitrophes est de 25,3% alors que le seuil entre les notes 1 et 2 est fixé à 25%).

Il est à noter que ces données sont pour l'essentiel des résultats d'analyses diffractométriques aux rayons X, valeurs factuelles qui permettent une hiérarchisation des matériaux selon un critère purement local mais ne sont pas nécessairement représentatifs de l'ensemble de la formation géologique, lorsque celle-ci présente de fortes variabilités spatiales.

Les notes minéralogiques sont représentées sur l'illustration 14. Au final, aucune formation n'a été caractérisée par une note minéralogique maximale de 4.

Deux formations, affleurant sur environ 384 km² dans le département, soit environ 6,6 % de la superficie totale, ont été caractérisées par une note de 3, attestant d'une forte susceptibilité de la formation au retrait-gonflement de par sa phase argileuse. Il s'agit des :

- *Alluvions anciennes* ;
- *Couches grises et Couches rouges*.

Une note minéralogique de 2 a été attribuée à treize formations.

Enfin, cinq formations argileuses ont reçu une note minéralogique de 1.

Les *Dépôts tourbeux* ont fait l'objet de prélèvements, malheureusement inexploitable, car ces échantillons n'étaient constitués que de matières organiques. Il est avéré cependant que ces matériaux tourbeux à forte concentration en matière organiques, même s'ils ne présentent pas de minéraux argileux gonflants, sont fortement sujets à tassements différentiels sous l'effet de modifications de leur teneur en eau, phénomènes dont les conséquences sur le bâti peuvent donc être très similaires à celles du retrait-gonflement des sols argileux au sens strict. Cette considération justifie qu'ils aient été retenus dans la présente étude à des fins d'information préventive, même si les mécanismes en jeu sont de nature légèrement différente.

N°	Code	Nom de la formation argileuse	Données Vosges		Départements voisins	
			% minéraux gonflants (smectite + I-S)	Note minéralo	Nombre de valeurs exploitées	% minéraux gonflants (smectite + I-S)
1	Tz	Dépôts tourbeux	-	-	0	-
2	Fz	Alluvions fluviatiles récentes à actuelles	45,8	2	4	45,8
3	E	Dépôts de versants : éboulis, colluvions	15,5	2	4	38,5
4	Fx-y	Alluvions anciennes	51,3	3	3	45
5	G	Formations fluvio-glaciaires	8,0	1	0	-
6	LP-F	Limons de plateaux et ferricrètes	16,5	2	7	45,8
7	j4-5	Argiles de la Woëvre	41,5	2	71	56,5
8	j3-4	Dalle nacrée et calcaires oolithiques	34,5	2	0	-
9	j3b-c	Marnes à rhynchonelles	44,5	2	3	49,7
10	j2c	Marnes de Longwy, Marnes à <i>Liostrea acuminata</i>	35,0	2	1	18
11	l4	Schistes carton, Marnes à <i>septaria</i> et Grès supraliasiques	10,0	1	4	28
12	l3c	Grès médioliasiques	6,0	1	2	23
13	l2-3a	Marnes à <i>Zeilleria</i> et Marnes à <i>Amaltheus</i>	28,5	2	7	23,3
14	l2b1	Argiles à <i>Promicroceras</i>	22,0	1	11	25,3
15	l1-2a	Calcaires et marnes à gryphées	39,5	2	4	34
16	t7b	Argilites rouges de Levallois	42,7	2	28	41,7
17	t7a	Grès infraliasiques	46,0	2	27	52
18	t6d	Marnes irisées et Grès à roseaux	48,5	2	8	40
19	t6a	Dolomies et argiles de la Lettenkohle	24,0	2	3	55,8
20	t4	Couches grises et Couches rouges	78,5	3	4	52
21	s	Schistes et grauwackes	7,5	1	0	-

Illustration 14 – Note minéralogique des formations argileuses retenues

5.4. CRITÈRE GÉOTECHNIQUE

5.4.1. Définition du critère géotechnique et barème

Ce critère permet d'intégrer dans l'analyse de la susceptibilité le comportement géotechnique du matériau vis-à-vis du retrait-gonflement.

Le choix et la description des différents essais géotechniques utilisés pour la définition de ce critère sont présentés dans les paragraphes suivants, ainsi que les valeurs seuils retenues pour la détermination de la note géotechnique.

5.4.1.1. Généralités sur les expertises de sinistres

Les expertises de sinistres qui ont pu être consultées indiquent que le type d'essais effectué sur le terrain dépend des bureaux d'études et varie en fonction de l'objectif assigné à l'étude. Généralement, la reconnaissance de sol se fait par sondage à la

tarière (le plus souvent manuelle), parfois en fouille directe. Les essais géotechniques remplissent deux objectifs :

- déterminer les caractéristiques intrinsèques du sol : les essais utilisés sont les limites d'Atterberg (qui permettent de déterminer l'indice de plasticité, IP), le retrait linéaire, l'essai au bleu de méthylène (qui traduit la capacité d'adsorption du sol) et le coefficient de gonflement, éventuellement complétés par une analyse granulométrique pour déterminer le passant à 80 μm ;
- caractériser l'état du sol, et notamment son état de dessiccation en effectuant des mesures de teneurs en eau, généralement à plusieurs profondeurs. En comparant ces valeurs avec les limites d'Atterberg du matériau, il est possible de savoir dans quel état de consistance se trouve le matériau *in situ* (état solide avec ou sans retrait, plastique ou liquide). D'autres essais peuvent également être mis en œuvre, comme la mesure du rapport de gonflement.

Seuls les résultats des essais correspondant aux caractéristiques intrinsèques du sol sont pris en compte dans cette étude, puisqu'il s'agit de déterminer la susceptibilité au retrait-gonflement de chaque formation. En effet, les résultats des essais caractérisant l'état du matériau varient au cours du temps en fonction de l'humidité du sol : ils sont donc utiles aux experts, pour diagnostiquer les causes d'un sinistre et déterminer dans quel état se trouve le sol par rapport au niveau d'équilibre, mais ne sont pas pertinents pour caractériser la susceptibilité du matériau au retrait-gonflement.

Les études géotechniques après sinistres sont souvent complétées par un ou plusieurs essais pressiométriques (ou parfois au pénétromètre dynamique), dont l'objectif est la vérification de la capacité portante du sol et le dimensionnement ultérieur éventuel de micropieux, lorsque l'expertise indique qu'une reprise en sous-œuvre des fondations est nécessaire. Ces données ne sont pas utilisées dans la présente étude.

Les principaux essais dont les résultats ont été ici utilisés pour caractériser le comportement géotechnique du matériau vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement sont la valeur de bleu, le retrait linéaire, et l'indice de plasticité. Ces essais sont présentés dans les paragraphes suivants, sachant que les deux essais les plus représentatifs de l'aptitude d'un sol au retrait-gonflement sont la valeur de bleu et le retrait linéaire.

5.4.1.2. *Indice de plasticité (IP)*

Il est calculé à partir des limites d'Atterberg (essais les plus souvent trouvés en archives) qui mettent en évidence l'influence de la teneur en eau sur la consistance du matériau fin. Cet indice correspond à la différence entre la limite de liquidité (WL) et la limite de plasticité (Wp) du matériau. Il représente donc l'étendue du domaine plastique et donne une indication sur l'aptitude du matériau argileux à acquérir de l'eau.

On considère généralement que la susceptibilité d'une argile au retrait-gonflement varie en fonction de l'indice de plasticité IP de la manière suivante (Chassagneux *et al.*, 1998), même si les bornes inférieures de 12 et 25 % paraissent à l'usage vraisemblablement sous-estimées et si l'expérience montre que ce paramètre n'est pas un critère très pertinent pour l'évaluation de la susceptibilité d'un matériau vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement (Illustration 15) :

Indice de plasticité	Susceptibilité	Note
IP < 12	faible	1
12 ≤ IP < 25	moyenne	2
25 ≤ IP < 40	forte	3
IP ≥ 40	très forte	4

Illustration 15 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de l'indice de plasticité de la formation géologique

5.4.1.3. Essais au bleu de méthylène

Ils permettent d'évaluer la surface spécifique d'échange d'un matériau argileux, ce qui constitue un bon indicateur de sa susceptibilité au phénomène de retrait-gonflement.

Cet essai a été développé par Tran Ngoc Lan (1977) et adopté comme procédure d'essai officielle des Laboratoires des Ponts et Chaussées, puis normalisé (norme AFNOR NF P 18-592). Il consiste à mesurer la capacité d'adsorption en bleu de méthylène, c'est-à-dire la quantité de ce colorant nécessaire pour recouvrir d'une couche mono-élémentaire les surfaces externes et internes de toutes les particules argileuses présentes dans 100 g de sol. On appelle cette quantité, la valeur de bleu, notée Vb et exprimée en grammes de bleu par 100 g de matériau.

On considère généralement (Chassagneux *et al.*, 1998) que la sensibilité d'un matériau argileux varie de la manière suivante en fonction de la valeur de bleu (Illustration 16) :

Valeur de bleu	Susceptibilité	Note
< 2,5	faible	1
2,5 à 6	moyenne	2
6 à 8	forte	3
> 8	très forte	4

Illustration 16 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la valeur au bleu de la formation géologique

Les valeurs au bleu disponibles pour certaines formations concernées dans la présente étude se sont révélées assez nombreuses. Ce paramètre permet, avec le concours avantageux des limites d'Atterberg, une analyse statistique du comportement au retrait-gonflement.

5.4.1.4. Retrait linéaire (RI)

La valeur du retrait linéaire est un indicateur de l'importance du retrait volumique possible d'un sol lors de son assèchement. Initialement, le sol est saturé en eau. Lorsque la teneur en eau diminue, son volume total diminue, puis se stabilise. Ce processus de diminution de la teneur en eau se traduit par deux phases successives. Lors de la première, les grains constituant le sol se rapprochent, mais le sol reste toujours saturé : la variation de volume du sol est donc proportionnelle à la diminution de la teneur en eau. Lors de la seconde, les grains sont en contact et ne peuvent plus

se rapprocher, l'élimination de l'eau ne fait plus varier le volume du sol, mais se traduit par sa désaturation. La teneur en eau correspondant à ce palier est appelée limite de retrait. Plus cette valeur est faible, plus la variation de volume peut être importante et plus le tassement induit en cas de dessiccation sera grand.

Le retrait linéaire, noté RI, correspond à la pente de la droite donnant le tassement de l'échantillon en fonction de la teneur en eau, dans la partie où cette teneur reste supérieure à la limite de retrait. Les coupures suivantes ont été proposées (Mastchenko, 2001) pour caractériser le potentiel de retrait avec ce paramètre (Illustration 17).

Retrait linéaire	Susceptibilité	Note
$RI < 0,4$	faible	1
$0,4 \leq RI < 0,65$	moyenne	2
$0,65 \leq RI < 0,75$	forte	3
$RI \geq 0,75$	très forte	4

Illustration 17 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du retrait linéaire de la formation géologique

5.4.2. Source des données

Les données géotechniques recueillies dans le cadre de la présente étude et dont la synthèse figure dans ce paragraphe proviennent de différentes sources. Ne seront cités que les dossiers ayant pu être exploités. C'est le cas :

- de rapports de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle et surtout d'études géotechniques réalisées dans le cadre d'expertises après sinistres qui constituent la principale source de données exploitées ;
- d'études géotechniques de constructions et d'aménagements divers dans le département des Vosges ;
- d'analyses géotechniques recensées dans les fichiers de la BSS.

Conformément au protocole signé entre le BRGM et l'Union Syndicale de Géotechnique (USG) avant le démarrage du programme national de cartographie du retrait-gonflement des sols argileux, les coordonnées complètes des bureaux d'études ayant communiqué des données géotechniques sont présentées en annexe 4.

Nous souhaitons remercier ici l'ensemble des partenaires qui nous ont aimablement permis d'accéder à leurs dossiers d'archives dans leurs locaux et ont facilité le travail de recensement. Nos remerciements s'adressent en particulier à la DDE ainsi qu'à la Préfecture des Vosges, au CETE, à la Caisse Centrale de Réassurance, aux assurances MAIF et Matmut, ainsi qu'aux bureaux d'études ANTEA, Fondasol, GEOTEC et enfin la société URETEK (spécialisée dans le confortement par injection de résine) pour nous avoir donné l'accès à un très grand nombre de documents utiles à cette étude. En ce qui concerne la société Fondasol, deux sites ont été visités (Metz-Actipole et Ludres) et des données du site de Strasbourg ont été relevées par le SGR Alsace lors de la visite des archives.

En revanche, malgré des demandes réitérées, les dossiers de CEBTP-Solen et Hydro Géotechnique n'ont pu être consultés.

Parmi les données recueillies, certaines ont dû être rejetées, notamment lorsque la caractérisation géologique de l'échantillon était insuffisante pour établir une corrélation fiable avec les formations argileuses ou marneuses retenues. Toutefois, la précision de la localisation et de la description géologique des échantillons analysés (à partir de la base des sinistres ou de plans détaillés toujours présents) a permis l'exploitation de la grande majorité des données.

Les analyses de sols ainsi recensées dans le cadre de l'étude sont en définitive au nombre de 668 dans le département des Vosges, après élimination des doublons issus de sources distinctes. Les illustrations 18 et 19 précisent le nombre de documents fournis par les organismes qui nous ont fait parvenir des dossiers.

Organisme fournisseur de données	Nombre de rapports
ANTEA	2
FONDASOL	91
BRGM (archives SGR)	2
Point BSS	134
CCR	8
Communes	3
GEOTEC	1
CETE	14
MAIF, Matmut	3
Préfecture	7
RG 54	3
URETEK	1
<i>Total</i>	269

Illustration 18 – Source des données géotechniques

Organisme	Nombre de rapports	Données exploitées	Observations
BRGM	137	285	Données de construction + points BSS
Bureaux d'études	118	237	Données de construction + expertise
Services de l'Etat	14	146	Données d'aménagements autoroutiers
<i>Total</i>	269	668	

Illustration 19 – Nombre de données géotechniques exploitées

5.4.3. Caractérisation géotechnique des formations argileuses ou marneuses du département des Vosges

La synthèse des données géotechniques exploitées dans le cadre de l'étude pour la caractérisation géotechnique des formations argileuses, et les notes géotechniques attribuées sont présentées sur l'illustration 20. Parmi les 269 rapports recueillis et utilisés, 668 résultats d'essais en laboratoire (indices de plasticité et valeur de bleu) ont été localisés géologiquement avec précision. Toutefois, 124 caractérisations concernaient les formations *a priori* non argileuses et ont dû être écartées.

N°	Code	Nom de la formation argileuse	Valeurs de bleu (Vb) g/100g			Indice de plasticité (IP) %				Note géotechnique	Départements voisins		
			nb val.	moy.	min.	max.	nb val.	moy.	min.		max.	Nombre de valeurs Vb	Moyenne Vb
1	Tz	Dépôts tourbeux	0							-	0	-	
2	Fz	Alluvions fluviales récentes à actuelles	43	0,5	0,03	5,3	41	26,6	8	49	2	390	3,5
3	E	Dépôts de versants : éboulis, colluvions	0				1	8			2	133	2,5
4	Fx-y	Alluvions anciennes	38	1,7	0,03	6,43	34	23,7	7	37	1	155	2,9
5	G	Formations fluvioglaciales	17	0,2	0,04	0,48	4	14,0	10	21	1	4	2,0
6	LP-F	Limons de plateaux et ferrifères	1	0,4			16	25,2	12	41	2	232	3,9
7	j4-5	Argiles de la Woèvre	1	0,9			1	20			2	60	4,6
8	j3-4	Dalle nacrée et calcaires oolithiques	1	3,25			1	29			2	53	3,6
9	j3b-c	Marnes à rhynchonelles	0				0				3	19	5,9
10	j2c	Marnes de Longwy, Marnes à Liostrrea acuminata	1	0,43			0				1	1	2,5
11	l4	Schistes carton, Marnes à septaria et Grès supraliasiques	0				39	25,5	11,8	55	2	60	2,5
12	l3c	Grès médioliasiques	0				12	24,2	15	44	2	16	2,1
13	l2-3a	Marnes à Zeilleria et Marnes à Amatheus	0				17	21,9	13,3	29	2	55	3,3
14	l2b1	Argiles à Promicroceras	0				2	28,5	28	29	3	43	5,3
15	l1-2a	Calcaires et marnes à gryphées	2	2,9	2,5	3,2	19	28,8	18	37	2	228	3,4
16	t7b	Argilites rouges de Levallois	2	4,9	3,9	5,9	13	34,5	16	64	2	23	4,2
17	t7a	Grès infraaliasiques	9	2,0	0,5	5,4	27	27,3	8	63	2	7	4,5
18	t6d	Marnes irisées et Grès à roseaux	3	1,9	1,5	2,22	157	26,3	7	59	2	163	3,9
19	t6a	Dolomies et argiles de la Lettenkohle	0				23	22,8	8	43	2	73	4,7
20	t4	Couches grises et Couches rouges	3	0,2	0,02	0,24	16	20,8	14	31	1	20	2,5
21	s	Schistes et grauwackes	0				0				-	0	-
Total des données			121				423						

Illustration 20 - Synthèse des données géotechniques (Indice de plasticité, Valeurs au bleu)

Afin de hiérarchiser les résultats issus des différents types d'essais, le nombre d'échantillons a été pris en compte pour chaque type d'essai, ainsi que la variabilité des résultats (évaluée à partir de la dispersion des valeurs entre un minimum et un maximum). Dans la mesure où aucune valeur de retrait linéaire n'a pu être recueillie, une importance plus forte a été accordée aux valeurs de bleu, qui caractérisent mieux la susceptibilité du matériau au retrait-gonflement que les limites d'Atterberg.

La caractérisation géotechnique des formations argileuses ou marneuses du département a été faite en prenant en compte l'ensemble des données disponibles. Les données, essentiellement des valeurs de bleu, déjà traitées et issues de départements limitrophes ou proches (Meuse, Haute-Saône, Meurthe-et-Moselle, Moselle et Haute-Marne) sont également mentionnées car cela peut aider à caractériser certaines formations d'extension régionale, même si cette interprétation nécessite là encore une certaine prudence pour tenir compte d'éventuelles variations latérales de faciès.

Les résultats de valeurs de bleu issus des Vosges sont d'ailleurs globalement assez comparables à ceux obtenus dans les départements limitrophes pour les mêmes formations géologiques. Lorsqu'une différence est mise en évidence comme dans le cas des *Alluvions anciennes*, le nombre de données recueillies (38) dans le département a été jugé suffisant pour caractériser l'unité argileuse, d'autant que pour ce type de formation, une influence locale est jugée prépondérante. De plus, ces différences mineures s'expliquent par un nombre de données statistiquement insuffisant, comme par exemple pour les *Marnes de Longwy*, *Marnes à Liostrea acuminata* où seulement deux données ont été recueillies sur l'ensemble des 6 départements (dont une provenant des Vosges).

L'absence de données géotechniques quantifiées pour trois formations est mise en évidence par le dépouillement des données. Il s'agit des *Dépôts tourbeux*, des *Marnes à rhynchonelles* et des *Schistes et grauwackes*. Cette lacune s'explique essentiellement par la faible urbanisation de ces formations et leur faible sinistralité (aucun sinistre pour chacune de ces trois formations). Les résultats issus des départements voisins sont directement pris en compte pour les *Marnes à rhynchonelles* permettant d'attribuer une note géotechnique pour la formation (illustration 20). Les deux autres formations ne s'étendant pas dans les départements limitrophes traités à ce jour, il n'a donc pas été possible de qualifier les *Dépôts tourbeux* et les *Schistes et grauwackes* d'un point de vue géotechnique.

Le nombre de données géotechniques permettant de caractériser les autres formations est assez variable (illustration 21). Trois formations sont concernées par plus de 50 essais géotechniques (plus de 150 pour les *Marnes irisées et Grès à roseaux*), puis cinq autres sont qualifiées par 20 à 50 essais chacune, ce qui donne une idée de la variabilité de leur comportement géotechnique et permet une caractérisation relativement fiable pour celles-ci.

Au regard des notes géotechniques attribuées, aucune formation préalablement identifiée comme argileuse n'est caractérisée par la note maximale de 4. Deux formations reçoivent la note géotechnique de susceptibilité forte (3) : il s'agit des *Marnes à rhynchonelles* du Bathonien et des *Argiles à Promicroceras* du Lotharingien inférieur.

La note géotechnique de 2 caractérise treize formations à composante argileuse.

Quatre formations obtiennent la note minimale (1) : il s'agit des *Alluvions anciennes*, des *Formations fluvi-glaciaires*, des *Marnes de Logwy*, *Marnes à Liostrea Acuminata* et enfin des *Couches grises et Couches rouges* du Muschelkalk moyen.

En l'absence de données, le comportement géotechnique de deux formations (les *Dépôts tourbeux* et les *Schistes et grauwackes*) n'a pu être caractérisé de manière fiable.

Il convient d'ailleurs de noter que ces attributions sont nécessairement influencées par l'hétérogénéité des formations argileuses, la grande variabilité des matériaux au sein d'une même formation et le nombre d'analyses disponibles. Au final, l'attribution de la note de susceptibilité géotechnique suppose une interprétation, et donc une part de subjectivité, à partir des données quantifiées déduites de moyennes brutes.

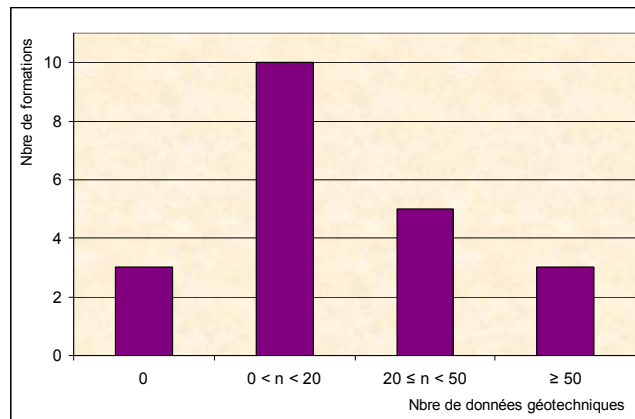


Illustration 21 – Distribution des données géotechniques par formation

6. Élaboration de la carte de susceptibilité

6.1.1. Détermination d'un degré de susceptibilité

Au total, chaque formation a été caractérisée par trois notes, une pour chacun des critères pris en compte selon les classifications présentées précédemment. La moyenne des trois notes obtenues permet de calculer, pour chaque formation, un degré de susceptibilité générale vis-à-vis du retrait-gonflement.

Pour les formations dont l'une des caractéristiques n'a pu être évaluée, la moyenne est effectuée à partir des autres notes. La moyenne ainsi obtenue est potentiellement comprise entre 1 et 4. Les classes de susceptibilité déterminées à partir de la valeur moyenne ainsi calculée sont les suivantes (Illustration 22) :

Note moyenne	Degré de susceptibilité
valeur \leq 2	Faible (niveau 1)
2 < valeur \leq 3	Moyen (niveau 2)
valeur > 3	Fort (niveau 3)

Illustration 22 – Barème d'évaluation de la susceptibilité globale d'une formation argileuse.

6.1.2. Susceptibilité des formations argileuses ou marneuses

Le calcul du degré de susceptibilité des vingt-et-une formations argileuses ou marneuses identifiées dans le département des Vosges aboutit au classement présenté sur l'illustration 23.

Cette hiérarchisation des formations argileuses et marneuses, établie sur la base de critères purement physiques et techniques, conduit ainsi à identifier :

- aucune formation fortement susceptible vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement ;
- huit formations moyennement susceptibles au retrait-gonflement ;
- treize formations faiblement susceptibles au retrait-gonflement.

6.1.3. Carte de susceptibilité

La carte départementale de susceptibilité a été tracée à partir de la carte synthétique des formations argileuses ou marneuses (illustration 7), en attribuant à chacune des formations géologiques la classe de susceptibilité définie précédemment. Cette carte est présentée sur l'illustration 25 et en carte hors-texte n° 2 à l'échelle 1/150 000.

N°	Code	Nom de la formation argileuse	Note lithologique	Note minéralogique	Note géotechnique	Moyenne	Susceptibilité
1	Tz	Dépôts tourbeux	3	-	-	3,0	moyen
2	Fz	Alluvions fluviales récentes à actuelles	1	2	2	1,7	faible
3	E	Dépôts de versants : éboulis, colluvions	1	2	2	1,7	faible
4	Fx-y	Alluvions anciennes	1	3	1	1,7	faible
5	G	Formations fluvioglaciales	1	1	1	1,0	faible
6	LP-F	Limons de plateaux et ferricrètes	2	2	2	2,0	faible
7	j4-5	Argiles de la Woèvre	4	2	2	2,7	moyen
8	j3-4	Dalle nacrée et calcaires oolithiques	1	2	2	1,7	faible
9	j3b-c	Marnes à rhynchonelles	3	2	3	2,7	moyen
10	j2c	Marnes de Longwy, Marnes à Liostrea acuminata	2	2	1	1,7	faible
11	l4	Schistes carton, Marnes à septaria et Grès supraliasiques	4	1	2	2,3	moyen
12	l3c	Grès médioliasiques	1	1	2	1,3	faible
13	l2-3a	Marnes à Zeilleria et Marnes à Amaltheus	3	2	2	2,3	moyen
14	l2b1	Argiles à Promicroceras	4	1	3	2,7	moyen
15	l1-2a	Calcaires et marnes à gryphées	2	2	2	2,0	faible
16	t7b	Argilites rouges de Levallois	3	2	2	2,3	moyen
17	t7a	Grès infraliasiques	2	2	2	2,0	faible
18	t6d	Marnes irisées et Grès à roseaux	2	2	2	2,0	faible
19	t6a	Dolomies et argiles de la Lettenkohle	2	2	2	2,0	faible
20	t4	Couches grises et Couches rouges	3	3	1	2,3	moyen
21	s	Schistes et grauwackes	1	1	-	1	faible

Illustration 23 – Degré de susceptibilité des formations.

Les formations argileuses et marneuses sont classiquement représentées par deux couleurs (jaune et orange) selon leur degré respectif de susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement (faible ou moyen). Aucune formation n'a été classée en susceptibilité forte, et ceci par comparaison avec les résultats obtenus dans d'autres départements déjà traités, selon la même méthodologie et en utilisant les mêmes critères.

Les zones blanches de la carte correspondent aux formations *a priori* non argileuses, et donc théoriquement non sujettes au phénomène de retrait-gonflement. Toutefois, on ne peut exclure que ces formations soient recouvertes localement de placages superficiels argileux ou contiennent des poches d'argile¹ liées en particulier à l'hétérogénéité ou encore à l'altération de certaines formations, notamment carbonatées.

Le graphique (illustration 24), et le tableau (illustration 26), indiquent quelles sont les superficies caractérisées par des degrés de susceptibilité faible et moyen, ainsi que les zones *a priori* non sujettes au phénomène car correspondant à des formations considérées comme non argileuses, ainsi qu'au réseau hydrographique.

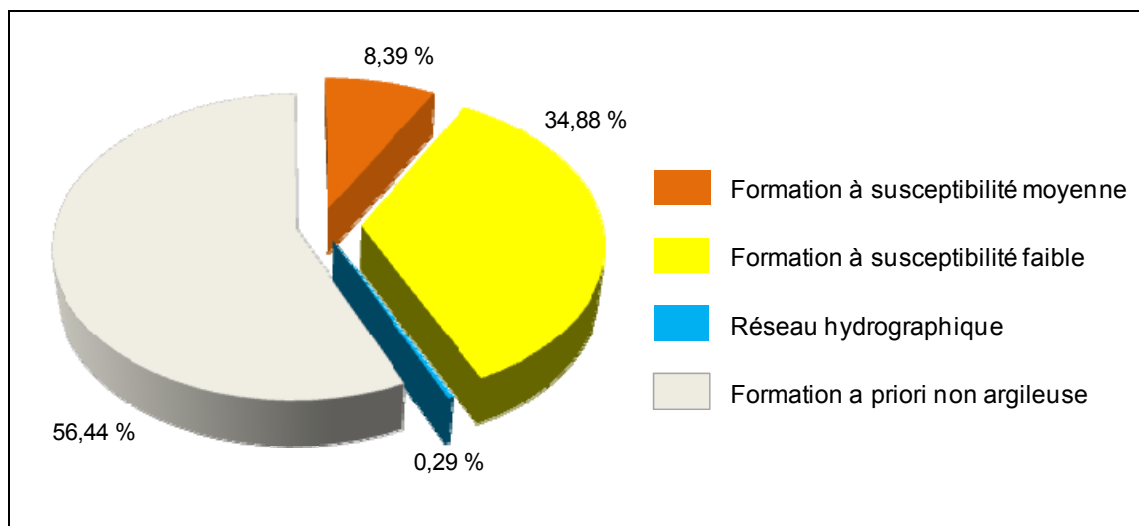


Illustration 24 – Répartition des surfaces concernées par classe de susceptibilité.

On remarque que les formations de susceptibilité faible couvrent plus de 2 049 km² (soit 34,88 % de la superficie totale du département), tandis que celles de susceptibilité moyenne représentent environ 493 km² (soit 8,39 % du département).

Pour rappel, près de 57 % de la superficie du département n'est *a priori* pas susceptible aux phénomènes de retrait-gonflement des argiles, ce qui correspond aux formations considérées comme non argileuses et au réseau hydrographique.

¹ non représentées sur la carte géologique actuelle

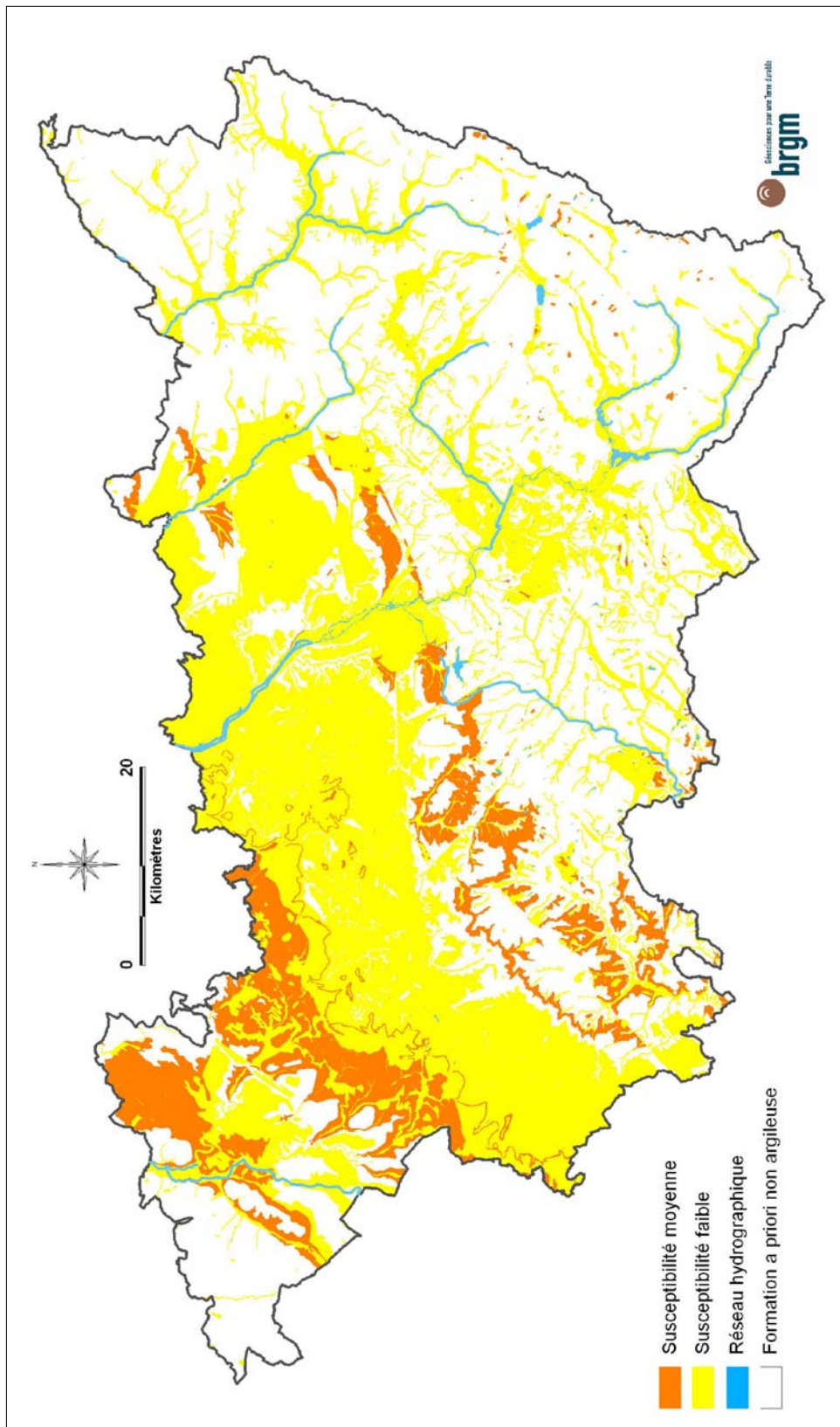


Illustration 25 – Carte de susceptibilité du département des Vosges.

L'illustration 26 présente les résultats établis précédemment en classant les formations par niveau de susceptibilité et en précisant les surfaces concernées.

N°	Code	Nom de la formation argileuse	Superficie km ²	% de la superficie totale	Susceptibilité
1	Tz	Dépôts tourbeux	6,76	0,12	moyenne
7	j4-5	Argiles de la Woëvre	46,95	0,80	moyenne
9	j3b-c	Marnes à rhynchonelles	57,11	0,97	moyenne
11	l4	Schistes carton, Marnes à septaria et Grès supraliasiques	62,19	1,06	moyenne
13	l2-3a	Marnes à Zeilleria et Marnes à Amaltheus	82,48	1,40	moyenne
14	l2b1	Argiles à Promicroceras	42,66	0,73	moyenne
16	t7b	Argilites rouges de Levallois	12,47	0,21	moyenne
20	t4	Couches grises et Couches rouges	181,95	3,10	moyenne
Total des formations en susceptibilité moyenne			492,58	8,39 %	
2	Fz	Alluvions fluviales récentes à actuelles	475,79	8,10	faible
3	E	Dépôts de versants : éboulis, colluvions	114,47	1,95	faible
4	Fx-y	Alluvions anciennes	202,69	3,45	faible
5	G	Formations fluvio-glaciaires	128,71	2,19	faible
6	LP-F	Limons de plateaux et ferricrètes	81,14	1,38	faible
8	j3-4	Dalle nacrée et calcaires oolithiques	13,76	0,23	faible
10	j2c	Marnes de Longwy, Marnes à Liostrea acuminata	81,41	1,39	faible
12	l3c	Grès médioliasiques	28,37	0,48	faible
15	l1-2a	Calcaires et marnes à gryphées	114,45	1,95	faible
17	t7a	Grès infraliasiques	122,78	2,09	faible
18	t6d	Marnes irisées et Grès à roseaux	491,33	8,36	faible
19	t6a	Dolomies et argiles de la Lettenkohle	190,27	3,24	faible
21	s	Schistes et grauwackes	3,92	0,07	faible
Total des formations en susceptibilité faible			2 049,09	34,88 %	
Total formations argileuses			2 541,67	43,27 %	
Réseau hydrographique			16,92	0,29 %	
Formations <i>a priori</i> non argileuses			3 315,41	56,44 %	
Total département			5 874	100 %	

Illustration 26 – Classement des formations par susceptibilité et surfaces d'affleurement.

7. Recensement et localisation des sinistres – détermination du critère densité de sinistres

7.1. PROCÉDURE DE DEMANDE DE RECONNAISSANCE DE L'ÉTAT DE CATASTROPHE NATURELLE

Dans le cadre de la loi n°82-600 du 13 juillet 1982 sur les catastrophes naturelles, et à l'initiative des sinistrés, un dossier technique est établi par un bureau d'études afin de demander la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle dans la commune concernée, au titre des mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols. Aux termes de cette loi, les propriétaires de bâtis peuvent se considérer comme victimes des effets des catastrophes naturelles pour les dommages matériels directs ayant pour cause déterminante "l'intensité anormale d'un agent naturel" – dans le cas présent, la sécheresse ou la réhydratation des sols – "lorsque les mesures habituelles pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance".

Les dossiers techniques des communes sont collectés par la Préfecture qui les transmet à la Commission Interministérielle statuant sur la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.

Pour que les dossiers qui lui sont soumis soient déclarés recevables, la Commission Interministérielle exige que les critères suivants soient satisfaits :

- les désordres ne doivent pas relever d'une cause autre que la sécheresse ou la réhydratation des sols ;
- le caractère exceptionnel du phénomène climatique doit être prouvé ;
- la nature du sol doit être essentiellement argileuse, de sorte qu'elle permette le retrait par dessiccation ou le gonflement par réhydratation ;
- le niveau de fondation doit se trouver dans la zone de sol subissant la dessiccation ;
- l'évolution des désordres doit être corrélée dans le temps avec celle du phénomène climatique exceptionnel.

Depuis décembre 2000, l'analyse du contexte climatique est confiée à Météo France et effectuée sur la base d'un suivi de l'état hydrique des sols. Celui-ci est calculé dans 92 stations de référence au moyen d'un modèle à double réservoir, sur la base d'une réserve utile de 200 mm, dont on suit le niveau de remplissage au pas de temps décennal. La comparaison de l'état hydrique des sols (qui dépend essentiellement des précipitations et de l'évapotranspiration) par rapport aux moyennes trentenales, permet d'identifier les périodes de sécheresse exceptionnelles qui ont d'abord été définies comme étant des périodes de quatre trimestres consécutifs pour lesquels la réserve en eau du sol est inférieure à la normale, avec au moins une décennie située au cours du premier trimestre (janvier à mars, période de recharge hivernale) où la réserve en eau est inférieure à 50 % de la normale. Ces critères ont été modifiés pour la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle concernant les sinistres survenus au cours de l'été 2003.

Les études menées en vue de la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ne sont habituellement réalisées que sur quelques cas de désordres de bâtis par commune. L'ensemble des sinistres d'une commune est rarement pris en compte et il n'est pas rare qu'un seul sinistre permette de classer l'ensemble de la commune en état de catastrophe naturelle. Par ailleurs, dès lors qu'une commune a été reconnue une fois, il n'est pas exigé d'étude géotechnique supplémentaire pour définir une nouvelle période de reconnaissance.

De surcroît, ces études préalables sont généralement très succinctes. Une visite de terrain permet de réaliser un bref audit des sinistres, de noter les dates d'apparition des premiers désordres (pour les comparer avec les chroniques pluviométriques), d'observer les pathologies et la nature des terrains, de noter la présence éventuelle de végétation arborée à proximité du bâti sinistré et de recueillir le témoignage des propriétaires. L'examen de la carte géologique du BRGM à l'échelle du 1/50 000, complété éventuellement par des observations de terrain ou des sondages, permet de préciser la nature des formations géologiques environnant les sinistres et de déterminer celle qui a été à l'origine des désordres.

Ces dossiers techniques ne constituent donc qu'une première approche, souvent très sommaire, du problème. Après reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle dans la commune, des études plus approfondies sont généralement réalisées à la demande des compagnies d'assurance afin de déterminer le niveau de remboursement des dégâts et proposer des solutions de confortement. Les experts en charge de ces diagnostics font alors souvent appel à des bureaux d'études spécialisés pour réaliser des études géotechniques qui permettent de préciser l'origine des désordres. Ces études de sols ne sont cependant pas systématiques.

Dans le département des Vosges, différents bureaux d'études ont réalisé des dossiers techniques pour établir la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ou expertiser des sinistres pour le compte des compagnies d'assurance. D'après les dossiers que nous avons recueillis, les bureaux d'études suivants sont notamment intervenus : Hydro Géotechnique, Fondasol, GEOSUM, Est Ingénierie.

7.2. IDENTIFICATION DES COMMUNES SINISTRÉES

7.2.1. Localisation des communes sinistrées

A la date du 15 février 2009, 12 communes du département des Vosges (dont celle de Vroville qui a été reconnue à deux reprises) ont été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle au titre de "*mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols*", pour des périodes comprises entre le 1^{er} janvier 1996 et le 30 septembre 2003.

Ces 12 communes représentent 2,33 % des 515 communes vosgiennes, et couvrent environ 2,1 % de la superficie totale du département.

Au total, ce sont 7 arrêtés interministériels reconnaissant l'état de catastrophe naturelle sécheresse qui ont été publiés au JO (Journal Officiel) pour le département des Vosges, dont les dates s'échelonnent entre le 12 mars 1998 et le 3 août 2006. Le nombre d'occurrences reconnues, en distinguant par commune et par période, s'élève à 13. L'illustration 27 présente le nombre de communes concernées par les différents

arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse au cours de cette période.

Arrêtés interministériels	Nombre de communes
12/03/1998	1
25/08/2004	1
22/11/2005	4
06/02/2006	1
30/03/2006	3
27/07/2006	2
03/08/2006	1
TOTAL	13

Illustration 27 – Arrêtés interministériels et occurrences.

D'après les données disponibles sur le site internet « prim.net » du MEEDDAT (base officielle Gaspar), le nombre d'occurrences reconnues à la date du 15 février 2009 place le département des Vosges à la 68^{ème} position des départements français les plus touchés, loin cependant derrière certains du Sud-Ouest (1 412 occurrences reconnues en Haute-Garonne, 1 253 dans le Gers, 1 072 en Dordogne). Pour information, le nombre total d'occurrences pour le territoire métropolitain est de 17 953 à cette même date.

Si l'on se réfère au classement des départements français en terme de coût d'indemnisation, les Vosges occupaient la 76^{ème} place en septembre 2008, avec un montant cumulé d'indemnisations versées à ce titre, évalué à un peu plus de 420 millions d'euros en coûts actualisés (données fournies par la CCR). Ce décalage s'explique en partie par le taux d'urbanisation relativement faible des Vosges, mais surtout par la nature globalement peu argileuse des terrains affleurants.

La liste des communes concernées est présentée en annexe 2, ainsi que les périodes de reconnaissance, les dates des arrêtés interministériels et les dates de leur parution au Journal Officiel. La carte de l'illustration 28 permet de localiser les 12 communes ayant fait l'objet d'au moins un arrêté à ce jour.

Cette carte met en évidence que l'ensemble des communes reconnues en état de catastrophe naturelle pour le retrait-gonflement des argiles dans le département des Vosges se situe dans la partie du territoire correspondant à la plaine.

On notera donc qu'à ce jour, aucune commune de la région des Basses-Vosges gréseuses et des Hautes-Vosges cristallines n'a fait l'objet d'une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour le phénomène de retrait-gonflement des argiles.

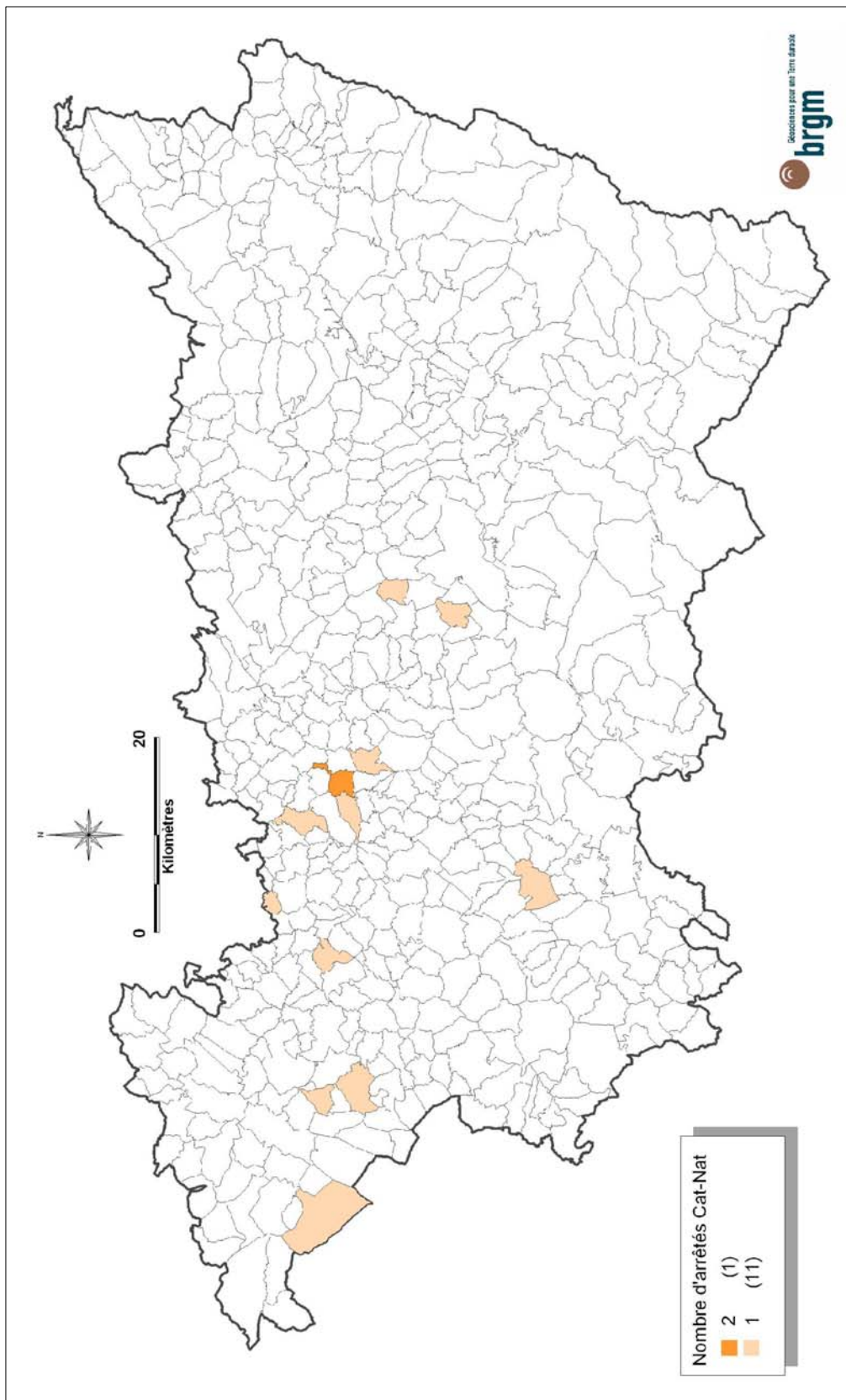


Illustration 28 – Localisation des communes concernées par un ou des arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse (à la date du 15 février 2009).

7.2.2. Analyse des périodes de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle

Les 12 communes qui ont été reconnues en état de catastrophe naturelle l'ont été pour l'année 2003. Une seule commune, Vroville, avait été reconnue auparavant, pour la sécheresse survenue entre janvier et novembre 1996 (illustration 29).

Communes	Nbre arrêtés	Durées totales (mois)	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Certilleux	1	3										
Chavelot	1	3										
Chef-Haut	1	3										
Gironcourt-sur-Vraine	1	3										
Landaville	1	3										
Les Forges	1	3										
Liffol-le-Grand	1	3										
Mattaincourt	1	3										
Poussay	1	3										
Racécourt	1	3										
Relanges	1	3										
Vroville	2	14										

Illustration 29 – Durée de reconnaissance par commune de l'état de catastrophe naturelle sécheresse pour la période 1996-2006.

Ceci est important au regard de la mise en application du système de modulation de franchise mis en place en septembre 2000 et qui prévoit une augmentation de la franchise à chaque nouvel arrêté (calculé désormais sur les 5 dernières années, suite à l'arrêté du 4 août 2003, et non plus depuis 1995 comme initialement), à défaut d'élaboration de documents de prévention de type Plans de prévention des risques naturels (PPRN).

L'illustration 30 indique la répartition dans le temps des arrêtés de reconnaissance sécheresse pour les communes du département des Vosges.

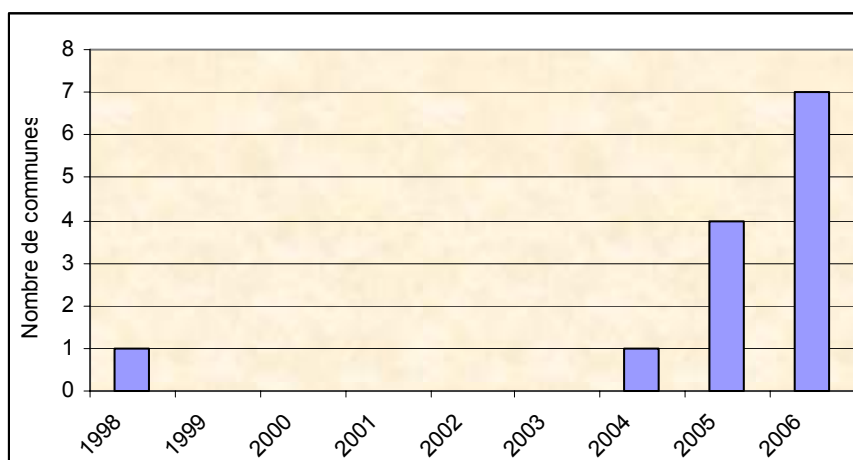


Illustration 30 – Nombre de communes reconnues en état de catastrophe naturelle sécheresse pour la période 1989-2008.

Le décalage observé entre la période d'occurrence des sinistres (été 2003 pour l'essentiel dans les Vosges) et la date de parution des arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle (2006 pour 7 des 12 communes concernées) s'explique ici essentiellement par des raisons de procédure administrative.

Il convient cependant de noter que certaines déclarations de sinistres sont tardives, ce qui peut en partie expliquer que les périodes de déficit hydrique et les dates de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ne sont pas toujours parfaitement corrélées. En effet, après une période de dessiccation intense et profonde des sols, le retour à un état hydrique normal est lent et il subsiste souvent en profondeur des zones de sol argileux anormalement desséchées qui restent sensibles à des variations saisonnières, même de faible amplitude. En d'autres termes, un déficit hydrique intense est nécessaire pour amorcer les premiers mouvements différentiels du sol mais ensuite, la structure du sol et du bâti ayant été fragilisée, de faibles amplitudes hydriques suffisent à provoquer la réouverture ou l'aggravation des premières fissures. C'est pourquoi certains propriétaires réagissent avec retard et déclarent des sinistres à une période où les précipitations sont revenues à un niveau normal.

7.3. COLLECTE DES DONNÉES DE SINISTRES

Le recensement des sinistres a été réalisé à partir de plusieurs sources d'informations jugées complémentaires, à savoir :

- la consultation des dossiers de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle archivés au Service interministériel régional de défense et de protection civile (Préfecture d'Epinal), ainsi qu'à la Caisse Centrale de Réassurance ;
- une enquête auprès de l'ensemble des communes du département ;
- la consultation de dossiers communiqués par des assureurs, des bureaux d'études, et des experts d'assurance ;
- les archives du BRGM ;
- des visites de terrain sur des communes où la détermination de l'origine des sinistres était problématique.

L'enquête auprès des communes a été réalisée par envoi d'un courrier, accompagné d'une lettre circulaire de M. le Préfet des Vosges, à l'ensemble des maires du département. Ces courriers ont été envoyés par le BRGM le 09 décembre 2007. De nombreuses relances ont ensuite été effectuées par téléphone, télécopie et par voie postale. Le taux de réponse final atteint 56 %, avec 30 communes signalant des sinistres (dont les 12 communes reconnues en état de catastrophe naturelle) soit près de 6 % des communes du département, et 261 réponses de communes se déclarant non concernées à leur connaissance par le phénomène.

Finalement, 143 sites de sinistres ont été recensés, tous localisés avec précision sur les fonds topographiques de l'IGN à 1/25 000. Cela a permis de calculer automatiquement les coordonnées (en système Lambert II étendu) de chacun des sites, lesquelles sont présentées en annexe 3. Ce travail a été conduit grâce aux cartes de localisation renvoyées par les communes, ou figurant dans les dossiers préfectoraux et ceux des différents bureaux d'étude, ainsi que par la consultation de deux sites Internet : www.mappy.fr et www.viamichelin.fr.

Le nombre de sinistres par commune est variable (Illustration 31) :

- 44,5 % des communes n'ont signalé qu'un seul sinistre ;
- 4 communes interrogées présentent plus de dix sinistres.

Nombre de sinistres localisés	Nombre de communes	Proportion relative par rapport aux communes sinistrées (en %)
11 à 20	4	11,1 %
6 à 10	4	11,1 %
2 à 5	12	33,3 %
1	16	44,5 %
<i>Total</i>	36	100 %

Illustration 31 – Nombre de sinistres recensés par commune dans le département des Vosges.

La liste des sinistres avec leurs coordonnées en projection Lambert II étendu est présentée en annexe 3. Pour des raisons de confidentialité, les noms et adresses des propriétaires ne figurent pas dans ce tableau.

Il est à noter que 104 sinistres se sont produits au cours de l'année 2003, ce qui représente 72,7 % des sinistres recensés sur le département. Ce résultat, bien que devant être nuancé par l'absence de précision des communes quant à la date d'apparition des fissures, peut être considéré comme largement représentatif de la sinistralité du département.

Toutefois, il convient de rappeler que le recensement effectué ne peut-être considéré comme exhaustif. La plupart des données recueillies ont été communiquées par les communes, lesquelles ne peuvent avoir connaissance de tous les sinistres survenus sur leur territoire. En effet, certains ont été déclarés directement aux assureurs, une fois acquise la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.

Par ailleurs, certains sinistres comptabilisés peuvent présenter une autre cause que le retrait-gonflement (défaut de construction, vétusté, tassement de remblais, reptation des talus, etc..).

7.4. REPARTITION DES SINISTRES PAR FORMATION GEOLOGIQUE ET DENSITE DE SINISTRES

La nature géologique des terrains affleurants constitue le principal facteur de prédisposition au phénomène de retrait-gonflement, ce qui conduit à étudier la répartition des sinistres par formation géologique. Pour chacun des 143 sinistres recensés et localisés, le croisement avec la carte géologique synthétique des formations argileuses et marneuses a permis de déterminer la nature de la formation concernée au droit de chaque sinistre (illustration 32). Pour chaque formation argileuse ou marneuses sont ainsi indiqués : sa superficie, la part de sa superficie par rapport à la superficie totale du département, et enfin le nombre de sinistres recensés (illustration 33).

L'analyse de la répartition spatiale des sinistres indique que 137 sinistres sont localisés sur des formations identifiées comme argileuses ou marneuses, soit un taux de

95,8 %. Ces résultats attestent d'une bonne corrélation entre la carte de répartition des sinistres et celle des faciès argileux.

Finalement, cinq formations argileuses ou marneuses ne présentent aucun sinistre. Il s'agit des *Dépôts tourbeux*, des *Formations fluvio-glaciaires*, des *Grès médioliasiques*, des *Argillites rouges de Levallois* et enfin des *Schistes et grauwackes*. Ces formations ont été prises en compte dans la carte des argiles pour deux raisons : leur composante argileuse a été vérifiée, et certaines de ces mêmes formations comportent des sinistres dans les départements limitrophes.

D'une manière générale, les 6 sinistres qui sont localisés sur des formations *a priori* non argileuses peuvent résulter de plusieurs facteurs :

- certaines formations considérées comme non argileuses dans le cadre de l'étude peuvent contenir localement des lentilles ou des placages d'argiles non cartographiés à ce jour ;
- quelques sinistres attribués au retrait-gonflement des argiles peuvent provenir en réalité d'autres phénomènes (tassement de remblais ou de sols compressibles, fluages sur des colluvions instables, défauts de construction, chocs thermiques sur les enduits de façade, etc.) ;
- il est possible que certains contours de cartes géologiques soient localement inexacts. Par le fait, les sinistres localisés apparemment en dehors des formations argileuses se trouvent en réalité en limites d'affleurement de ces formations ;
- les sinistres peuvent avoir été mal localisés.

Parmi les formations argileuses ou marneuses, 2 formations identifiées expliquent près de 35 % des sinistres. Il s'agit des *Calcaires et marnes à gryphées* (28 sinistres), et des *Schistes carton, Marnes à septaria et Grès supraliasiques* (20 sinistres). Il convient cependant de noter que les *Calcaires et marnes à gryphées* affleurent sur une superficie deux fois plus étendue que les *Schistes carton, Marnes à septaria et Grès supraliasiques*, soit respectivement 114,45 km² et 62,19 km².

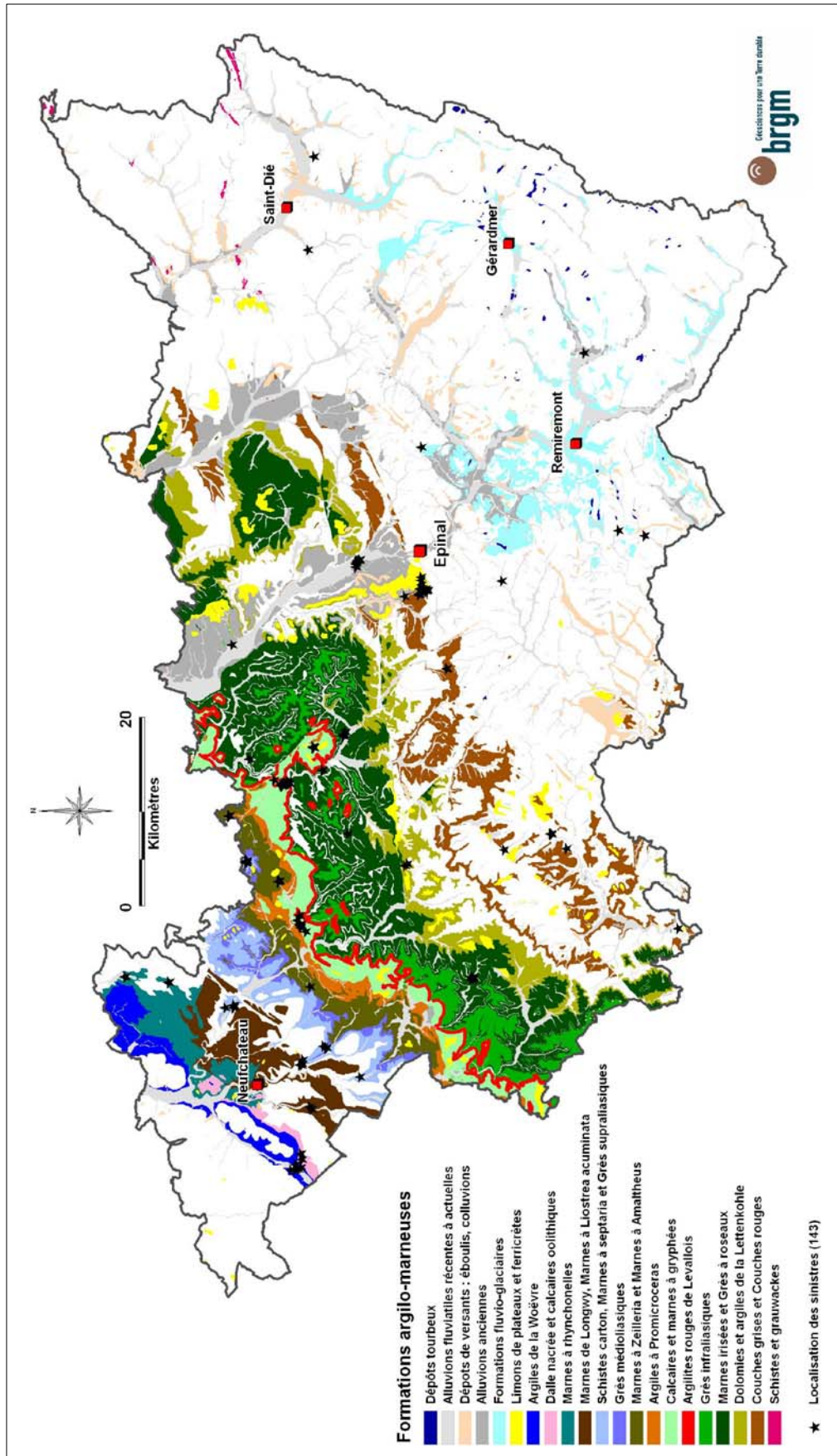


Illustration 32 – Carte de répartition des sinistres par formation géologique.

Code	Nom de la formation argileuse	Superficie de la formation (km ²)	% de la superficie totale	Nombre de sinistres recensés et localisés
Tz	Dépôts tourbeux	6,76	0,12	0
Fz	Alluvions fluviales récentes à actuelles	475,79	8,10	16
E	Dépôts de versants : éboulis, colluvions	114,47	1,95	1
Fx-y	Alluvions anciennes	202,69	3,45	10
G	Formations fluvio-glaciaires	128,71	2,19	0
LP-F	Limons de plateaux et ferricrètes	81,14	1,38	16
j4-5	Argiles de la Woèvre	46,95	0,80	6
j3-4	Dalle nacrée et calcaires oolithiques	13,76	0,23	3
j3b-c	Marnes à rhynchonelles	57,11	0,97	2
j2c	Marnes de Longwy, Marnes à <i>Liostrea acuminata</i>	81,41	1,39	3
l4	Schistes carton, Marnes à septaria et Grès supraliasiques	62,19	1,06	20
l3c	Grès médioliasiques	28,37	0,48	0
l2-3a	Marnes à Zeilleria et Marnes à Amaltheus	82,48	1,40	6
l2b1	Argiles à <i>Promicroceras</i>	42,66	0,73	1
l1-2a	Calcaires et marnes à gryphées	114,45	1,95	28
t7b	Argilites rouges de Levallois	12,47	0,21	0
t7a	Grès infraliasiques	122,78	2,09	5
t6d	Marnes irisées et Grès à roseaux	491,33	8,36	15
t6a	Dolomies et argiles de la Lettenkohle	190,27	3,24	1
t4	Couches grises et Couches rouges	181,95	3,10	4
s	Schistes et grauwackes	3,92	0,07	0

Total formations argileuses	2 541,67	43,27 %	137
-----------------------------	----------	---------	-----

Réseau hydrographique	16,92	0,29 %	-
Formations <i>a priori</i> non argileuses	3 315,41	56,44 %	6

Total département	5 874	100 %	143
-------------------	-------	-------	-----

Illustration 33 – Répartition des sinistres par formation géologique.

7.5. FRÉQUENCE D'OCCURRENCE RAPPORTÉE A LA SURFACE URBANISÉE

Étant donné que les surfaces d'affleurement des différentes formations géologiques sont extrêmement variables, il est important de raisonner sur les densités de sinistres par formation géologique (ramenées à 100 km² de surface d'affleurement). Cependant, il faut garder à l'esprit que l'urbanisation n'est pas uniforme sur l'ensemble du département, ce qui peut constituer un biais pour l'analyse des densités de sinistres par formation. En effet, une formation géologique s'étendant principalement en milieu rural sera nécessairement moins touchée qu'une formation aussi susceptible mais s'étendant dans un site très urbanisé.

C'est pourquoi les densités de sinistres par formation géologique ont été ramenées à 100 km² de surface effectivement urbanisée, conformément à la méthodologie retenue au niveau national.

7.5.1. Détermination de la densité de sinistres par formation

Les contours des zones urbanisées du département ont été tracés à partir des cartes topographiques IGN à l'échelle 1/25 000. Ils ont ensuite été numérisés (illustration 34) et superposés à la carte synthétique des formations argileuses et marneuses. Ceci a permis de calculer, pour chacune des vingt-et-une formations retenues, la surface d'affleurement qui se trouve être réellement urbanisée. Ces contours sont donnés à titre indicatif et peuvent présenter quelques décalages avec la réalité, notamment dans les secteurs urbanisés très récemment.

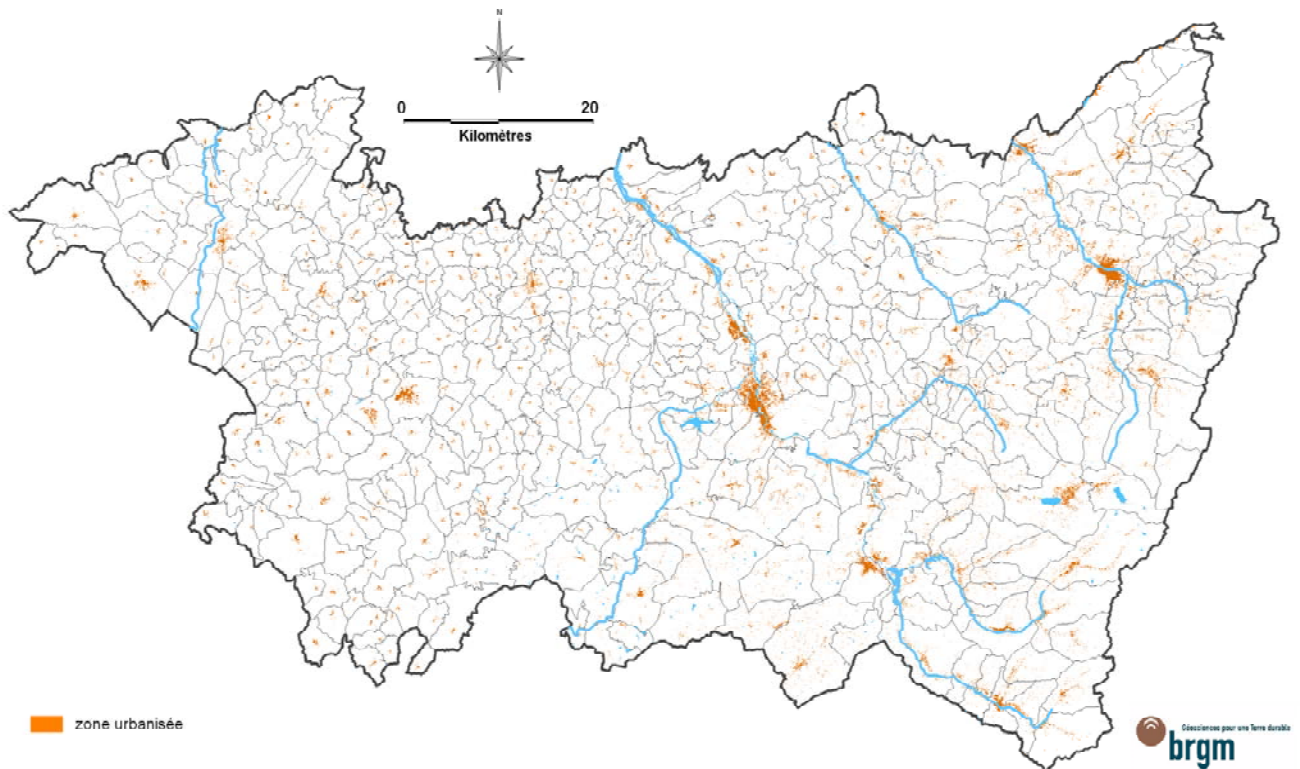


Illustration 34 – Extension des surfaces urbanisées du département des Vosges.

La surface totale des zones urbanisées du département a été ainsi estimée à 113,93 km², soit environ 1,94 % de la superficie totale.

La superposition de la carte synthétique des formations argileuses et marneuses avec celle des zones urbanisées permet d'estimer la surface totale occupée par les zones urbanisées dans les formations retenues. Elles correspondent à 70,52 km², soit environ 2,77 % de leur surface totale d'affleurement. Les surfaces urbanisées et le nombre de sinistres recensés sont indiqués pour chaque formation dans le tableau de l'illustration 35.

Il convient cependant d'être prudent dans l'interprétation des données de sinistralité. En effet, les échantillons manipulés sont numériquement très restreints et la répartition géologique des sinistres ne peut pas être considérée comme totalement représentative sur un plan statistique (et ceci par comparaison avec des départements très urbanisés traités jusqu'à présent et dans lesquels le nombre de sinistres localisés atteint plusieurs milliers). On notera par exemple le cas de la formation des *Dépôts tourbeux* sur laquelle la surface urbanisée est nulle. Par le fait, la sinistralité a été jugée non significative sur cette formation. Il en est de même des *Schistes et grauwackes*, pour lesquels aucun sinistre n'a également été signalé mais sur une surface urbanisée très restreinte (0,06 km²) : un seul sinistre recensé sur cette dernière formation ferait passer la densité de sinistre de 0 à 1 667, soit une valeur supérieure à celle enregistrée pour les formations actuellement les plus sinistrées, ce qui montre bien que cette entité ne peut être considérée comme statistiquement significative pour une formation d'extension géographique aussi limitée.

7.5.2. Détermination du critère densité de sinistres

Les éléments décrits dans la méthodologie, permettent de calculer des densités de sinistres par formation géologique, en prenant en compte la surface urbanisée de la formation. Sous réserve des limites évoquées précédemment quant à la faiblesse statistique de l'échantillon considéré pour certaines formations de faible extension géographique, les résultats obtenus permettent néanmoins de hiérarchiser les formations géologiques en fonction de leur densité de sinistres (illustration 35) en tenant en compte leur taux d'urbanisation respectif.

La densité moyenne ainsi calculée pour les formations retenues comme argileuses est de 194 sinistres pour 100 km² d'affleurement réellement urbanisé. Afin de hiérarchiser les formations argileuses selon leur degré de sinistralité, c'est cet ordre de grandeur qui est retenu ici comme référence pour l'attribution des notes caractérisant la sinistralité des formations argileuses du département. Les notes de sinistralité sont ainsi attribuées, conformément à la méthodologie retenue au niveau national sur la base suivante :

- *note 1* : moins de 200 sinistres pour 100 km² de surface urbanisée dans la formation (ce qui correspond aux formations ayant une densité sensiblement inférieure à la moyenne des zones argileuses) ;
- *note 2* : entre 200 et 1 000 sinistres pour 100 km² de surface urbanisée ;
- *note 3* : plus de 1 000 sinistres pour 100 km² de surface urbanisée. Je suis inscrit

La note caractérisant ainsi la sinistralité des formations argileuses du département est indiquée dans la dernière colonne de l'illustration 35. Au final, onze formations présentent une densité de sinistres supérieure à la valeur moyenne.

N°	Code	Nom de la formation argileuse	Superficie de la formation (km²)	% de la superficie totale	Surfaces urbanisées (km²)	Taux d'urbanisation	Nombre de sinistres recensés et localisés	Densité de sinistres pour 100 km² (urbanisés)	Note densité de sinistres seuil dep
1	Tz	Dépôts tourbeux	6,76	0,12	0	0	0	NS	NS
2	Fz	Alluvions fluviales récentes à actuelles	475,79	8,10	19,89	4,18	16	80	1
3	E	Dépôts de versants : éboulis, colluvions	114,47	1,95	6,25	5,46	1	16	1
4	Fx-y	Alluvions anciennes	202,69	3,45	13,33	6,58	10	75	1
5	G	Formations fluvioglaciales	128,71	2,19	9,62	7,48	0	0	1
6	LP-F	Limons de plateaux et ferricrètes	81,14	1,38	1,37	1,69	16	1 168	3
7	j4-5	Argiles de la Woèvre	46,95	0,80	0,80	1,71	6	747	2
8	j3-4	Dalle nacrée et calcaires oolithiques	13,76	0,23	0,49	3,54	3	616	2
9	j3b-c	Marnes à rhynchonelles	57,11	0,97	0,63	1,09	2	320	2
10	j2c	Marnes de Longwy, Marnes à Liostrea acuminata	81,41	1,39	1,09	1,34	3	274	2
11	l4	Schistes carton, Marnes à septaria et Grès supraliasiques	62,19	1,06	1,02	1,63	20	1 967	3
12	l3c	Grès médioliasiques	28,37	0,48	0,37	1,31	0	0	1
13	l2-3a	Marnes à Zelleria et Marnes à Amaltheus	82,48	1,40	1,66	2,01	6	362	2
14	l2b1	Argiles à Promicroceras	42,66	0,73	0,22	0,52	1	453	2
15	l1-2a	Calcaires et marnes à gryphées	114,45	1,95	2,11	1,84	28	1 329	3
16	t7b	Argilles rouges de Levallois	12,47	0,21	0,17	1,37	0	0	1
17	t7a	Grès infraliasiques	122,78	2,09	0,46	0,37	5	1 092	3
18	t6d	Marnes irisées et Grès à roseaux	491,33	8,36	4,63	0,94	15	324	2
19	t6a	Dolomies et argiles de la Lettenkohle	190,27	3,24	3,57	1,87	1	28	1
20	t4	Couches grises et Couches rouges	181,95	3,10	2,79	1,54	4	143	1
21	s	Schistes et grauwackes	3,92	0,07	0,06	1,55	0	NS	NS
Total formations argileuses			2 541,67	43,27	70,52	2,77	137	194	
Réseau hydrographique			16,92	0,29	-	-	-	-	-
Formations à priori non argileuses			3 315,41	56,44	43,41	1,31	6	14	
Total département			5 874	100,00	114	1,94	143	126	

Illustration 35 – Densité de sinistres par formation ramenée à 100 km² de surface urbanisée et détermination de la note densité de sinistres.

Ainsi, quatre formations obtiennent une note de densité de sinistres égale à 3. Il s'agit des *Limons de plateaux et ferricrètes*, des *Schistes carton*, *Marnes à septaria* et *Grès supraliasiques*, des *Calcaires et marnes à gryphées* et des *Grès infraliasiques*.

Toutes les autres formations se partagent entre une note de densité de sinistre faible (pour huit d'entre elles) ou moyenne (pour 7 des formations retenues comme argileuses).

Comme expliqué au paragraphe 7.5.1., la très faible extension géographique des zones urbanisées sur les *Schistes et grauwackes*, voire leur absence totale pour la formation des *Dépôts tourbeux* ne permet pas de calculer une densité de sinistres significative pour chacune de ces deux formations. Par le fait, aucune note de sinistralité n'a pu leur être attribuée.

8. Carte d'aléa

8.1. DÉTERMINATION DU NIVEAU D'ALÉA

L'aléa retrait-gonflement des argiles est, par définition, la probabilité d'occurrence du phénomène. Le niveau d'aléa a été ici évalué, de manière purement qualitative, pour chaque formation argileuse et marneuse, en combinant la susceptibilité et la densité de sinistres.

La susceptibilité des formations argileuses et marneuses identifiées a été caractérisée à partir de la moyenne des notes lithologique, minéralogique et géotechnique, comme indiqué au chapitre 6. L'indice de susceptibilité ainsi obtenu a été décliné en trois classes, qualifiées respectivement par une susceptibilité faible, moyenne et forte, et prend donc la valeur 1, 2 ou 3.

Pour le facteur densité de sinistres, le critère utilisé est la densité de sinistres rapportée à 100 km² d'affleurement réellement urbanisé. Selon la valeur de cette densité par rapport aux valeurs seuils qui sont respectivement 200 (proche de la densité moyenne de sinistre des formations argileuses ou marneuses dans le département des Vosges) et 1 000, la note de densité de sinistres ainsi attribuée prend la valeur 1 (moins de 200 sinistres pour 100 km² de surface urbanisée dans la formation), 2 (entre 200 et 1 000 sinistres pour 100 km² urbanisés) ou 3 (plus de 1 000 sinistres pour 100 km² urbanisés).

Étant donné que la susceptibilité des formations géologiques a été définie en se basant sur trois critères différents (lithologique, minéralogique et géotechnique) et qu'elle représente une caractéristique intrinsèque de la formation, il a été décidé d'accorder deux fois plus de poids à l'indice de susceptibilité qu'à la note de densité de sinistres, et ce, conformément à la méthodologie retenue au niveau national. Pour chaque formation argileuse ou marneuse, on calcule donc un indice d'aléa en additionnant la note de densité de sinistres et le double de la note de susceptibilité. La valeur ainsi obtenue est un entier potentiellement compris entre 3 et 9. Les formations sont ensuite hiérarchisées en prenant en compte les coupures suivantes, qui permettent de définir trois niveaux d'aléa (faible, moyen et fort) :

- aléa faible : indice d'aléa égal à 3, 4 ou 5 ;
- aléa moyen : indice d'aléa égal à 6 ou 7 ;
- aléa fort : indice d'aléa égal à 8 ou 9.

Concernant les deux formations dont la note de sinistralité a été jugée non significative, soit les *Dépôts tourbeux* et les *Schistes et grauwackes*, le niveau d'aléa sera uniquement établi à partir de la note de susceptibilité.

Le classement ainsi obtenu est présenté dans le tableau de l'illustration 36.

Au regard des résultats, il apparaît qu'aucune formation n'a été classée en aléa fort vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement des argiles dans le département des Vosges.

Six formations sont considérées en aléa moyen, lequel résulte d'une susceptibilité moyenne associée à une densité de sinistres forte (pour une d'entre elles) ou moyenne

(pour quatre d'entre elles) voire non significative. Il s'agit des *Dépôts tourbeux*, des *Argiles de la Woëvre*, des *Marnes à rhynchonelles*, des *Schistes carton*, *Marnes à septaria* et *Grès supraliasiques*, des *Marnes à Zeilleria* et *Marnes à Amaltheus*, et enfin des *Argiles à Promicroceras*.

Quinze formations, couvrant au total 38,19 % de la superficie départementale, sont considérées comme présentant un aléa faible vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Elles résultent d'une susceptibilité faible assortie d'un niveau de sinistralité variable, et pour deux d'entre elles, d'une susceptibilité moyenne accompagnée d'une sinistralité faible.

Parmi ces formations, on peut citer les *Alluvions fluviales récentes à actuelles* ainsi que les *Marnes irisées* et *Grès à roseaux*, qui affleurent respectivement sur près de 476 km² et 491 km², soit presque 16,5 % de la superficie départementale totale.

8.2. CARTE D'ALÉA

La carte départementale d'aléa a été réalisée à partir de la carte synthétique des formations à dominante argileuse ou marneuse, en attribuant à chacune des formations identifiées la classe d'aléa définie ci-dessus. Elle est présentée sur l'illustration 39 et en carte hors-texte à l'échelle 1/150 000 (où les sinistres, les zones urbanisées et les contours des communes sont également reportés). Son échelle de validité est le 1/50 000, puisque les contours sont issus des cartes géologiques de même échelle.

Les zones blanches de la carte correspondent aux formations *a priori* non argileuses, et donc théoriquement dépourvues de tout aléa. Elles couvrent 56,44 % de la superficie départementale (56,73 % en y intégrant le réseau hydrographique, illustration 37). Il n'est toutefois pas exclu que, sur ces derniers secteurs considérés d'aléa *a priori* nul, se trouvent localement des zones argileuses d'extension limitée, notamment issues de l'hétérogénéité de certaines formations essentiellement sableuses ou à l'altération localisée de formations carbonatées. Ces placages ou lentilles argileuses, non cartographiés sur les cartes géologiques (et pour la plupart non cartographiables à l'échelle départementale), sont susceptibles de provoquer localement des sinistres.

Les formations argileuses ou marneuses sont représentées par deux couleurs (jaune et orange) selon leur niveau d'aléa retrait-gonflement (qualifié respectivement de faible ou moyen).

L'illustration 38 précise le classement des formations par niveau d'aléa décroissant. L'illustration 39, quant à elle, présente la répartition spatiale des formations argileuses selon leur classe d'aléa à l'échelle départementale.

N°	Code	Nom de la formation argileuse	Superficie (km²)	% de la superficie totale	Note lithologique	Note minéralogique	Note géotechnique	Susceptibilité	Note de susceptibilité	Note densité de sinistres	Indice aléa	Aléa
1	Tz	Dépôts tourbeux	6,76	0,12	3	-	-	moyen	2	NS	-	2
2	Fz	Alluvions fluviales récentes à actuelles	475,79	8,10	1	2	2	faible	1	1	3	1
3	E	Dépôts de versants : éboulis, colluvions	114,47	1,95	1	2	2	faible	1	1	3	1
4	Fx-y	Alluvions anciennes	202,69	3,45	1	3	1	faible	1	1	3	1
5	G	Formations fluvo-glaciaires	128,71	2,19	1	1	1	faible	1	1	3	1
6	LP-F	Limons de plateaux et ferritrètes	81,14	1,38	2	2	2	faible	1	3	5	1
7	J4-5	Argiles de la Woëvre	46,95	0,80	4	2	2	moyen	2	2	6	2
8	J3-4	Dalle nacrée et calcaires oolithiques	13,76	0,23	1	2	2	faible	1	2	4	1
9	J3b-c	Marnes à rhynchonelles	57,11	0,97	3	2	3	moyen	2	2	6	2
10	J2c	Marnes de Longwy, Marnes à Liostrea acuminata	81,41	1,39	2	2	1	faible	1	2	4	1
11	I4	Schistes carton, Marnes à septaria et Grès supraliasiques	62,19	1,06	4	1	2	moyen	2	3	7	2
12	I3c	Grès médioliasiques	28,37	0,48	1	1	2	faible	1	1	3	1
13	I2-3a	Marnes à Zeilleria et Marnes à Amatheus	82,48	1,40	3	2	2	moyen	2	2	6	2
14	I2b1	Argiles à Promicroceras	42,66	0,73	4	1	3	moyen	2	2	6	2
15	I1-2a	Calcaires et marnes à gryphées	114,45	1,95	2	2	2	faible	1	3	5	1
16	I7b	Argilites rouges de Levallois	12,47	0,21	3	2	2	moyen	2	1	5	1
17	I7a	Grès infraliasiques	122,78	2,09	2	2	2	faible	1	3	5	1
18	I6d	Marnes irisées et Grès à roseaux	491,33	8,36	2	2	2	faible	1	2	4	1
19	I6a	Dolomies et argiles de la Lettenkohle	190,27	3,24	2	2	2	faible	1	1	3	1
20	t4	Couches grises et Couches rouges	181,95	3,10	3	3	1	moyen	2	1	5	1
21	s	Schistes et grauwackes	3,92	0,07	1	1	-	faible	1	NS	-	1
Total formations argileuses			2 541,67									
Total département			5 874,00									

Illustration 36 – Calcul du niveau d'aléa des formations argileuses et marnieuses.

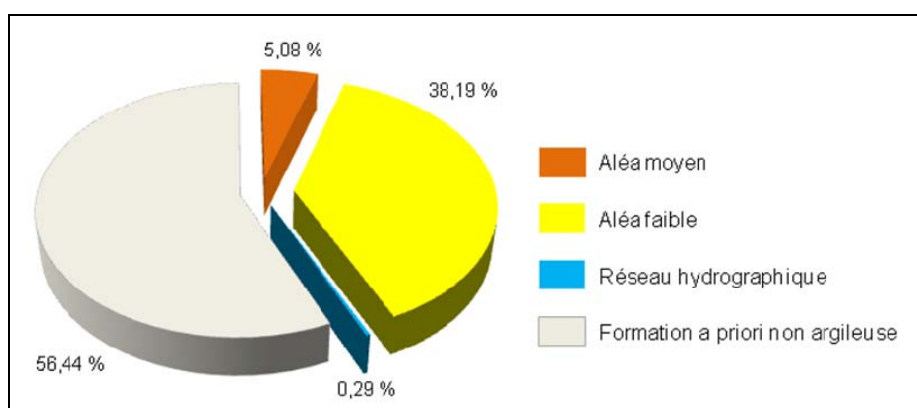


Illustration 37 – Comparaison de la superficie des formations en fonction de la classe d'aléa.

N°	Code	Nom de la formation argileuse	Superficie km ²	% de la superficie totale	Aléa
1	Tz	Dépôts tourbeux	6,76	0,12	moyen
7	j4-5	Argiles de la Woèvre	46,95	0,80	moyen
9	j3b-c	Marnes à rhynchonelles	57,11	0,97	moyen
11	l4	Schistes carton, Marnes à septaria et Grès supraliasiques	62,19	1,06	moyen
13	l2-3a	Marnes à Zeilleria et Marnes à Amaltheus	82,48	1,40	moyen
14	l2b1	Argiles à Promicroceras	42,66	0,73	moyen
Total des formations en aléa moyen			241,05	5,08 %	
2	Fz	Alluvions fluviales récentes à actuelles	475,79	8,10	faible
3	E	Dépôts de versants : éboulis, colluvions	114,47	1,95	faible
4	Fx-y	Alluvions anciennes	202,69	3,45	faible
5	G	Formations fluvio-glaciaires	128,71	2,19	faible
6	LP-F	Limons de plateaux et ferricrètes	81,14	1,38	faible
8	j3-4	Dalle nacrée et calcaires oolithiques	13,76	0,23	faible
10	j2c	Marnes de Longwy, Marnes à Liostrea acuminata	81,41	1,39	faible
12	l3c	Grès médioliasiques	28,37	0,48	faible
15	l1-2a	Calcaires et marnes à gryphées	114,45	1,95	faible
16	t7b	Argillites rouges de Levallois	12,47	0,21	faible
17	t7a	Grès infraliasiques	122,78	2,09	faible
18	t6d	Marnes irisées et Grès à roseaux	491,33	8,36	faible
19	t6a	Dolomies et argiles de la Lettenkohle	190,27	3,24	faible
20	t4	Couches grises et Couches rouges	181,95	3,10	faible
21	s	Schistes et grauwackes	3,92	0,07	faible
Total des formations en aléa faible			2 300,62	38,19 %	
Total formations argileuses			2 541,67	43,27 %	
Réseau hydrographique			16,92	0,29 %	
Formations à priori non argileuses			3 315,41	56,44 %	
Total département			5 874	100 %	

Illustration 38 – Classement des formations en fonction de leur niveau d'aléa.

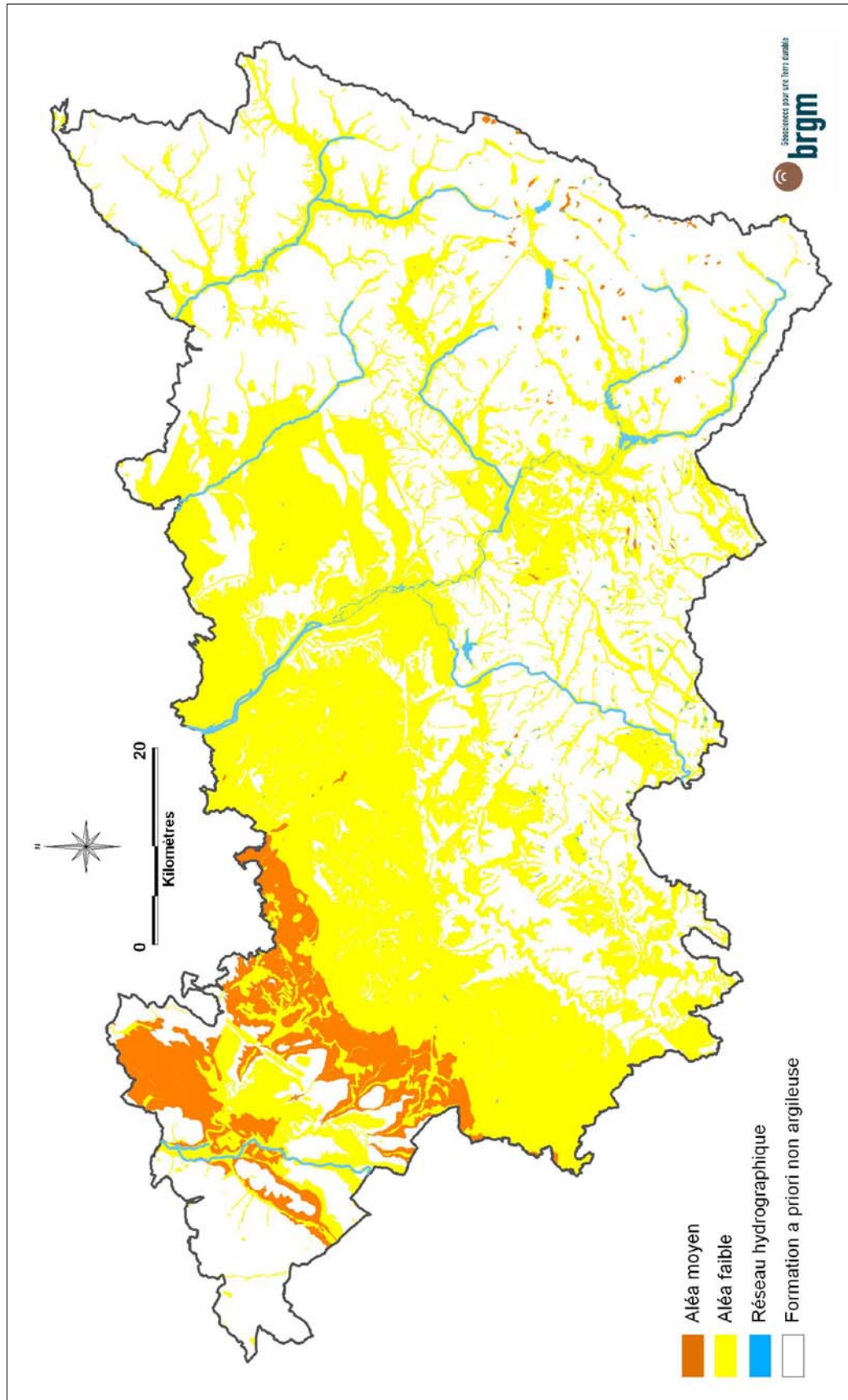


Illustration 39 – Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement des Vosges.

8.3. SYNTHÈSE DE L'ALÉA RETRAIT-GONFLEMENT DANS LE DÉPARTEMENT DES VOSGES

Le département des Vosges se caractérise par une prédisposition relativement limitée à l'aléa retrait-gonflement, puisque 56,73 % de la superficie du département est *a priori* non argileux (y compris le réseau hydrographique). L'aléa faible (38,19 % de la superficie départementale) est prépondérant sur l'aléa moyen (5,08 %). La prise en compte de la répartition spatiale de la sinistralité par formation géologique n'a pas modifié de façon significative la carte de susceptibilité initiale, mais a permis d'affiner la caractérisation de chacune des formations argileuses au regard du phénomène de retrait-gonflement.

Cette carte d'aléa est valide à l'échelle 1/50 000 et une de ses finalités est de servir de support à la prévention du risque à l'échelle départementale. Le niveau d'aléa correspond ainsi à la probabilité d'occurrence d'un sinistre, en un lieu donné, estimée de façon qualitative.

Si l'on souhaite raisonner à l'échelle d'un projet de construction, l'hétérogénéité des formations, telle qu'elle se manifeste à l'échelle départementale, amène à considérer le niveau d'aléa d'une formation comme une probabilité plus ou moins grande de rencontrer, au niveau de la parcelle considérée, des argiles sujettes au phénomène de retrait-gonflement. Cela souligne ainsi l'importance de réaliser une étude de sol avant tout projet de construction dans une zone soumise à aléa : la description de la formation et sa caractérisation vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement, telles qu'elles ont été conduites dans cette étude, peuvent alors servir de guide pour analyser les résultats obtenus sur la parcelle et les replacer dans le contexte plus général de la formation géologique identifiée.

8.4. COMPARAISON AVEC LES CARTES D'ALÉA DES DÉPARTEMENTS VOISINS DÉJÀ COUVERTS

La comparaison des cartes d'aléas déjà établies dans les départements limitrophes à celui des Vosges est justifiée par le fait que la plupart des formations géologiques, dont celles à composante argileuse, se prolongent largement d'un département à l'autre.

A ce jour, la cartographie de l'aléa retrait-gonflement a déjà été réalisée dans les départements suivants :

- Meurthe-et-Moselle (Barchi *et al.*, 2006) ;
- Haute-Marne (Zornette *et al.*, 2007) ;
- Meuse (Zornette *et al.*, 2008) ;
- Haute-Saône (Le Roy, 2009).

Les résultats concernant les notes de susceptibilité des formations argileuses et marneuses sont relativement similaires entre les départements. Les écarts un peu plus importants entre les taux de sinistralité peuvent s'expliquer par l'extension parfois très différentes des zones urbanisées sur certaines formations d'un département à l'autre. C'est le cas par exemple des *Limons de plateaux et ferricrètes*, pour lesquels la note de sinistralité (forte) déterminée dans le département des Vosges à partir de surfaces urbanisées restreintes (1,37 km²) est statistiquement moins significative que la note de

sinistralité (faible) calculée en Meuse sur des surfaces urbanisées plus importantes (5,31 km²).

Au final, seules deux formations argileuses montrent des disparités quant au niveau final d'aléa avec les départements limitrophes. Il s'agit des *Argiles de la Woëvre (j4-5)* et des *Marnes à Zeilleria et Marnes à Amaltheus (I2-3a)*.

- Pour les *Argiles de la Woëvre*, le niveau d'aléa (moyen) déterminé dans les Vosges correspond à celui des départements voisins de la Haute-Marne et de la Meuse. Il diffère cependant du niveau d'aléa (faible) de Meurthe-et-Moselle en raison de la note minimale (1) qualifiant la densité de sinistres de la formation dans ce dernier département ;
- Concernant les *Marnes à Zeilleria et Marnes à Amaltheus*, le niveau d'aléa (moyen) est identique pour les départements de Meurthe-et-Moselle, de la Meuse et des Vosges. En revanche, dans le département de la Haute-Marne, cette même formation avait été caractérisée par un niveau de susceptibilité faible et donc d'aléa faible, cette différence pouvant éventuellement s'expliquer par une évolution des faciès vers le sud.

9. Conclusion

L'objectif de cette étude était d'établir une carte de l'aléa lié au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux dans le département des Vosges. La démarche retenue est fondée essentiellement sur une interprétation de la carte géologique et sur la synthèse d'un grand nombre d'informations concernant la susceptibilité au phénomène des formations à dominante argileuse, ainsi que sur la localisation des sinistres liés aux mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols.

Cette démarche s'inscrit dans le cadre d'une méthodologie générale développée par le BRGM à la demande du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, en concertation avec la profession des assureurs. Mise au point lors d'études similaires menées dans les Alpes de Haute-Provence et les Deux-Sèvres, elle a ensuite été appliquée à une cinquantaine d'autres départements, dont ceux de la Haute-Marne, de la Haute-Saône, de Meurthe-et-Moselle et de la Meuse, limitrophes au département des Vosges. D'autres études départementales sont en cours de réalisation, ce programme devant couvrir à terme l'ensemble du territoire métropolitain.

La démarche de l'étude a d'abord consisté en l'établissement, à partir de la carte géologique départementale harmonisée réalisée dans une première phase de l'étude, d'une cartographie synthétique des formations argilo-marneuses affleurantes à sub-affleurantes. La carte synthétique recense en définitive vingt-et-une formations, dont l'une des caractéristiques est la forte hétérogénéité, liée à leurs conditions de dépôts ou leur altération superficielle.

Les formations ainsi identifiées ont été hiérarchisées vis-à-vis de leur susceptibilité au phénomène de retrait-gonflement. Cette classification a été établie sur la base de trois caractéristiques principales quantifiables : la nature lithologique dominante des formations, la composition minéralogique de leur phase argileuse (proportion de minéraux gonflants de type smectites et interstratifiés smectites/illite) et leur comportement géotechnique (évalué principalement à partir de la valeur de bleu et de l'indice de plasticité).

D'autres facteurs de prédisposition ou de déclenchement sont connus pour jouer un rôle dans la répartition de l'aléa. Mais la plupart, d'extension purement locale, tels que la végétation arborée, certaines actions anthropiques ou les défauts de fondation, ne peuvent être pris en compte dans le cadre d'une étude réalisée à l'échelle départementale, malgré leur importance souvent déterminante. D'autres, tels que le contexte hydrogéologique, la répartition géographique des déficits hydriques et la configuration topographique n'ont par ailleurs pas été jugés suffisamment discriminants pour être pris en considération dans l'élaboration de la carte d'aléa.

En définitive, la carte départementale d'aléa a été établie à partir de la carte synthétique des formations à dominante argilo-marneuse, en se basant sur leur hiérarchisation qui combine leur susceptibilité et la sinistralité associée. Cette dernière a été évaluée à partir du recensement des sinistres déjà survenus dans les Vosges, en calculant pour chaque formation une densité de sinistres, rapportée à la surface d'affleurement réellement urbanisée, ceci afin de permettre des comparaisons fiables entre elles. Ce sont au total 143 sinistres, répartis dans 36 communes, qui ont été

recensés et qui ont pu tous être localisés avec une précision satisfaisante, grâce notamment aux informations fournies par les communes consultées par courrier.

Cet échantillon, bien qu'assurément non exhaustif, paraît largement représentatif du phénomène tel qu'il a été observé à ce jour dans le département.

En appliquant au département des Vosges la méthodologie mise au point au niveau national, deux niveaux d'aléa (moyen et faible) ont été distingués afin de caractériser les formations argileuses ou marneuses vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement, aucune formation n'ayant été identifiée en aléa fort, ceci par comparaison avec d'autres départements déjà traités selon la même méthodologie. Sur une superficie départementale totale de 5 874 km² :

- 5,08 % sont classés en aléa moyen ;
- 38,19 % sont classés en aléa faible ;
- 56,73 % sont considérés comme présentant un aléa *a priori* nul (y compris le réseau hydrographique).

Il n'est toutefois pas exclu que, sur ces derniers secteurs, se trouvent localement des zones argileuses d'extension limitée, notamment dues à l'hétérogénéité de certaines formations essentiellement sableuses mais présentant des lentilles argileuses ou à l'altération localisée de formations carbonatées. Ces placages ou lentilles argileuses, non cartographiés sur les cartes géologiques (et pour la plupart non cartographiables à l'échelle départementale), sont susceptibles de provoquer localement des sinistres.

Cette carte d'aléa retrait-gonflement des terrains argileux du département des Vosges, dont l'échelle de validité est le 1/50 000 et qui est présentée sous format papier hors texte à l'échelle 1/150 000, pourra servir de base à des actions d'information préventive dans les communes les plus touchées par le phénomène. Elle constitue également le préalable à l'élaboration de Plans de prévention des risques naturels (PPRN), en vue d'attirer l'attention des constructeurs et maîtres d'ouvrages sur la nécessité de respecter certaines règles constructives préventives dans les zones soumises à l'aléa retrait-gonflement, en fonction du niveau de celui-ci. Cet outil réglementaire devra insister sur l'importance des études géotechniques comme préalable à toute construction nouvelle dans les secteurs concernés par les formations géologiques à aléa identifié, notamment en raison de la forte hétérogénéité des formations du département. A défaut, il conviendra de mettre en œuvre des règles constructives type par zones d'aléa, visant à réduire le risque de survenance de sinistres.

10. Bibliographie

Références principales citées dans le texte

AFNOR (1993) – Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse : détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tache. Norme française NF P18-592

Barchi P., avec la collab. de Magalhaes S., Capron A. (2006) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de Meurthe-et-Moselle. Rapport BRGM/RP-54820-FR, 150 p., 21 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t.

CEBTP sous l'égide de l'AQC, l'APSAD, l'AFAC, la CCR et la FNB (1991) - Détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres des bâtiments provoqués par la sécheresse. *Guide pratique CEBTP*, 3 fascicules

Chassagneux D., Stieljes L., Mouroux P., avec la collab. de Ducreux G.H. (1995) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse/pluie) dans la région de Manosque (Alpes de Haute Provence). Échelle communale et départementale. Approche méthodologique. Rapport BRGM R 38695

Chassagneux D., Stieljes L., Mouroux P., Ménillet F., Ducreux G.H. (1996) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse-pluie) à l'échelle départementale. Approche méthodologique dans les Alpes de Haute-Provence. Rapport BRGM R39218, 33 p., 6 fig., 1 tabl., 4 ann., 1 pl. h.-t.

Chassagneux D., Meisina C., Vincent M., Ménillet F., Baudu R. (1998) – Guide synthétique pour la prise en compte de l'aléa retrait-gonflement à l'échelle nationale. Rapport BRGM R40355, 33 p., 6 fig., 1 tabl., 1 ann., 1 pl. h.-t.

Chèvremont P. (2008) – Carte géologique harmonisée du département des Vosges (88). Notice géologique. Rapport BRGM/RP-56439-FR, 232 p., 2 fig., 3 tabl., 5 ann., 4 pl. h.-t.

Donsimoni M., Clozier L., Vincent M., avec la collab. de Motteau M., Gallas J.-C., (2001) – *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de la Seine-Saint-Denis*. BRGM/RP-51198-FR, 125 p., 7 fig., 13 tabl., 2 ann., 5 pl. h.-t.

Durand M. (1972) – Propriétés géotechniques des marnes et argiles du Trias supérieur de Lorraine. *Thèse Univ. Nancy*, 225 p.

Flageollet J.C. (2002) – Sur les traces des glaciers vosgiens. Ed. CNRS, 212 p.

Habib P. (1992) – Les sécheresses de 1989 et 1990. *Rev. Fr. Géotech.*, 58, p. 7-30.

Le Roy S. avec la collab. de Plat E. et Méjean A. (2009) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Haute-Saône. Rapport BRGM/RP-57196-FR, 138 p., 54 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t.

Lexa-Chomard A, Pautrot C et coll. (2006) – Géologie et Géographie de la Lorraine. Ed. Serpenoise, 286 p.

Mastchenko A. (2001) – Sécheresse et sols argileux. Projet industriel Alpha Sol. *École des Mines d'Alès*, 74 p., 9 ann.

Mégnyen C. (1980) – Synthèse géologique du Bassin de Paris. Mémoire BRGM n°101, n°102, n°103

Montjoie A., Schroeder C. (2007) – Phénomènes de gonflement-retrait dans les marnes ou « schistes cartons » du Toarcien. *Revue Française de Géotechnique* n° 120-121, 4^{ème} trim. 2007, pp. 183-187

Pannet P., Géron A., Cartannaz C. (2008) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Moselle. Rapport BRGM/RP-56535-FR, 186 p., 41 ill., 5 ann., 3 cartes h.-t.

Prian J.-P., Donsimoni M., Vincent M., avec la collab. de Denis L., Gallas J.-C., Marty F., Motteau M. (2000) – *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de l'Essonne*. BRGM/RP-50376-FR, septembre 2000, 273 p., 32 fig., 11 tabl., 6 ann., 3 cartes h.-t.

Rakotondratsima L.Y.G. (1995) – Mécanismes de gonflement et d'altération des Schistes carton. Thèse INPL, Nancy. 233 p.

Tran Ngoc Lan (1977) – Un nouvel essai d'identification des sols : l'essai au bleu de méthylène. *Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées*, 88, pp. 136-137

Vincent M., Le Nindre Y.-M., Meisina C., Chassignol A.L. (1998) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département des Deux-Sèvres. Rapport BRGM n° R 39967, 89 p., 14 fig., 13 tabl., 6 ann., 2 cartes h.-t.

Vincent M., Bouchut J., Fleureau J.M. (LMSSMat), Masrouri F. (LAEGO), Oppenheim E. (CEBTP Solen), Heck J.V. (CSTB), Ruaux N. (CSTB), Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. (2006) – Etude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti. Rapport final. BRGM/RP-54862-FR. 378 p., 308 ill.

Vincent M., Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. (2007) - Suivi expérimental des profils hydriques et des déplacements verticaux dans des sols argileux sujets au phénomène de retrait-gonflement. *Revue Française de Géotechnique* n° 120-121, 4^{ème} trim. 2007, pp. 45-58

Vincent M., Hédou F., Chirouze M., Plat E., Le Roy S. (2008) – Cartographie à l'échelle départementale de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux à des fins préventives. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris*, pp. 55-62

Zornette N., avec la collab. de Hamoud A. et Beaujoin S. (2008) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Meuse. Rapport BRGM/RP-56295-FR, 118 p., 54 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t.

Zornette N., avec la collab. de Anquetin E. et Krzywda L. (2007) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Haute-Marne. Rapport BRGM/RP-55957-FR, 112 p., 52 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t.

Autres références thématiques

AFNOR (1995 a) – Géotechnique. Essais de reconnaissance des sols. AFNOR, T1.

AFNOR (1995 b) – Essai de gonflement à l'oedomètre. Norme française XP P94-091.

AFNOR (1997) – Essai de dessiccation : détermination conventionnelle de la limite de retrait sur le passant à 400 µm d'un matériau. Norme française XP P94-060-1.

Alba J.M., Dufor M. (1993) – Phénomènes de gonflement-retrait dans les sols marno-argileux. *Ann. Inst. Tech. BTP.*, Sols et Fondations, 514 p.

Amars S., Baguelin F., Canepa Y. (1987) – Influence de la nappe sur les paramètres mesurés des sols. 9^e ECSMFE, 1, p. 3-5.

Angulo R., Gaudet J.P., Thony J.L., Vauclin M. (1993) – Détermination expérimentale des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol gonflant non saturé pour la modélisation des écoulements. *Rev. Fr. Géotech.*, 62, p. 49-57.

Belantour N., Tacherifet S., Pakzad M. (1997) – Étude des comportements mécanique, thermo-mécanique et hydro-mécanique des argiles gonflantes et non gonflantes fortement compactées. *Rev. Fr. Géotech.*, 78, p. 31-50.

Biddle P.G. (1983) – Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils. *Géotechnique*. Vol. XXXIII, pp. 107-126.

Blondeau (1993) – Gonflements de remblais. Utilisation de matériaux de démolition. *Sycodés Informations*, 21, p. 39-41.

Caillère S., Hénin, S., Rautureau M. (1989) – Les argiles. *Éd. Septima*, Paris.

Carrière M., Chevalier M., Toulemont M., Verdier M. (1996) – Sécheresse et catastrophe naturelle. Aspects techniques, juridiques et administratifs. « Le comportement des sols et des ouvrages pendant et après les périodes de sécheresse ». Journées d'étude de l'École des Ponts, Paris, 11-12/12/1996.

Choisnel E., Noilhan J. (1995) – La prévention des sécheresses. *La Recherche*, 272, vol. 26, p. 34-40.

Coquet Y. (1995) – Étude *in situ* des phénomènes de retrait-gonflement des sols. Application à deux sols tropicaux peu gonflants. Thèse Univ. d'Orléans.

Cui M. (1996) – Les apports de la mécanique des sols non saturés. « Le comportement des sols et des ouvrages pendant et après les périodes de sécheresse ». Journées d'étude de l'École des Ponts, Paris, 11-12/12/1996.

Driscoll R. (1983) – The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain. *Geotechnique*. Vol. XXXIII, pp. 93-105.

Filliat G. (1981) – La pratique des sols et fondations – Éditions du Moniteur. N°/ISBN : 2-86282-162-4.

Flavigny E. (1992) – Discussion de l'article « Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie ». *Rev. Fr. Géotech.*, n° 57, 59, p. 75-78.

Gillot J.S. (1987) – Clay in engineering geology. *In* Elsevier (Éd.): Developments in Geological Engineering, 41, 469 p.

Havard M. (1996) – Travaux de terrassements et ouvrages en terre. « Le comportement des sols et des ouvrages pendant et après les périodes de sécheresse ». Journées d'Étude de l'École des Ponts, Paris, 11/12/1996.

Holtzapffel T. (1985) – Les minéraux argileux : préparation, analyse diffractométrique et détermination. *Mém. Soc. Géol. Nord*, 12, 136p.

Kert C. (1999) – Les techniques de prévision et de prévention des risques naturels en France. Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. N° 1540 Assemblée Nationale, n° 312 Sénat, avril 1999.

Lautrin D. (1989) – Utilisation pratiques des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, 160, p. 29-41.

Madsen M.T., Müller-Vonmoos M. (1989) – The swelling behaviour of clays. *In* Elsevier (Éd.) : *Applied Clay Science*, 4, p. 143-156.

Madiou H., Lechani M., Hannachi N. (1997) – Patholex : un système expert pour la pathologie dans la construction. Le cas de la sécheresse. *Sécheresse*, 3, 8, p. 201-206.

Magnan D. (1993) – Caractérisation *in situ* des sols gonflants : l'essai expansol. Thèse de doctorat Univ. Joseph Fourier, Grenoble 1.

Magnan J.P. et Youssefian G. (1989) – Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols. *Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées*, 159, 93-104.

Meisina C., Chassagneux D., Leroi E., Mouroux P. (1998) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux. Proposition de méthodologie. Article et présentation au 8^e Congrès de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement.

Millot G. (1964) – Géologie des argiles. Masson, Paris, 499 p.

Ministère de l'Environnement, Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques, Délégation aux Risques majeurs (1993) – Sécheresse et Construction. *Guide de Prévention*. Édit. La Documentation Française, Paris.

Mouroux P., Margron P., Pinte J.C. (1988) – La construction économique sur sols gonflants. *Manuel et méthodes* n°14, 125 p., BRGM Éditeur.

Mariotti M. (1976) – Le gonflement des sols argileux surconsolidés (aspects du phénomène, influence sur les structures, précautions à envisager). *Mines et Géologie*, 39, p. 13-28.

Noël C. (1991) – Tassement de sols d'assise de fondations consécutifs à la sécheresse. L'expertise dans le cadre de la garantie « catastrophes naturelles ». SNEIC-INFO, 4.

Norie A., Vincent M. (2000) – Établissement de Plans de Prévention des Risques Naturels prévisibles : « mouvements différentiels de terrain liés au phénomène de

retrait-gonflement des sols argileux » - Approche méthodologique dans le département des Deux-Sèvres. *Rapport BRGM/RP-50591-FR*, 14 p., 4 fig., 4 ann..

Parcevaux P. (1980) – Étude microscopique et macroscopique du gonflement de sols argileux. Mém. Univ. P. et M. Curie, Paris VI, 266 p.

Pejon O.J., Le Roux A., Guignard D. (1997) – Comportement à l'eau des roches argilo-marneuses, suivi du gonflement, importance de la minéralogie et des textures. *Bull. Int. Eng. Geol.*, 55, p. 105-119.

Philipponnat G. (1991) – Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie. *Rev. Fr. Géotech.*, 57, p. 5-22.

Philipponnat G. (1987) – Sols expansifs en France. Identification et recommandations pour les fondations. 6^e Int. Conf. Exp. Soils, 7-10, New Delhi.

Piantone P. (1986) – Minéralogie et cristallographie des phyllosilicates : application à l'étude des altérations hydrothermales. Rap. BRGM 86 DAM 019 GMX, 61 p.

Robinet J.C., Pakzad M., Plas F. (1994) – Un modèle rhéologique pour les argiles gonflantes. *Rev. Fr. Géotech.*, 67, p. 57-67.

Schaeffner M. (1989) – Introduction de la valeur de bleu de méthylène d'un sol dans la classification des sols. Recommandation pour les terrassements routiers. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, 163, p. 9-16.

Scherer M. (1996) – Bilan des périodes récentes de sécheresse en France. « Le comportement des sols et des ouvrages pendant et après les périodes de sécheresse ». Journées d'étude de l'École des Ponts. Paris, 11-12/12/1996.

Serratrice J.F., Soyez B. (1996) – Les essais de gonflement. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, 204, p. 65-85.

Taibi S. (1994) – Comportement mécanique et hydraulique des sols partiellement saturés. Thèse de doctorat, École Centrale, Paris.

Taylor R.K., Smith T. J. (1986) – The engineering geology of clay minerals: swelling, shrinking and mudrock breakdown. *Clays Min.*, 21, p. 235-260.

Tessier D. (1990) – Organisation des matériaux argileux en relation avec leur comportement hydrique. In Decarreau (Éd.) : Matériaux argileux : structure, propriétés et applications.

Toulemont M. (1996) – Bilan des dommages dus à la sécheresse comme catastrophe naturelle. « Le comportement des sols et des ouvrages pendant et après les périodes de sécheresse ». Journées d'étude de l'École des Ponts, Paris, 11-12 décembre 1996.

Toulemont M., Cojean R., Faccendini J.P. (1994) – Cartographie prévisionnelle des sols sensibles à la sécheresse : un outil d'information préventive. *Mappemonde*, 4, p. 2-4.

Vincent M. (2003) – Retrait-gonflement des sols argileux : méthode cartographique d'évaluation de l'aléa en vue de l'établissement de PPR. – 3^{ème} Conférence SIRNAT – Forum des Journées pour la Prévention des Risques Naturels, Orléans, janvier 2003. Actes du Colloque, 7p., 5 fig.

Vincent M. (2003) – Le risque de retrait-gonflement des argiles. – Cahiers de l'IAURIF, n°138, octobre 2003, pp.95-101.

Vincent M. (2005) – Cartographie sous SIG de l'aléa retrait-gonflement des argiles à des fins préventives - France – Systèmes d'information géographique et gestion des risques, publication ISTED, janvier 2005, pp.12-15.

Vincent M. (2005) – Prévention du risque sécheresse : cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement des argiles et établissement de plans de prévention des risques. – Géologues (revue officielle de l'Union Française des Géologues), 146, septembre 2005, pp.43-47.

Vincent M. (2006) – Retrait-gonflement des sols argileux : un aléa géologique lié aux conditions climatiques – *Géosciences*, 3, mars 2006, pp.50-55.

Voltz M., Cabidoche Y.M. (1987) – Sur le retrait macroscopique d'un sol argileux gonflant. Modèle de relation entre le retrait vertical et les variations de teneur en eau. Vérification expérimentale du modèle. *C.R. Acad. Fr.*, Paris, 305, série II, p. 511-516.

Waschkoski (1999) – Expertises géotechniques « sécheresse 1990 » en vue d'une reconnaissance de catastrophe naturelle. *Geo.* p. 38-39.

Cartes géologiques à 1/50 000

Chrétien J.C., Verbecq F., Meyer R. (1974) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Rambervillers (305). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 8 p.

Coulon M., Paicheler J.C., Guérin H. (1986) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Thann (412). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 137 p.

Desprez N., Durand M., Jurain G., Minoux G. (1971) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Plombières-les-Bains (375). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 14 p.

Dormois R., Maubeuge P.L., Minoux G. (1967) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Châtenois (303). Paris, Service de la Carte Géologique de la France, 1 feuille, notice 16 p.

Durand M., Vincent P.L. (1988) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Epinal (339). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 43 p.

Gagny C., Jung J., Huu Nghiep H., et al., Fluck P. (coord.) (1976) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Münster (377). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 71 p.

Guintrand Y., Rossi M., Griveaux B., et al., Théobald N. (coord.) (1974) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Giromagny (411). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 23 p.

Haguenaer B., Durand M., Fauvel P.J., et al. (1978) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Cirey-sur-Vezouze (270). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 48 p.

Hameurt J., Fluck P., Von Eller J.P., et al. (1978) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Gérardmer (341). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 73 p.

Hameurt J., Hollinger J., Durand M., Vincent P.L., Flageollet J.C. (1979) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Remiremont (376). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 49 p.

Hameurt J., Durand M., Flageollet J.C., Vincent P.L. (coord.) (1985) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Bruyères (340). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 51 p.

Hilly J., Allouc J., Marchal C., et al. (1977) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Bayon (268). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 28 p.

Laugier R. (1966) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Lunéville (269). Paris, Service de la carte géologique de la France, 1 feuille, notice 10 p.

Mabeuge P.L., Nicklès M. (1963) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Vézelize (267). Paris, Service de la carte géologique de la France, 1 feuille, notice en marges.

Maubeuge P.L. (1970) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Gondrecourt-le-Château (266). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 8 p.

Maubeuge P.L. (1974) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Neufchâteau (302). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 17 p.

Maubeuge P.L. (1976) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Bourmont (337). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 18 p.

Maubeuge P.L. (1982) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Bourbonne-les-Bains (373). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 31 p.

Minoux G. (1964) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Vittel (338). Paris, Service de la carte géologique de la France, 1 feuille, notice 6 p. Réimprimée en 1979.

Minoux G., Théobald N. (1974) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Monthureux-sur-Saône (374). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 29 p.

Minoux G. (1978) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Mirecourt (304). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 26 p.

Stchépinsky V., Nicklés M., Godel J. (1965) - Carte géol. France (1/50 000), feuille Doulaincourt (301). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 8 p.

Von Eller J.P., Jacquet P., Kern B., et al., Blanalt J.-G. et Ham P. (coord.) (1970) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Sélestat (307). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 47 p.

Von Eller J.P., Hameurt J., Juteau T., et al., Pfeiffer B. (coord.) (1975) – Carte géol. France (1/50 000), feuille Saint-Dié (306). Orléans, BRGM, 1 feuille, notice 45 p.

Sites internet

<http://www.argiles.fr> : site internet sur l'aléa retrait-gonflement des sols argileux développé par le BRGM, affichant les cartes d'aléa déjà publiées, par commune et par département

<http://www.brgm.fr> et <http://www.infoterre.fr> : sites internet du BRGM

<http://www.meteofrance.fr> : site internet de Météo France

<http://www.prim.net> : site internet du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDAT), sur la prévention des risques majeurs, affichant les risques naturels et technologiques ainsi que les reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle

<http://www.mappy.fr> et <http://www.viamichelin.fr> : sites Internet d'itinéraires routiers et cartes urbaines

Annexe 1

Rappels sur le mécanisme de retrait-gonflement des argiles

Le terme argile désigne à la fois une classe granulométrique ($< 2 \mu\text{m}$) et une nature minéralogique correspondant à la famille des phyllosilicates.

Dans le cadre de cette étude, on s'intéressera essentiellement à la composante argileuse qui constitue les formations géologiques argileuses et/ou marneuses, affleurantes à sub-affleurantes. Dans cette approche géologique, on considère que celles-ci constituent les sols argileux. Cette approche est différente de celle consistant à prendre en compte les sols argileux s.s. dérivant de processus pédogénétiques superficiels complexes.

À l'échelle microscopique, les minéraux argileux se caractérisent par une structure minéralogique en feuillets. Ceux-ci sont constitués d'un assemblage de silicates (SiO_3) et d'aluminates (Al_2O_3) entre lesquels viennent s'interposer des molécules d'eau. La majorité des minéraux argileux appartient à la famille des phyllosilicates 2:1 (deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique). La structure des assemblages cristallins est variable selon le type d'argile. Certains d'entre eux, telle que la montmorillonite, présentent des liaisons faibles entre feuillets, ce qui permet l'acquisition ou le départ de molécules d'eau.

L'hydratation des cations situés à la surface des feuillets provoque leur élargissement, ce qui se traduit par une augmentation du volume du minéral. C'est le phénomène de gonflement intracristallin ou interfoliaire. Le gonflement est lié au phénomène d'adsorption d'eau sur les sites hydrophiles de l'argile.

Ce processus est réversible. Un départ d'eau entraîne une diminution du volume du minéral. C'est le phénomène de retrait.

Les phénomènes de retrait-gonflement s'expriment préférentiellement dans les minéraux argileux appartenant au groupe des smectites (montmorillonite, beidellite, nontronite, saponite, hectorite, sauconite) et dans une moindre mesure au groupe des interstratifiés (alternance plus ou moins régulière de feuillets de natures différentes, par exemple illite – montmorillonite).

À l'échelle macroscopique, ces micro-agrégats de feuillets s'organisent en assemblages plus ou moins anisotropes et cohérents, en fonction de la forme des particules élémentaires qui les composent, et en fonction de la force des liaisons entre particules. Ces dernières sont assurées par des molécules d'eau intercalées. Ce mode d'assemblage, qui définit la texture du « sol argileux » dépend de la nature minéralogique des argiles, du mode de sédimentation et de l'état de consolidation du matériau. En particulier, une argile vasarde ne présentera pas la même texture – et donc pas la même cohésion – qu'une argile surconsolidée, par exemple à la suite d'un enfouissement à grande profondeur.

À cette échelle, la variation de teneur en eau dans le sol se traduit également par des variations de volume du matériau. On parle alors de gonflement interparticulaire. Ce phénomène affecte toutes les argiles, mais son amplitude est nettement plus faible que le gonflement interfoliaire (qui n'affecte que certaines argiles).

Les sols argileux se caractérisent donc par une grande influence de la teneur en eau sur leur comportement mécanique. En géotechnique, on identifie d'ailleurs les différents types de sols argileux sur la base de ce critère. Pour cela on détermine les teneurs en eau (dites limites d'Atterberg) à partir desquelles le comportement du matériau se modifie. Atterberg, puis par la suite Casagrande, ont défini de façon conventionnelle, à partir de la teneur en eau, les limites de divers états de consistance d'un sol donné :

- la limite de liquidité W_L sépare l'état liquide de l'état solide ; elle correspond à la teneur en eau à partir de laquelle l'argile commence à s'écouler sous son poids propre ;
- la limite de plasticité W_P sépare l'état plastique de l'état solide (avec retrait) ; elle correspond à la teneur en eau en deçà de laquelle l'argile ne peut plus se déformer sans microfissuration ;

L'étendue du domaine plastique compris en ces deux valeurs est dénommée indice de plasticité : $IP = W_L - W_P$. Elle représente l'aptitude de l'argile à acquérir de l'eau.

- la limite de retrait W_R : lorsque la teneur en eau diminue en dessous de W_P , le volume de sol argileux se réduit progressivement, mais le matériau reste saturé en eau jusqu'à une valeur dite limite de retrait qui sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait.

À partir de ce stade, si la dessiccation se poursuit, elle se traduit par une fissuration du matériau. En cas de réhydratation de l'argile, l'eau pourra circuler rapidement dans ces fissures. Au-delà de W_R , l'arrivée d'eau s'accompagnera d'une augmentation de volume, proportionnelle au volume d'eau supplémentaire incorporé dans la structure.

Les limites d'Atterberg, qui sont des teneurs en eau particulières, s'expriment, comme la teneur en eau W , en %.

Les phénomènes de retrait (liés à une diminution de volume du matériau qui se traduit, verticalement par un tassement, et horizontalement par une fissuration), et de gonflement (liés à une augmentation de volume), sont donc essentiellement causés par des variations de teneur en eau. En réalité, cependant, le phénomène est aussi régi par des variations de l'état de contrainte, et plus précisément par l'apparition de pressions interstitielles négatives.

Dans le cas d'un sol saturé, la contrainte verticale totale, qui règne dans le sol à une profondeur donnée, est la somme de la pression interstitielle due à l'eau et d'une contrainte dite effective qui régit le comportement de la phase solide du sol (pression intergranulaire). La contrainte totale est constante puisque liée à la charge exercée par les terrains sus-jacents (augmentée éventuellement d'une surcharge due, par exemple, à la présence d'une construction en surface). L'apparition d'une pression interstitielle négative, appelée succion, se traduit donc par une augmentation de la contrainte effective (c'est-à-dire une consolidation du squelette granulaire) et une expulsion d'eau. Un sol argileux situé au-dessus du niveau de la nappe, et qui est saturé, est ainsi soumis à une pression de succion qui lui permet d'aspirer l'eau de la nappe, par capillarité, et de maintenir son état de saturation. Cette pression de succion peut atteindre des valeurs très élevées à la surface du sol, surtout si celle-ci est soumise à une évaporation intense.

Annexe 2

Liste des 12 communes des Vosges reconnues en état de catastrophe naturelle au titre des mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols et dates des périodes de reconnaissance – Etat au 15 février 2009

Données transmises par la Préfecture des Vosges et complétées par le site www.prim.net
(au 15 février 2009)

Code Insee	Commune	Date Début	Date Fin	Date Arrêté	Date JO
88083	Certilleux	01/07/2003	30/09/2003	25/08/2004	26/08/2004
88099	Chavelot	01/07/2003	30/09/2003	27/07/2006	08/08/2006
88100	Chef-Haut	01/07/2003	30/09/2003	30/03/2006	02/04/2006
88206	Gironcourt-sur-Vraine	01/07/2003	30/09/2003	22/11/2005	13/12/2005
88259	Landaville	01/07/2003	30/09/2003	30/03/2006	02/04/2006
88178	Les Forges	01/07/2003	30/09/2003	22/11/2005	13/12/2005
88270	Liffol-le-Grand	01/07/2003	30/09/2003	27/07/2006	08/08/2006
88292	Mattaincourt	01/07/2003	30/09/2003	22/11/2005	13/12/2005
88357	Poussay	01/07/2003	30/09/2003	06/02/2006	14/02/2006
88365	Racécourt	01/07/2003	30/09/2003	03/08/2006	24/08/2006
88381	Relanges	01/07/2003	30/09/2003	30/03/2006	02/04/2006
88525	Vroville	01/01/1996	30/11/1996	12/03/1998	28/03/1998
		01/07/2003	30/09/2003	22/11/2005	13/12/2005

Annexe 3

Liste des sinistres "sécheresse" recensés dans le cadre de cette étude

Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux pour le département des Vosges

N°	Commune	Notation	X_L2e	Y_L2e	Premier désordre
1	ATTIGNEVILLE	I4	857143,22	2381678,2	2003
2	ATTIGNY	Fz	875528,54	2347097,51	2003
3		LP-F	875612,29	2347097,51	2003
4		LP-F	875566,92	2347184,69	2003
5		LP-F	875587,78	2347226,51	2003
6		-	874011,67	2345493,33	2003
7	BAZOILLES-SUR-MEUSE	j2c	846584,45	2372729,22	2003
8		j2c	846350,73	2372569,63	2003
9		j2c	846344,32	2372511,55	2003
10	BETTONCOURT	t6d	883530,05	2379134,35	2003
11	BOULAINCOURT	I2b1	877499,21	2381294,51	
12	CERTILLEUX	I4	851034,02	2373769,61	2003
13		I4	851011,34	2373609,22	2003
14		I4	851057,51	2373786,22	2003
15		I4	851154,32	2373562,13	2003
16		-	851597,12	2373456,61	2003
17	CHARMOIS-DEVANT-BRUYERES	Fz	916624,81	2360887,99	2002
18	CHATENOIS	I2-3	859359,41	2372690,39	2006
19	CHATILLON-SUR-SAONE	Fz	865520,5	2333682,34	2007
20	CHAVELOT	Fy-z	904667,86	2367389,92	2006
21		Fy-z	904225,17	2367870,07	2003
22		Fy-z	904582,05	2367495,55	2003
23		Fz	904553,29	2367706,13	
24		Fy-z	903896,59	2367857,36	
25		Fz	904378	2367837,08	
26		Fy-z	903902,09	2367779,91	
27		Fy-z	904580,9	2367466,34	
28		Fz	904370,67	2367800,19	
29		Fy-z	903889,14	2367792,86	
30		Fz	904407,56	2367792,86	
31	CHEF-HAUT	I4	872629,64	2379364,86	2003
32		I4	872537,65	2379480,11	2003
33		I4	872737,79	2379379,52	2003
34		I4	872669,05	2379440,24	2003
35		I4	872501,67	2379393,73	2003
36		I4	872712,7	2379442,53	2003
37	CHEF-HAUT	I4	872694,6	2379464,42	2003

N°	Commune	Notation	X_L2e	Y_L2e	Premier désordre
38	COINCHES	Fz	947466,94	2372282,18	
39	CRAINVILLIERS	Fz	860101,58	2355576,87	2003
40		t6d	860316,05	2355547,2	2003
41		t6d	860392,81	2355515,81	2003
42		t6d	860256,82	2355320,58	2003
43		Fz	860166,08	2355493,12	2003
44	DOMMARTIN-AUX-BOIS	t4	893046,82	2358244,12	2003
45		t4	893097,35	2358205,74	2003
46	ESTRENNES	t6d	875640,59	2368688,66	2003
47	GIRONCOURT-SUR-VRAINE	I1-2	866394,54	2374040,1	2003
48		I1-2	865233,17	2373136,74	2003
49		I1-2	865641,14	2373687,81	2003
50		I1-2	865857,45	2373747,16	2003
51		I1-2	865822,5	2373729,63	2003
52		I1-2	865885,29	2373719,2	2003
53		I1-2	865902,7	2373698,24	2003
54		I1-2	865996,88	2373785,42	2003
55		I1-2	865787,67	2373701,79	2003
56		I1-2	866010,85	2373680,82	2003
57		I1-2	865826,05	2373628,58	2003
58		I1-2	865798,1	2373645,99	2003
59	I1-2	866875,84	2373799,4	2003	
60	I1-2	866879,27	2373761,02	2003	
61	HAREVILLE	t6a	872413,91	2362377,94	2004
62		Fz	872197,72	2362655,19	2004
63	HARMONVILLE	j3b-c	860391,89	2392320,14	
64	HOUEVILLE	I4	857137,95	2380811,61	2003
65		I4	857115,26	2380764,53	2003
66		I4	857287,92	2380722,71	2003
67		I4	857380,26	2380727,06	2003
68	JAINVILLOTTE	I4	849788,56	2367426,13	
69	LANDAVILLE	I4	852871,23	2370892,59	2003
70		I4	853028,18	2371259,55	2003
71		I4	852865,84	2371017,93	2003
72		I4	852865,84	2371017,93	2003
72	LANGLEY	Fy-z	895622,53	2380938,67	2006
73	LES FORGES	LP-F	901547,16	2360933,13	2003
74		t4	901135,63	2360778,01	2003

N°	Commune	Notation	X_L2e	Y_L2e	Premier désordre	
75	LES FORGES	Fz	900886,33	2361199,96	2003	
76		LP-F	901078,12	2361158,14	2003	
77		LP-F	901543,72	2360474,63	2003	
78		E	901390,31	2360165,99	2003	
79		LP-F	902800,87	2360912,28	2003	
80		t4	901287,43	2360368,2	2003	
81		LP-F	901317,11	2360760,59	2003	
82		LP-F	900945,68	2361140,73	2003	
83		LP-F	901983,09	2360854,65	2003	
84		LP-F	901562,85	2360446,68	2003	
85		LP-F	901378,05	2360375,19	2003	
86		LP-F	901507,06	2360464,09	2003	
87		LP-F	901585,54	2361055,26	2003	
88		LP-F	900962,18	2361126,4	2003	
89		LP-F	902492,45	2360956,39		
90		LIFFOL-LE-GRAND	j4-5	839909,98	2374706,2	2003
91			j3-4	841648,08	2373682,2	2003
92			j4-5	839885,12	2374706,66	2003
93			j4-5	840470,67	2374245,87	2003
94	j4-5		840125,6	2373631,33	2003	
95	j4-5		839848,11	2374300,75	2003	
96	j3-4		841526,76	2373685,75	2003	
97	j4-5		839964,28	2373974,8	2003	
98	j3-4	841009,94	2373525,58	2003		
99	MATTAINCOURT	t6d	882364,55	2371345,59	2003	
100		t6d	882343,59	2371333,33	2003	
101	PLOMBIERES-LES-BAINS	-	907749,61	2339990,08		
102		-	907212,63	2337228,44		
103	POUSSAY	t6d	881000,17	2374882,29	2003	
104		l1-2	880797,27	2375820,48	2003	
105		t7a	880948,5	2375368,4	2003	
106		t7a	880923,07	2374854,79	2003	
107		t7a	880938,99	2375644,16	2003	
108		t6d	881183,71	2374980,82	2003	
109		l1-2	880820,19	2375131,59	2003	

N°	Commune	Notation	X_L2e	Y_L2e	Premier désordre	
110	POUSSAY	t7a	880990,43	2375239,74	2003	
111		l1-2	880660,48	2375676,13	2003	
112		Fz	881017,01	2375395,78	2003	
113		l1-2	881291,97	2376518,66	2003	
114		Fz	881201,47	2375097,91	2003	
115		t6d	881002,81	2375023,44	2003	
116		t7a	880942,43	2374972	2003	
117		l1-2	880678,24	2375610,48	2003	
118		RACECOURT	t6d	886353,34	2368921,23	2003
119			t6d	886108,05	2369059,06	2003
120	t6d		886116,07	2369133,3	2003	
121	t6d		885991,42	2369106,72	2003	
122	t6d		885886,82	2369130,66	2003	
123	RELANGES	-	873885,07	2352128,05	2003	
124	TAINTRUX	-	937545,05	2372924,33	2004	
125	TRANQUEVILLE-GRAUX	j3b-c	859795,91	2387666,30		
126	TOTAINVILLE	l2-3	870566,97	2375936,88	2004	
127		l2-3	870576,25	2375912,37	1992	
128		l2-3	870540,62	2375947,08	2004	
129		l2-3	870616,92	2375907,32	1995	
130		l2-3	870544,06	2375933,56	2005	
131		Fz	870503,84	2376036,9	1994	
132		URIMENIL	Fz	902382,12	2352390,87	2006
133	UXEGNEY	Fy-z	900763,52	2362676,27	2003	
134	VAGNEY	Fy-z	926604,32	2343624,85		
135	VROVILLE	l1-2	884679,85	2372311,74	1998	
136		l1-2	884678,13	2372289,97	1998	
137		l1-2	884712,96	2372294,33	1998	
138		l1-2	884723,5	2372281,27	2003	
139		l1-2	884730,49	2372266,37	2003	
140		l1-2	884731,29	2372328,24	1998	
141		l1-2	884740,91	2372335,23	1998	
142		l1-2	884785,36	2372343,93	1998	
143		l1-2	884727,39	2372366,85	1996	

Annexe 4

Coordonnées des bureaux d'études ayant fourni des données géotechniques

Coordonnées de l'Union Syndicale de Géotechnique :

USG Maison de l'Ingénierie
3, rue Léon Bonnat
75 016 PARIS

Coordonnées des bureaux d'études et organismes ayant fourni des rapports :

ANTEA 1, avenue du parc de Brabois
54500 VANDOEUVRE-LES-NANCY
Tél. : 03 83 44 81 44
Fax : 03 83 44 45 36

CETE 71, rue de la Grande Haie
54510 TOMBLAINE
Tél. : 03 87 20 43 00
Fax : 03 87 20 46 99

FONDASOL 102 impasse Henri Becquerel
54710 LUDRES
Tél. : 03 83 98 34 00
Fax : 03 83 98 33 77

1, rue des Couteliers
57070 METZ
Tél. : 03 87 74 96 77
Fax : 03 87 76 95 10

GEOTEC Dynapole Ludres-Fléville
273, rue du ruisseau d'Urpont
54710 FLEVILLE DEVANT NANCY
Tél. : 03 83 51 04 36
Fax : 03 83 51 04 33

URETEK 15 boulevard Robert Thiboust – Triade 1
77706 MARNE LA VALLEE Cedex 4
Tél. : 01 60 42 42 42
Fax : 01 60 42 42 43

Coordonnées des assurances ayant fourni des rapports :

MAIF 551, avenue Paul Muller
54600 VILLERS LES NANCY
Tél. : 03 83 41 62 00

MATMUT 31, rue des Quatre Eglises
54000 NANCY
Tél. : 03 83 35 89 82

Annexe 5

Résultats des analyses minéralogiques réalisées au cours de cette étude

COORDONNEES DES ECHANTILLONS PRELEVES :

Point	X_L2e	Y_L2e
P1	932897,97	2351312
P1(reserve)	938174,03	2349140,95
P10a	856835,95	2382982
P10bbis	850925,98	2371076,95
P11b	863457,95	2382582,96
P12abis	861502,05	2381289,95
P12bbis	856331,96	2369256,02
P13a	870557	2375916,97
P13b	855079,97	2367567,98
P14abis	877783	2378833,97
P14b	858241	2363796,99
P15abis	880554,04	2375756
P15b	861005,97	2363862,98
P16b	860423,05	2363110,96
P16quat	865973,96	2369971,95
P17bbis	860834,01	2361131,01
P17quat	865484,99	2369751,98
P18a	860355	2355594,99
P18bbis	912974	2373603,05
P19a	860195,98	2350308,05
P19bbis	914496,94	2372690,98
P20abis	900487,98	2361939,05

Point	X_L2e	Y_L2e
P20bbis	873439,98	2347082,97
P21abis	901956,96	2360816,98
P21bbis	875588	2347325,97
P22a	932319,97	2330652,05
P22bbis	935173,05	2327568,01
P3	946343,95	2374148,96
P5abis	927975,58	2351116,67
P5b	943064	2368410,97
P6abis	902368,03	2361184,97
P6b	858808	2364428,03
P7a	839311,02	2373938,04
P7b	854521	2391738,96
P8abis	841371,97	2373444,03
P8b	848767,99	2383500,99
P9a	842014,01	2373120,03
P9b	849587,95	2383848,02
Pal	873541,03	2374439,39
Peb	948175,08	2354515,54
Pmo	935757	2336427,29
Pmo2	947047,16	2354399,25
Psc	874620	2462810

ANALYSE EFFECTUEE PAR :

Université Lille 1
Laboratoire Géosystèmes
UMR 8157 CNRS
59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France)

METHODE UTILISEE :

La détermination, qualitative et semi-quantitative, de la fraction argileuse < 2 mm est basée sur l'utilisation de la diffraction des rayons X.

1. Principe

Le principe est basé sur la diffraction d'un faisceau incident sur une structure cristalline selon la loi de Bragg : $l = 2d \sin\theta$ où l correspond à la longueur d'onde du faisceau incident, d représente la distance inter-réticulaire du réseau cristallin analysé et θ l'angle d'incidence du faisceau. En faisant tourner selon un angle θ l'échantillon autour d'un axe perpendiculaire au faisceau incident, il est possible de déterminer les distances d (001) caractéristiques des différents minéraux argileux (Holtzappel, 1985).

2. Appareillage

L'analyse a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre Philips de type PW 1730, muni d'une anticathode de cuivre. Les modalités expérimentales nécessitent une tension de 40 kV, une intensité de 25mA. Le balayage angulaire s'étend de 2,49 à 32,5 °2θ pour une sensibilité réglée à 1000 coups par seconde.

3. Préparation des échantillons

La technique de préparation est décrite en détail par Holtzappfel (1985). Les échantillons sont mis à déliter dans de l'eau distillée. Ils sont ensuite décarbonatés par un traitement à l'acide chlorhydrique dilué à N/5. L'excès d'acide est éliminé par rinçages successifs à l'eau distillée jusqu'à défloculation du matériel. Les suspensions obtenues sont placées en piluliers. Les micro-agrégats sont éliminés par utilisation d'un micro-homogénéisateur. La séparation de la fraction granulométrique inférieure à 2 mm s'effectue en prélevant, à l'aide d'une seringue, la partie supérieure de la suspension (1,5 cm) après décantation pendant 1 h 15 min. Ces paramètres sont calculés d'après la loi de Stokes : $t = 190 \times \frac{X}{d^2}$ où t représente le temps de décantation, d le diamètre moyen des particules et X la profondeur de chute des particules de diamètre d. La fraction ainsi prélevée est centrifugée à 3500 tours/min. pendant 45 min, le culot obtenu est étalé à l'aide d'une lamelle sur une lame de verre rainurée afin d'orienter les minéraux argileux selon le plan (001).

L'analyse diffractométrique est réalisée sur trois préparations : (1) essai Naturel : échantillon séché à l'air libre, (2) essai Glycolé : échantillon saturé à l'éthylène-glycol pendant 12 heures sous vide afin de provoquer le gonflement de certains minéraux argileux, (3) essai Chauffé : échantillon chauffé à 490°C pendant 2 heures afin de provoquer la destruction de la kaolinite et la déshydratation des minéraux smectitiques (Holtzappfel, 1985).

4. Analyse semi-quantitative

L'identification des minéraux argileux est réalisée en confrontant la position des raies principales et des harmoniques sur les trois essais réalisés (Brindley & Brown, 1980). L'analyse semi-quantitative (Biscaye, 1965 ; Holtzappfel, 1985) est basée sur l'intégration du signal des pics principaux ($I/I_0 = 100$) caractéristiques de chacun des minéraux argileux en présence à l'aide du logiciel MacDiff (Petschick, 2000). Les minéraux smectitiques sont caractérisés par un pic à 14Å sur l'essai naturel, qui gonfle à 17Å lors de l'essai glycolé et se rétracte à 10Å pour l'essai chauffé. L'illite est caractérisée par un pic basal à 10Å pour les trois essais (naturel, glycolé et chauffé). La chlorite est déterminée par la présence de 4 pics situés à 14Å, 7.1Å, 4.75Å et 3.54Å sur les trois essais. La kaolinite est caractérisée par deux pics à 7.2Å et 3.58Å sur les essais naturel et glycolé, qui disparaissent au chauffage. La sépiolite est mise en évidence par un pic à 12.3Å sur les essais naturel et glycolé.

La reproductibilité de l'analyse, basée sur 3 mesures par diffraction des rayons X à partir de 5 aliquotes d'une même préparation, est de 5% (Bout-Roumazeilles, 1995).

Composition minéralogique de l'assemblage argileux (fraction <math><2\mu\text{m}</math>) - précision 5%

Nom	Minéraux gonflants (smectite + I-S)	illite	Interstratifiés non- gonflants / vermiculite	Chlorite	kaolinite	Minéraux accessoires
P1	-	-	-	-	-	Matière organique
P1 (reserve)	-	-	-	-		Matière organique
P10a	20 (0+20)	13	24C-V	10	33	
P10b (10bbis?)	50 (25+25)	25	-	5	20	
P11b	0	12	15 I-C et I-V	15	58	
P12abis	12 (2+10)	23	4 I-C / C-V	15	46	
P12bbis	0	19	11 I-C / C-V	10	60	
P13a	35 (5+30)	13	10 V	8	34	
P13b	22 (0+22)	11	13 V	8	46	
P14abis	10 (0+10)	14	7I-C + 16V	10	43	
P14b	34 (0+34)	23	-	8	35	
P15abis	29 (5+24)	32	15V	4	20	
P15b	50 (5+45)	26	-	5	19	
P16b	47 (0+47)	21	-	11	21	
P16quat	51 (15+36)	17	-	11	21	
P17bbis	47 (7+40)	16	20 _v	5	12	
P17quat	45 (5+40)	26	-	12	17	
P18a	32 (16+16)	41	12 _{C-V}	5	10	
P18bbis	65 (60+5)	20	10 _{C-V}	5	0	
P19a	27 (4+23)	42	19 _{C-V}	10	2	
P19bbis	21 (12+9)	68	8 _{C-V}	2	1	
P20abis	81 (77+4 _{C-S})	16	-	2	1	

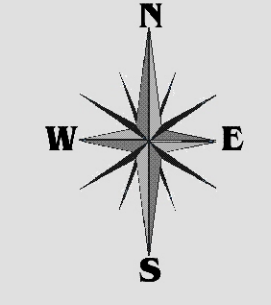
Composition minéralogique de l'assemblage argileux (fraction <math><2\mu\text{m}</math>) - précision 5%

Nom	Minéraux gonflants (smectite + I-S)	illite	Interstratifiés non- gonflants / vermiculite	Chlorite	kaolinite	Minéraux accessoires
P20bbis	76 (14+62 _{C-S})	19	-	4	1	
P21abis	0	35	20 _{LC}	10	35	
P21bbis	0	54	10 _{LC}	3	33	
P22a	10 (1+9)	6	63 _{C-V}	14	7	
P22bbis	5 (5+0)	5	25 _{C-V}	55	10	
P3	14 (0+14)	27	35 _{C-V}	10	14	
P5abis	5 (0+5)	60	15 _{C-V}	11	9	
P5b	0	15	50 _{C-V}	20	15	
P6abis	21 (0+21)	21	25 _{C-V}	12	21	
P6b	45 (30+15)	15	-	15	25	
P7a	37 (20+17)	10	15 _{C-V}	10	28	
P7b	46 (31+15)	19	15 _{LV}	6	14	
P8abis	25 (0+25)	40	-	5	30	
P8b	44 (33+11)	17	-	4	35	
P9a	34 (34+0)	33	-	8	25	
P9b	55 (42+13)	20	-	10	15	
Peb	17 (0+17)	33	20 _{C-V}	15	15	
Pmo	13 (0+13)	46	10 _{C-V}	21	10	
Pmo2	14 (2+12)	53	10 _{C-V}	11	12	



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009
45060 - Orléans Cedex 2 - France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Lorraine
1 avenue du Parc Brabois
54500 – Vandoeuvre-lès-Nancy - France
Tél. : 03 83 44 81 49



0 5 km 10 km

MEUSE

MEURTHE-ET-MOSELLE

BAS-RHIN

NEUCHÂTEAU

SAINT-DIE-DES-VOSGES

EPINAL

HAUT-RHIN

HAUTE-MARNE

HAUTE-SAONE

- Formations argileuses et marneuses**
- Tz - Dépôts tourbeux
 - Fz - Alluvions fluviales récentes à actuelles
 - E - Dépôts de versants : éboulis, colluvions
 - Fxy - Alluvions anciennes
 - G - Formations fluvioglaciales
 - LP-F - Limons de plateaux et ferritrés
 - J4-5 - Argiles de la Woëvre
 - J3-4 - Dalle nacrée et calcaires oolithiques
 - J3b-c - Marnes à rhynchonelles
 - J2c - Marnes de Longwy, Marnes à Liostrea acuminata
 - I4 - Schistes carton, Marnes à septaria et Grès supraliasiques
 - I3c - Grès médioliasiques
 - I2-3a - Marnes à Zelleria et Marnes à Amatheus
 - I2b1 - Argiles à Promicroceras
 - I1-2a - Calcaires et marnes à gryphées
 - I7b - Argilites rouges de Levallois
 - I7a - Grès infraliasiques
 - I6d - Marnes irisées et Grès à roseaux
 - I5a - Dolomies et argiles de la Lettenkohle
 - M - Couches grises et Couches rouges
 - s - Schistes et grauwackes

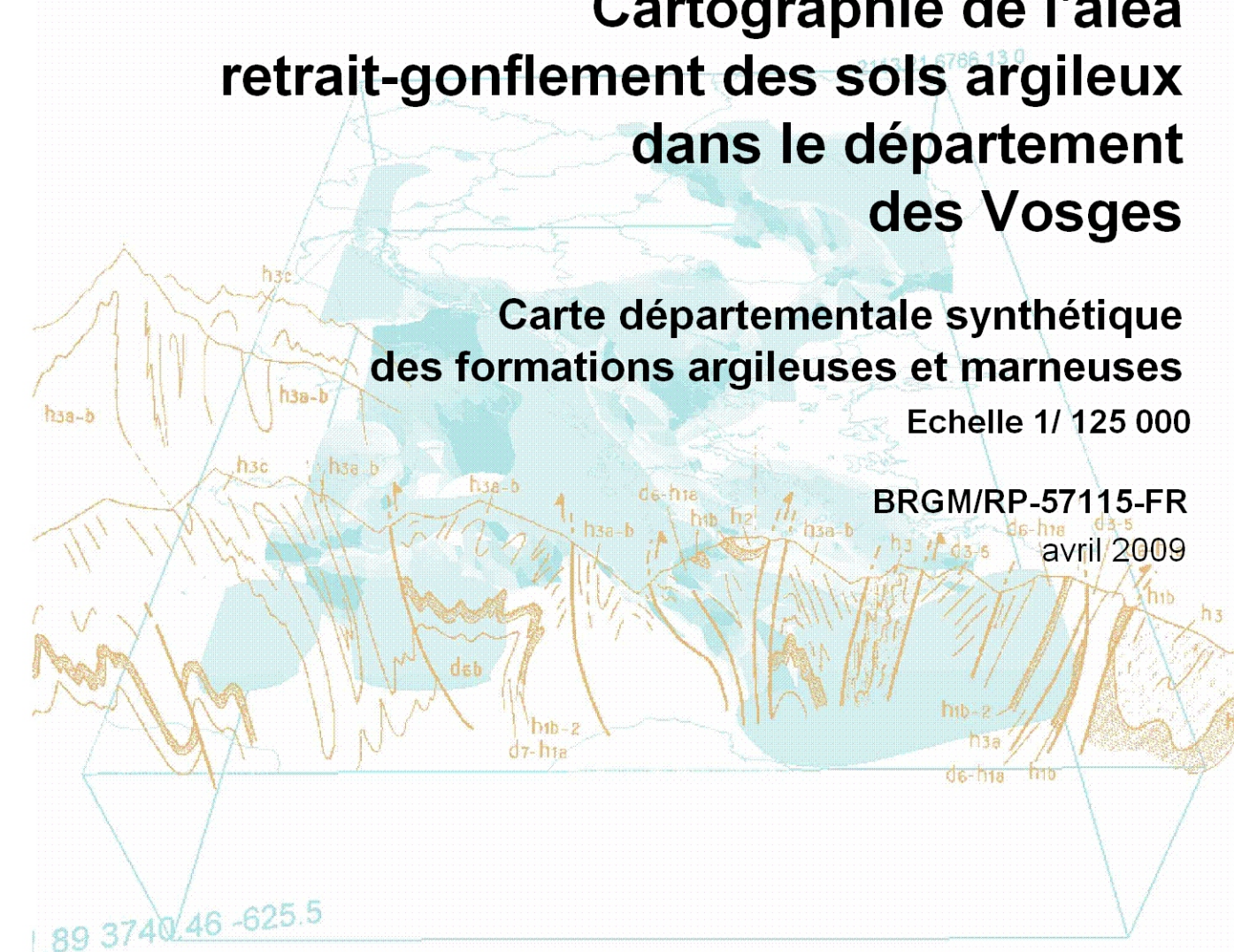
Carte 1

Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département des Vosges

Carte départementale synthétique des formations argileuses et marneuses

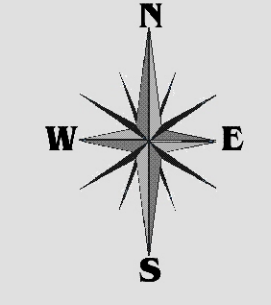
Echelle 1/125 000

BRGM/RP-57115-FR
avril 2009



89 3740.46 -625.5





0 5 km 10 km

MEUSE

MEURTHE-ET-MOSELLE

BAS-RHIN

NEUFCHATEAU

SAINT-DIE-DES-VOSGES

EPINAL

HAUTE-MARNE

HAUT-RHIN

HAUTE-SAONE

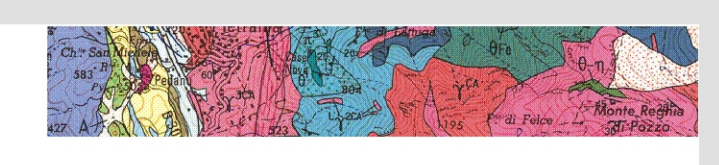
LÉGENDE

Zone de susceptibilité au retrait-gonflement :

- Susceptibilité moyenne
- Susceptibilité faible

Zone a priori non argileuse, non sujette au phénomène de retrait-gonflement sauf en cas de lentille ou de placage argileux local non repéré sur les cartes géologiques actuelles

Limite de commune



Carte 2

Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département des Vosges

Carte départementale de la susceptibilité au retrait-gonflement des sols argileux

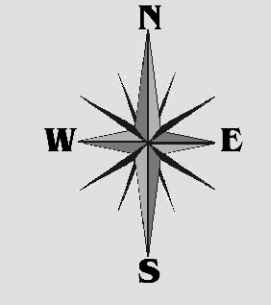
Echelle 1/125 000

BRGM/RP-57115-FR
avril 2009



89 3740.46 -625.5





0 5 km 10 km

MEUSE

MEURTHE-ET-MOSELLE

BAS-RHIN

LÉGENDE

Zone d'aléa retrait-gonflement :

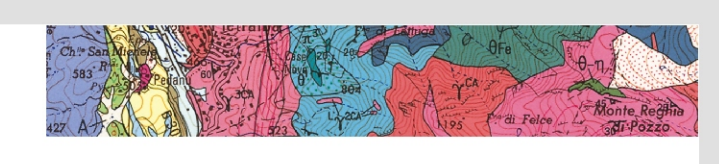
- Aléa moyen
- Aléa faible

Zone a priori non argileuse, non sujette au phénomène de retrait-gonflement sauf en cas de lentille ou de placage argileux local non repéré sur les cartes géologiques actuelles

Sinistre attribué au retrait-gonflement des argiles

Zone urbanisée

Limite de commune

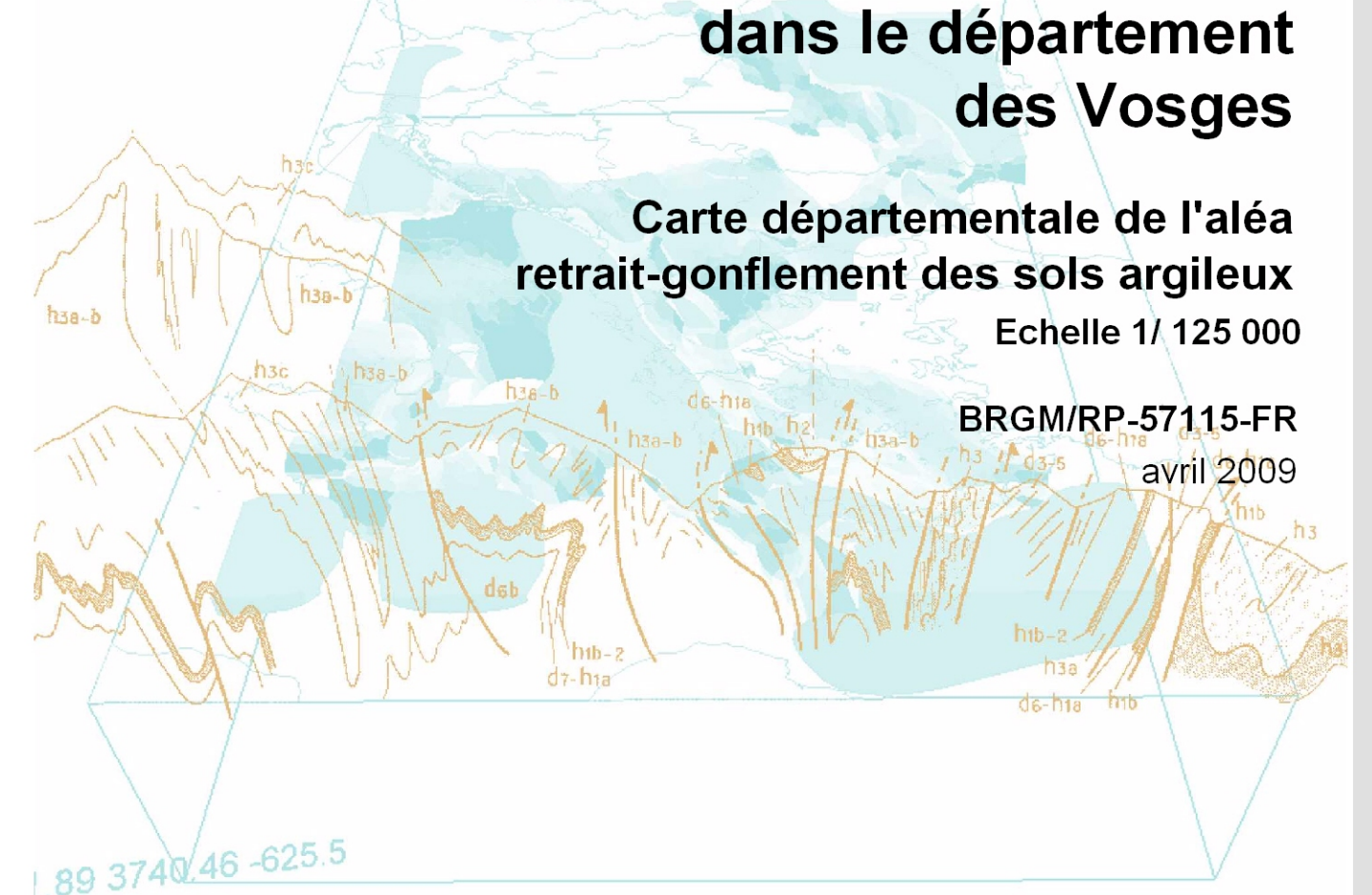


Carte 3

Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département des Vosges

Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux
Echelle 1/125 000

BRGM/RP-57115-FR
avril 2009



48° 37'40.46" -62° 5'

HAUTE-MARNE

HAUTE-SAONE

HAUT-RHIN

NEUFCHÂTEAU

EPINAL

SAINT-DIE-DES-VOSGES

