

Document public



Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Bas-Rhin

Rapport final

BRGM/RP 57373-FR
juin 2009



Mots clés :

argiles, marnes, argiles gonflantes, smectites, retrait-gonflement, susceptibilité, aléa, risque naturel, sinistre, sécheresse, catastrophe naturelle, géotechnique, cartographie, Alsace, Bas-Rhin

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

Krencker M., Cruz-Mermy D. (2009) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Bas-Rhin. Rapport BRGM/RP-57373-FR, 115 p., 58 ill., 4 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 Bas-Rhin fait partie des départements français relativement peu touchés jusqu'à présent par le phénomène, puisque seulement 252 sinistres imputés à la sécheresse y ont été recensés et localisés dans le cadre de la présente étude. À la date du 15 mai 2009, 24 communes sur les 527 que compte le département ont été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle pour ce phénomène, depuis 1989, ce qui correspond à un taux de sinistralité modeste de 4,4 %.

Dans le seul cadre du régime des catastrophes naturelles, les indemnisations versées dans le département pour des sinistres de ce type ont été évaluées par la Caisse centrale de réassurance en septembre 2008 à 1,45 millions d'euros en coûts actualisés, ce qui place le Bas-Rhin en 64^{ème} position des départements français.

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 de réaliser une cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux sur l'ensemble du département, dans le but de définir les zones les plus exposées au phénomène. 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 de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux qui devrait couvrir, d'ici fin 2010, l'ensemble du territoire métropolitain.

L'étude a été conduite par le Service Géologique Régional Alsace, en collaboration avec le Service Risques naturels et sécurité du stockage du CO₂ du BRGM. Le financement en a été assuré à hauteur de 25 % par la dotation de service public du BRGM, le complément ayant été financé par le Fonds national de prévention des risques naturels majeurs, dans le cadre d'une convention de cofinancement signée le 29 novembre 2007 avec la Préfecture du Bas-Rhin.

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 carte géologique harmonisée du département, réalisée dans une première phase de l'étude (Skrzypek *et al.*, 2007) et des cartes géologiques éditées par le BRGM à l'échelle du 1/50 000. Les 24 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 établie sur la

base de trois critères principaux : la caractérisation lithologique de la formation, la composition minéralogique de sa phase argileuse et son comportement géotechnique, ce qui a conduit à l'établissement d'une carte départementale de susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement.

La carte d'aléa a alors été établie à partir de la carte synthétique des formations argileuses et marneuses, après hiérarchisation de celles-ci en tenant compte non seulement de la susceptibilité des formations identifiées, mais aussi de la probabilité d'occurrence du phénomène. Cette dernière a été évaluée à partir du recensement des sinistres en calculant, pour chaque formation sélectionnée, une densité de sinistres, rapportée à la surface d'affleurement réellement bâtie, afin de permettre des comparaisons fiables entre les formations.

Sur cette carte, les zones d'affleurement des formations à dominante argileuse ou marneuse ont été caractérisées par trois niveaux d'aléa (fort, moyen, faible).

- 0,74 % de la superficie départementale a été ainsi classée en aléa fort ;
- 18,26 % a été considérée en aléa moyen ;
- 58,13 % a été caractérisée par un niveau d'aléa faible ;
- 22,86 % de la surface correspond à des zones *a priori* non concernées par le phénomène.

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 des sinistres.

Cette carte d'aléa retrait-gonflement des terrains argileux du département du Bas-Rhin, 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'une étude géotechnique à la parcelle comme préalable à toute construction nouvelle dans les secteurs concernés par les formations géologiques à aléa fort, moyen ou faible, notamment en raison de la forte hétérogénéité des formations du département. À défaut, il conviendra de mettre en œuvre des règles constructives type par zones d'aléa, visant à réduire le risque de survenance de sinistres.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Méthodologie	13
2.1. FACTEURS INTERVENANT DANS LE RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES	13
2.1.1. Facteurs de prédisposition	14
2.1.2. Facteurs de déclenchement	17
2.2. MÉTHODOLOGIE.....	18
2.2.1. Cartographie des formations argileuses ou marneuses	19
2.2.2. Caractérisation minéralogique et géotechnique des formations.....	19
2.2.3. Examen des autres facteurs de prédisposition et de déclenchement	19
2.2.4. Carte de susceptibilité	20
2.2.5. Recensement et localisation géographique des sinistres.....	20
2.2.6. Détermination des densités de sinistres	21
2.2.7. Carte d'aléa	22
3. Présentation du département du Bas-Rhin	23
3.1. GEOGRAPHIE GENERALE	23
3.2. LES GRANDS ENSEMBLES GEOGRAPHIQUES.....	23
3.2.1. Le Massif vosgien.....	24
3.2.2. Les Collines sous-vosgiennes	24
3.2.3. La Plaine d'Alsace	24
3.2.4. L'Alsace Bossue	25
3.3. CONTEXTE CLIMATIQUE	25
3.4. LES COURS D'EAU	26
4. Identification et cartographie des formations géologiques à dominante argilo-marneuse	29
4.1. DOCUMENTS ET METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE	29
4.1.1. Documents utilisés	29
4.1.2. Méthodologie d'établissement de la carte des formations argileuses et marneuses au sens large du terme	31

4.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL	31
4.3. LITHOSTRATIGRAPHIE DES FORMATIONS ARGILEUSES AU SENS LARGE	32
4.3.1. Les formations superficielles du Quaternaire	32
4.3.2. Les formations plio-quaternaires	36
4.3.3. Les formations du Tertiaire	36
4.3.4. Les formations jurassiques	39
4.3.5. Les formations du Trias.....	43
4.3.6. Formations de l'ère primaire	46
4.4. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE REGIONAL	46
4.4.1. Les grands aquifères.....	47
4.4.2. Les petits aquifères sédimentaires locaux	47
5. Caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique des formations retenues	49
5.1. CRITÈRES DE HIÉRARCHISATION	49
5.1.1. Critères retenus.....	49
5.1.2. Méthode de classification.....	49
5.2. CRITÈRE LITHOLOGIQUE	50
5.2.1. Définition du critère lithologique et barème	50
5.2.2. Caractérisation lithologique des formations argileuses ou marneuses du département du Bas-Rhin	51
5.3. CARACTERISATION MINERALOGIQUE DES FORMATIONS ARGILEUSES ET MARNEUSES	52
5.3.1. Définition du critère minéralogique et barème	52
5.3.2. Source de données	52
5.3.3. Caractérisation minéralogique des formations argileuses ou marneuses du département du Bas-Rhin	53
5.4. CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES REGROUPEMENTS ARGILEUX ET MARNEUX.....	56
5.4.1. Définition du critère géotechnique et barème	56
5.4.2. Indice de plasticité.....	57
5.4.3. Essais au bleu de méthylène	57
5.4.4. Retrait linéaire (RI)	58
5.4.5. Cas particulier des loëss.....	59
5.4.6. Obtention de la note finale	59
5.4.7. Source des données	59
5.4.8. Caractérisation géotechnique	61

6. Élaboration de la carte de susceptibilité	63
6.1. DETERMINATION D'UN DEGRE DE SUSCEPTIBILITE	63
6.2. SYNTHÈSE	64
6.3. COMPARAISON AVEC LES DEPARTEMENTS LIMITROPHES	65
7. Analyse de la sinistralité.....	67
7.1. RECONNAISSANCE DE L'ÉTAT DE CATASTROPHE NATURELLE ET PROCEDURE EXCEPTIONNELLE D'INDEMNISATION.....	67
7.1.1. La procédure de reconnaissance de catastrophe naturelle.....	67
7.1.2. Procédure exceptionnelle d'indemnisation	68
7.2. IDENTIFICATION DES COMMUNES SINISTREES	69
7.2.1. Localisation des communes sinistrées	69
7.2.2. Analyse des périodes de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.....	69
7.3. COLLECTE DES DONNÉES DE SINISTRES.....	71
7.4. REPARTITION DES SINISTRES PAR FORMATION GEOLOGIQUE	73
7.5. FRÉQUENCE D'OCCURRENCE RAPPORTÉE A LA SURFACE BATIE.....	74
7.5.1. Détermination la surface urbanisée ou bâtie par formation.....	75
7.5.2. Densité de sinistre pour 100 km ² de surface urbanisée/bâtie	75
7.5.3. Détermination du critère densité de sinistres	76
8. carte d'aléa	79
8.1. DETERMINATION DU NIVEAU D'ALEA.....	79
8.2. CARTE D'ALEA	80
8.3. COHERENCE AVEC LES DEPARTEMENTS LIMITROPHES	83
9. Conclusion	85
10. Bibliographie.....	87

Liste des illustrations

Illustration 1- Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche.....	13
Illustration 2 - Les unités géographiques du département du Bas-Rhin	23
Illustration 3 – Précipitations annuelles moyennes en Alsace sur la périodes 1951-1980 (source Paul P. in Encyclopédie de l'Alsace vol. 3)	26
Illustration 4 – Assemblage des différentes cartes géologiques du département du Bas-Rhin (fond topographique MNT IGN©).....	30
Illustration 5 - Carte des formations argileuses et marneuses du département du Bas-Rhin.....	33
Illustration 6 - Tertiaire affleurant dans le département du Bas-Rhin.....	37
Illustration 7 – Les formations jurassiques présentes dans le département du Bas-Rhin	40
Illustration 8 - Formations du Trias affleurant dans le département.....	44
Illustration 9 - Composition minéralogique du Trias et du Jurassique, K = kaolinite, I = illite, Chl = chlorite, autre non gonflant = principalement attapulgite, minéraux gonflants = smectites, interstratifiés gonflants et vermiculite	54
Illustration 10 - Carte de susceptibilité au retrait gonflement des formations argileuses et marneuses du département du Bas-Rhin.....	64
Illustration 11 - Carte de localisation des communes reconnues en état de catastrophe naturelle au titre de mouvements de terrain consécutifs à la sécheresse et la réhydratation des sols.....	70
Illustration 12 - Carte de localisation des sinistres recensés fin 2008.....	72
Illustration 13 -Distribution des densités de sinistres pour 100km ² de surface bâtie par formation.....	76
Illustration 14 – Carte départementale d'aléa retrait-gonflement	81
Illustration 15 – Cohérence de la carte d'aléa du Bas-Rhin avec celles établies pour les départements limitrophes	84

Liste des tableaux

Tableau 1 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la note lithologique de la formation.....	50
Tableau 2 - Notes lithologiques des formations retenues	51
Tableau 3 - Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la composition minéralogique de la phase argileuse de la formation géologique.....	52
Tableau 4 - Pourcentages de minéraux gonflants dans la phase argileuse et comparaison avec les département limitrophes.k = kaolinite i = illite,chl = chlorite, ang = autre non gonflant.....	55
Tableau 5 - Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de l'indice de plasticité.....	57
Tableau 6 - Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction des valeurs au bleu.....	58

Tableau 7 - Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du retrait linéaire	58
Tableau 8 – Sources des données et nombre de résultats exploités dans le cadre de la caractérisation géotechnique des formations	60
Tableau 9 - Caractérisation géotechnique des formations argileuses et marneuses du département	62
Tableau 10 - Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement	63
Tableau 11 - Susceptibilité des formations argileuses retenues	63
Tableau 12 - Superficie des formations par niveau de susceptibilité	65
Tableau 13 – Communes ayant été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle au titre de mouvements de terrain consécutifs à la sécheresse et la réhydratation des sols.	71
Tableau 14 - Densité de sinistres pour 100 km ² de formation affleurante	74
Tableau 15 - Barème de notation de la sinistralité	77
Tableau 16 - Densité de sinistres pour 100 km ² de surface affleurante urbanisée ou bâtie.....	78
Tableau 17 - Calcul du niveau d'aléa des formations argileuses et marneuses	80
Tableau 18 - Classement des formations en fonction du niveau d'aléa	82

Liste des annexes

Annexe 1: Rappels sur le mécanisme de retrait- gonflement des argiles	99
Annexe 2 : Sinistres recensés dans le cadre de l'étude	103
Annexe 3 : Listes des bureaux d'étude et assurances ayant contribué à l'étude.....	109
Annexe 4 : Résultats des analyses minéralogiques réalisées dans le cadre de cette étude	113

Liste des cartes hors-texte (1/125 000)

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 7 800 communes françaises, réparties dans 90 départements, ont été reconnues en état de catastrophe naturelle à ce titre (base GASPARE²). À fin 2006, le coût des sinistres dus à la sécheresse, indemnisés en France depuis 1989 au titre du

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 communale des populations sur les risques majeurs)

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.

Le département du Bas-Rhin a été jusqu'à présent relativement épargné par le phénomène puisqu'au 15 mai 2009, seules 24 des 527 communes que compte le département ont été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle pour des mouvements différentiels de terrain liés à la dessiccation des sols argileux, principalement au cours de l'été 2003. Dans le seul cadre du régime des catastrophes naturelles, les indemnisations versées dans le département pour des sinistres de ce type ont néanmoins été évaluées par la Caisse centrale de réassurance en septembre 2008 à 1,45 millions d'euros en coûts actualisés, ce qui place le Bas-Rhin en 64^{ème} position des départements français.

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 (MEEDAT) a souhaité réaliser une carte de l'aléa retrait-gonflement dans le but de définir 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 argiles 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'œuvre 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.

La présente étude a été réalisée par le Service Géologique Régional Alsace en collaboration avec le Service Risques naturels et sécurité du stockage du CO₂ du BRGM. Le financement est assuré à hauteur de 25 % par la dotation de service public du BRGM, le complément étant financé par le Fonds de prévention des risques naturels majeurs, dans le cadre d'une convention de cofinancement signée avec la Préfecture du Bas-Rhin en date du 29 novembre 2007, le suivi technique étant assuré par la Direction Départementale de l'Équipement (DDE).

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

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.

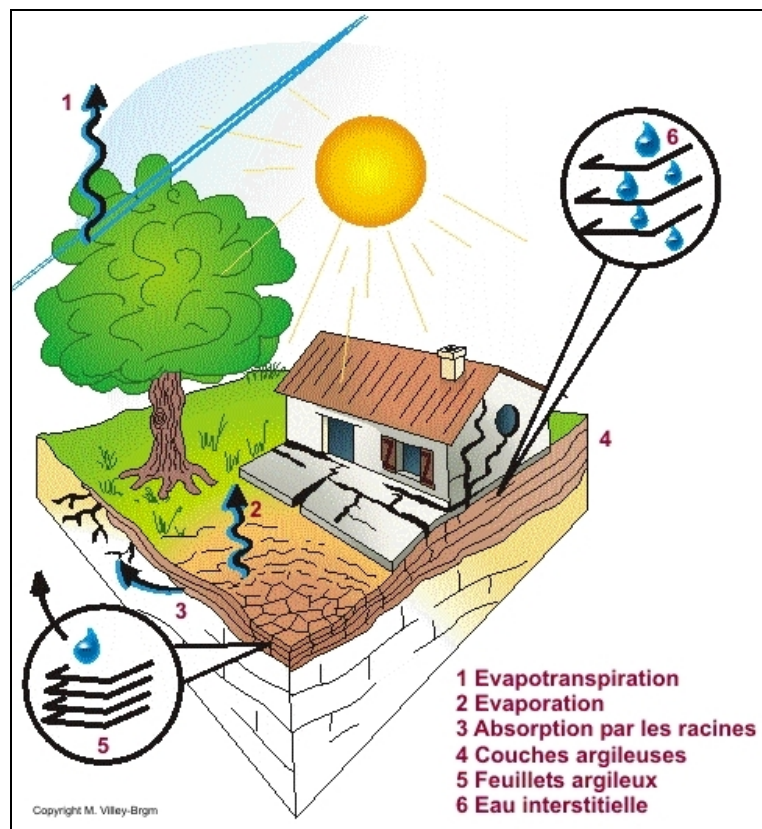


Illustration 1- Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche

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

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 cartographiées avec précision.

En effet, dans le département du Bas-Rhin certaines formations principalement calcaires sont susceptibles de générer des altérites argileuses après dissolution du calcaire. Ces altérites ne sont pas systématiquement cartographiées mais peuvent générer des sinistres.

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 font partie les montmorillonites), 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.

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.

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 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.

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 consommer 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.

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 de du Bas-Rhin confirme que des 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

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.

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 Alsace la cartographie des deux départements du Bas-Rhin et du Haut-Rhin a été élaborée de manière simultanée. Il est à noter que celle des départements limitrophes en Lorraine a déjà été réalisée au préalable pour ce qui

concerne la Meurthe-et-Moselle (Barchi *et al.*, 2006), la Moselle (Pannet *et al.*, 2008) et les Vosges (Géron *et al.*, 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 (Skrzypek *et al.*, 2007). 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 1/125 000.

2.2.2. Caractérisation minéralogique et géotechnique des formations

L'étude des formations argileuses retenues a conduit 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 également repris les caractéristiques recueillies dans la bibliographie des départements voisins.

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 peut faire l'objet d'une étude bibliographique, cependant l'influence des nappes sur le phénomène de retrait gonflement des argiles est difficile à mettre en évidence à l'échelle départementale. C'est pourquoi le critère n'a pas été retenu dans l'élaboration de la carte d'aléa.

Le contexte hydrogéologique peut faire l'objet d'une analyse spécifique sur la base d'éléments issus des notices de cartes géologiques 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 non plus été 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 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 527 communes du département du Bas-Rhin.

Ces données ont été complétées en premier lieu par l'ensemble des dossiers archivés en Préfecture (SIRACEDPC³). 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 252 sites de sinistres qui ont été recensés et ont pu être localisés avec précision (sur cartes topographiques de l'IGN à l'échelle 1/25 000). Ils sont répartis dans 88 communes dont 24 ont fait l'objet d'une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle au titre de « *mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et réhydratation des sols* ». Le nombre de sinistres est peu élevé en comparaison avec d'autres départements ayant déjà bénéficié d'une telle étude à ce jour. Aussi le nombre de sinistres n'est pas forcément statistiquement représentatif de l'occurrence spatiale du phénomène sur un regroupement de formations argileuses.

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 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 la surface réellement bâtie de chacune des formations géologiques.

Pour cela, il a été nécessaire d'évaluer, pour chacune des formations retenue comme potentiellement argileuse, la surface réellement bâtie à ce jour. Cette estimation a été effectuée à partir de la couche « bâti » de la BD Topo de l'IGN, mise à disposition par la DDE dans le cadre d'une convention pour les besoins de l'étude. Afin de permettre des comparaisons avec d'autres départements déjà traités antérieurement et pour lesquels cet outil n'était pas toujours disponible, une étude a été également menée en calculant la surface urbanisée de chaque formation argileuse à partir des données de la BD Carto de l'IGN. Il s'avère cependant que les deux modes de calculs conduisent à une hiérarchisation équivalente des formations argileuses au vu de leur sinistralité observée à ce jour.

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 bâtie.

³ Service Interministériel Régional des Affaires Civiles et Économiques de Défense et de Protection Civile

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 bâtie, en donnant toutefois un poids deux fois plus important à la susceptibilité, conformément à la méthodologie validée au niveau national. La carte ainsi obtenue est numérisée et son échelle de validité est le 1/50 000.

3. Présentation du département du Bas-Rhin

3.1. GEOGRAPHIE GENERALE

Le département du Bas-Rhin s'étend dans la partie nord de l'Alsace, sur une superficie évaluée à 4 755 km², mais qui sera estimée dans la suite de l'étude à 4 803 km² à partir des données de la BD Carto de l'IGN en coordonnées Lambert II étendues cartésiennes. Situé entre les Vosges à l'ouest et le Rhin à l'est, le département est limité au nord par la frontière franco-allemande.

Le Bas-Rhin compte 527 communes, dont 445 de moins de 2 000 habitants, 70 comptant 2 000 à 9 999 habitants, 11 présentant 10 000 à 49 900 habitants, et la ville de Strasbourg qui regroupe plus de 200 000 habitants (données INSEE, 1999). La densité de population est de 224 habitants par km² ce qui en fait une région fortement peuplée par rapport à la densité moyenne nationale (de l'ordre de 94 habitants par km²). Bien que l'agglomération strasbourgeoise concentre une partie de la population, le tissu urbain reste dense, orienté de manière préférentielle selon un axe nord-sud.

3.2. LES GRANDS ENSEMBLES GEOGRAPHIQUES

Le Bas-Rhin comprend 4 unités géographiques (Illustration 2), d'orientation nord-sud et se succédant d'ouest en est. La moitié orientale du département est occupée par la Plaine d'Alsace qui se prolonge vers l'ouest par un piémont étroit nommé « Collines sous vosgiennes » jusqu'au Massif vosgien. À l'extrême nord-ouest du département, l'Alsace Bossue s'insère sur le « Plateau lorrain ».

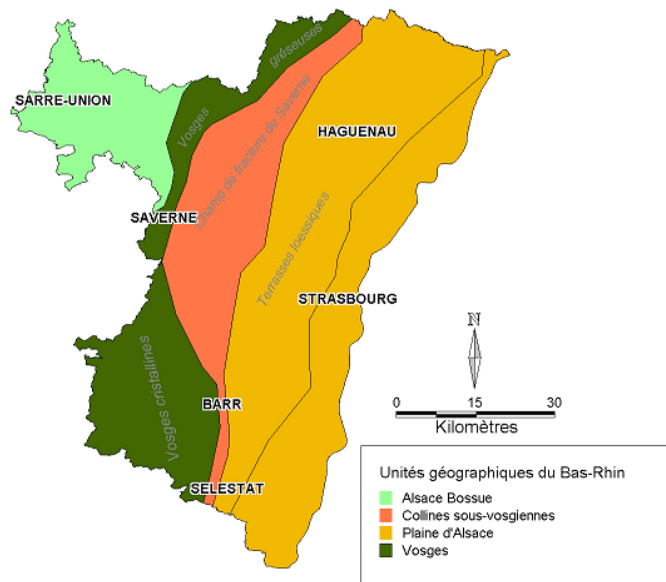


Illustration 2 - Les unités géographiques du département du Bas-Rhin

3.2.1. Le Massif vosgien

Le Massif vosgien est d'orientation nord sud et ses versants sont dissymétriques. Les versants orientaux sont abrupts et très rapidement en contact avec le piémont. Le versant ouest, s'insère plus progressivement dans le paysage des plateaux lorrains.

Les altitudes décroissent du sud vers le nord. Dans le sud du département les sommets avoisinent les 1 000 m tandis que dans le nord les altitudes atteignent 300 à 400 m. Formé de montagnes aux sommets distincts et marqués dans la partie sud, le relief Vosgien s'ennoe dans le nord. La ligne de crête marquée dans l'extrême sud du département est discontinue et de moins en moins visible au fur et à mesure que les altitudes décroissent.

On remarque une grande diversité de paysages au sein même du Massif vosgien, laquelle s'explique par la diversité des couvertures géologiques et la nature des terrains mais aussi par l'impact des glaciations sur les formes du relief. Ainsi, à l'extrême sud du département, dans les Vosges cristallines, les versants sont longs et pentus en finissant souvent en des vallées étroites. Les Vosges gréseuses, plus au Nord, constituent la plus grande partie du massif dans le département. Elles présentent un entablement de grès parfois surmonté de corniches conglomératiques et marquées par la présence de buttes massives aux flancs raides.

3.2.2. Les Collines sous-vosgiennes

Assurant la transition entre les Vosges et la plaine, les collines sous-vosgiennes composent le piémont des Vosges. Elles sont positionnées entre les failles vosgiennes et rhénanes sur une largeur de 4 à 8 km. Ce paysage discontinu apparaît et disparaît au fur et à mesure que les grandes failles s'écartent ou se rapprochent. Au nord, cette zone de fractures est nommée champ de fractures de Saverne et est recouverte de placages lœssiques parfois épais.

C'est un relief mou, de collines bien individualisées ou d'éperons, adossé au relief vosgien. Les Collines sous-vosgiennes ont conservé leur couverture sédimentaire. A la faveur d'un découpage tectonique complexe, on passe en quelques centaines de mètres du Trias au Jurassique suivant les affaissements ou exhaussements relatifs des micros blocs.

Cet ensemble concentre un grand nombre de villages dont l'activité principale est la viticulture, pour laquelle les terrains calcaires et les conditions climatiques sont favorables.

3.2.3. La Plaine d'Alsace

Siège de l'écoulement du Rhin, la plaine d'Alsace est un formidable bassin d'accumulation de matériaux provenant des Vosges, du Jura et des Alpes, dont l'origine est encore une fois liée aux phénomènes géologiques, qui la façonnent depuis les premières phases du rifting, initié dès le début de l'ère tertiaire et se poursuivant encore de nos jours.

Résultat d'un effondrement relatif de plus de 2 000 m, le Bassin rhénan a alternativement été le siège de fleuves, lacs, lagunes et mers, déposant à chaque fois plusieurs centaines de mètres de dépôts qui constituent la richesse de la région. L'histoire géologique du bassin a permis à l'homme de bénéficier de la richesse des sols pour l'agriculture, et de celle des sous-sols pour les exploitations minières de la potasse, du sel et du pétrole. La couverture alluvionnaire, au-delà des matériaux de construction, se révèle par ailleurs être l'un des plus grands réservoirs d'eau de l'Europe de l'Ouest.

En surface, contrairement à ce qu'il pourrait paraître, la plaine rhénane représente une pluralité de paysages issus des derniers phénomènes climatiques et géologiques. On distingue ainsi 3 types de paysages au sein du département du Bas-Rhin :

- les cônes d'épandages, glacis caillouteux en forme d'éventail au sortir des vallées vosgiennes. Ils donnent des sols siliceux pauvres, souvent couverts de bois. Ils sont caractérisés par une pente faible et continue depuis les vallées jusqu'à la plaine ;
- les collines et terrasses loessiques s'étendent du piémont vers la plaine du Rhin. Ce paysage vallonné est le siège d'une agriculture en *openfield* ;
- en aval des cônes et dans les terrasses récentes, s'étend une zone plane où la nappe phréatique flirte avec la surface topographique. Malgré une apparente uniformité cette unité distingue deux types de paysages. La plaine sèche, bien drainée, présente des zones de cultures, tandis que la plaine humide est marquée par les « rieds » qui sont des zones humides parfois marécageuses. Ce sont des accumulations de dépôts argilo-tourbeux enrichis par les limons carbonatés des crues de l'Ill et du Rhin. C'est dans ces rieds que divaguaient les méandres du Rhin et de l'Ill avant la canalisation respective des deux cours d'eau.

3.2.4. L'Alsace Bossue

L'Alsace Bossue constitue l'extrême nord-ouest du département. Située à l'ouest de la ligne de crête des Vosges, l'Alsace Bossue présente des paysages semblables à ceux des plateaux lorrains. C'est un relief collinéen mou, marqué par la présence de vallons secs.

3.3. CONTEXTE CLIMATIQUE

Le climat alsacien est tout aussi varié que sa géographie. En effet, l'association montagne-plaine en rapport avec sa position « continentale » implique de grandes disparités suivant les altitudes et les saisons, avec des printemps tardifs, des étés chauds et orageux, des automnes doux puis des hivers rigoureux.

Cette diversité de climat s'explique surtout par la topographie des lieux. Les masses d'air océaniques en provenance de l'ouest, subissent une ascendance forcée au niveau du relief vosgien. Cette ascendance a pour effet un refroidissement de la masse d'air, et donc une augmentation de l'hygrométrie, jusqu'à saturation. Ainsi, les crêtes vosgiennes, sont le siège de fortes précipitations parfois sous forme neigeuse. Le cumul des précipitations sur les crêtes varie de 1 300 à 2 500 mm en fonction de l'altitude.

Lorsque la masse passe sur le flanc oriental des Vosges elle est asséchée par les précipitations qui ont eu lieu sur le massif vosgien, mais aussi par le réchauffement induit par la perte en altitude. Ainsi, dans les collines sous-vosgiennes et la plaine, le climat est plus sec et chaud. Le cumul des précipitations dans les collines sous-vosgiennes peut être inférieur à 550 mm annuel.

Les valeurs moyennes observées dans le département peuvent varier fortement en fonction de la position au sein des différentes unités géomorphologiques comme le montre la carte des isohyètes (Illustration 3).

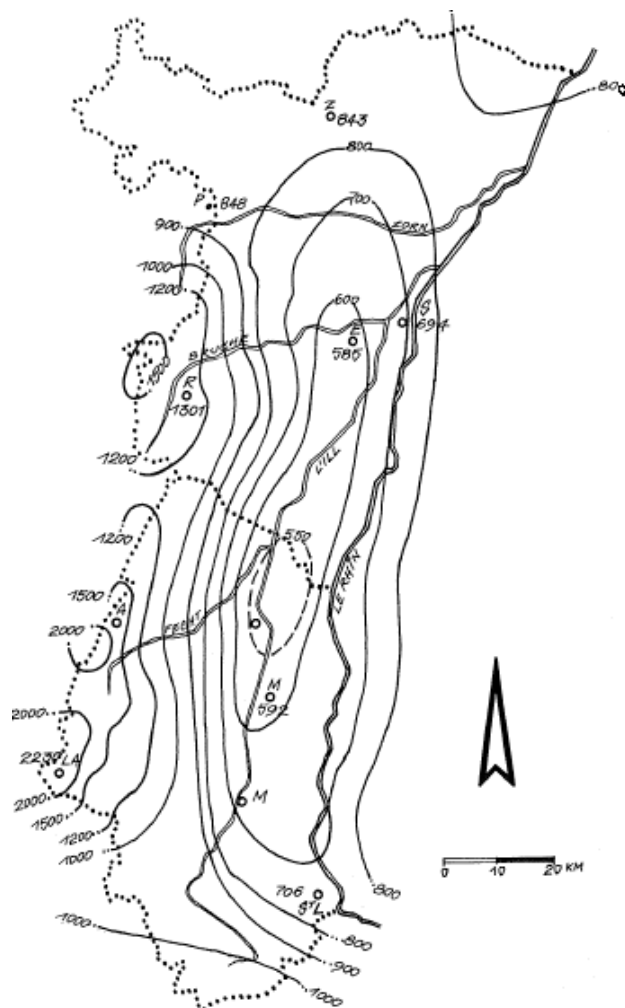


Illustration 3 – Précipitations annuelles moyennes en Alsace sur la période 1951-1980 (source Paul P. in Encyclopédie de l'Alsace vol. 3)

3.4. LES COURS D'EAU

Le Bas-Rhin est drainé par un grand nombre de cours d'eau de taille et d'importance différentes. Les Vosges abritent de nombreuses sources, alors que la plaine est parcourue par des collecteurs plus importants, affluents du l'Ille ou du Rhin.

Le Rhin est le fleuve principal de la région et s'écoule du sud vers le nord. Il prend sa source dans les Alpes suisses. Ses nombreux affluents dans le massif alpin, lui confèrent un régime nival et ses eaux sont principalement alimentées par la fonte de la neige. Dans le Bas-Rhin cette caractéristique est cependant fortement atténuée par les apports de cours d'eau de plaine et de moyenne montagne au régime plus océanique. La diversité de régime de ses affluents permet au Rhin de maintenir un débit élevé tout au long de l'année. Ce fleuve draine et alimente un aquifère très important.

L'Ill est le collecteur principal du département. Elle est issue d'une résurgence karstique dans le sud du département du Haut-Rhin. Son cours est parallèle à celui du Rhin qu'elle sépare du Massif vosgien jusqu'à sa confluence avec le fleuve au nord de Strasbourg. Les affluents en rive gauche sont alimentés par les Vosges. Il en résulte donc que le bassin versant drainé par l'Ill est dissymétrique et fortement développé vers l'ouest.

Les Vosges abritent de nombreuses sources alimentant des cours d'eau qui s'écoulent dans les vallées et les vallons. Ces cours d'eau se déversent eux-mêmes dans des collecteurs principaux souvent orientés ouest-est. Ils sont alimentés par la fonte des neiges dans le Massif vosgien mais les nombreux orages d'été peuvent fortement faire varier les débits. Cette apparente torrencialité n'est que très rarement marquée par des tarissements en période d'étiage.

Lorsque ces cours d'eau rejoignent la plaine, ils perdent en vitesse d'écoulement et forment de nombreux méandres sinueux. Cette zone à méandres présente des nappes peu profondes surtout dans la zone des rieds.

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

4.1. DOCUMENTS ET METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

L'objectif est de disposer d'une carte des formations géologiques à dominante argilo-marneuse du département du Bas-Rhin, afin d'identifier les 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 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.

4.1.1. Documents utilisés

La première étape a consisté à dresser, à partir d'une synthèse des différentes cartes géologiques éditées par le BRGM à l'échelle 1/50 000 et couvrant le département, un inventaire de toutes les formations à composante argileuse ou marneuse présentes, y compris les formations superficielles d'extension locale, et d'en cartographier les contours. 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 d'une part à partir des cartes géologiques du BRGM à l'échelle 1/50 000, qui constituent la partie prépondérante des données de base prises en compte pour la réalisation de cette synthèse cartographique et, d'autre part, en exploitant la carte départementale géologique harmonisée du département du Bas-Rhin qui a été établie dans le cadre d'une étape préalable à la réalisation de la présente étude (Skrzypek *et al.*, 2007).

Les cartes au 1/50 000, levées pour un grand nombre d'entre elles dans les années soixante-dix, avec une représentation répondant aux objectifs de l'époque, peuvent présenter localement des lacunes en ce qui concerne notamment les formations superficielles, et leur fiabilité ponctuelle est souvent 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, et notamment la carte des formations superficielles (Ménillet, 1995) 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.

Au total, il existe 16 cartes géologiques au 1/50 000 qui couvrent l'ensemble du département (Illustration 4). Les références détaillées de ces cartes sont présentées en fin de bibliographie.

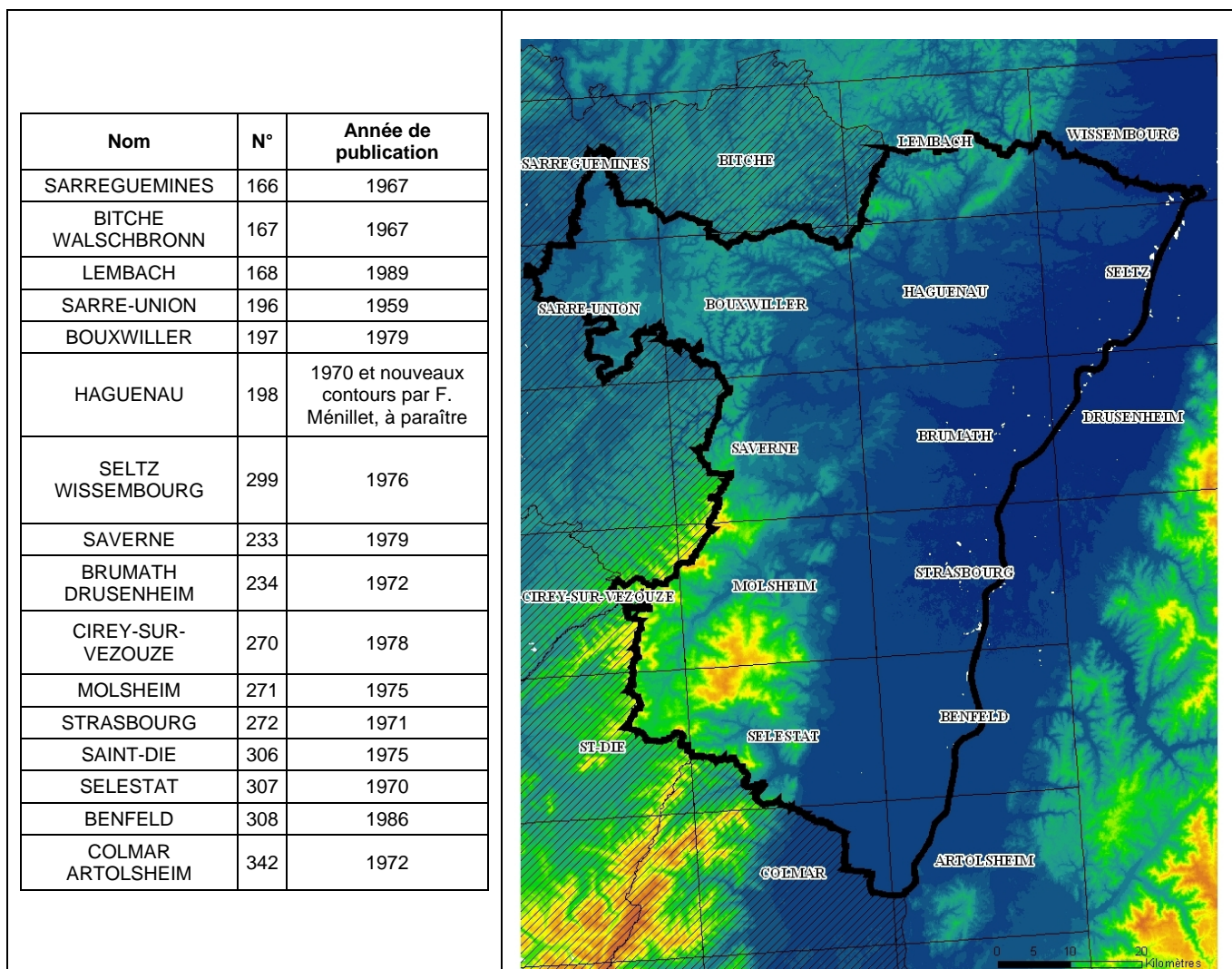


Illustration 4 – Assemblage des différentes cartes géologiques du département du Bas-Rhin (fond topographique MNT IGN©)

4.1.2. Méthodologie d'établissement de la carte des formations argileuses et marneuses au sens large du terme

La méthode consiste, à partir de la carte géologique harmonisée de départ, à sélectionner les couches géologiques argileuses ou contenant de l'argile. La précision originelle des contours géologique a été conservée. Les regroupements ont été effectués par période géologique et par lithologie. Les formations de même composition au sein d'une même période ont été regroupées.

Dans certains cas, les argiles ou marnes constituent la majeure partie de la formation retenue. C'est par exemple le cas des « Marnes à foraminifères » et « schistes carton » du Toarcien qui présentent un faciès marneux sur l'essentiel de leur épaisseur. Mais, dans la grande majorité des cas, les formations géologiques argileuses ou marneuses du département du Bas-Rhin sont très 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 forme de niveaux individualisés, séparés les uns des autres par des interlits 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, et 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. Aussi, il a été décidé en général de considérer l'ensemble de ces formations comme argileuses.

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 du Bas-Rhin 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-quatre formations à composante argileuse ou marneuse ont finalement été retenues sur cette carte.

4.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL

L'Alsace est l'une des régions de France métropolitaine les plus riches du point de vue géologique. En effet, tous les grands types de roches sont représentés (sédimentaires, plutoniques, volcaniques et métamorphiques) et nombre de processus géologiques peuvent y être reconnus (déformation et métamorphisme polyphasés, plutonisme et volcanisme orogéniques, extension intracontinentale). Situé dans le fossé du Rhin supérieur, l'Alsace doit cette diversité à la présence de nombreuses unités tectoniques : à l'ouest se trouve une importante partie du Massif vosgien hercynien,

tandis qu'à l'est s'étendent les collines sous-vosgiennes et le fossé rhénan avec tout le cortège sédimentaire qui leur est associé. Enfin, à l'extrémité sud, les contreforts du Jura font leur apparition.

On distingue, dans la région, les différents groupes lithologiques suivants :

- le socle d'âge primaire antéhercynien et hercynien, composé de terrains métamorphiques, granitiques et volcaniques ;
- des sédiments d'âge carbonifère ;
- une épaisse série sédimentaire mésozoïque (Trias à Jurassique supérieur) ;
- les formations sédimentaires mésozoïques (Trias vosgien, Jurassique de piémont vosgien) ;
- les formations sédimentaires tertiaires (Éocène à Pliocène) ;
- les formations glaciaires, périglaciaires et alluviales (Pliocène à Quaternaire).

4.3. LITHOSTRATIGRAPHIE DES FORMATIONS ARGILEUSES AU SENS LARGE

Ce chapitre dresse l'inventaire des formations géologiques argileuses du département du Bas-Rhin retenues dans le cadre de cette étude et dont l'extension géographique est représentée sur la carte départementale synthétique des formations argilo-marneuses (Illustration 5), également présentée en planche hors-texte à l'échelle 1/125 000. Une brève description de la lithologie de ces formations en est présentée, dans l'ordre stratigraphique, depuis les plus récentes jusqu'aux plus anciennes. Cette description est basée principalement sur les notices des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000.

4.3.1. Les formations superficielles du Quaternaire

Tourbes et dépôts tourbeux (1)

Ce groupe est composé des dépôts tourbeux du Quaternaire. Les tourbes ne sont pas réputées être des formations argileuses *stricto sensu*, mais elles sont très fortement compressibles sous l'effet de variations hydriques et peuvent être à l'origine de désordres du fait de tassements différentiels.

Dans les Vosges, elles sont présentes dans des dépressions. Dans la plaine, les dépôts tourbeux sont des dépôts vaseux riches en matières organiques et en argiles fortement altérées et sont localisés dans d'anciens méandres et bras alluviaux abandonnés. Leurs affleurements sont très ponctuels et ne couvrent d'environ 35 km² dans le département.

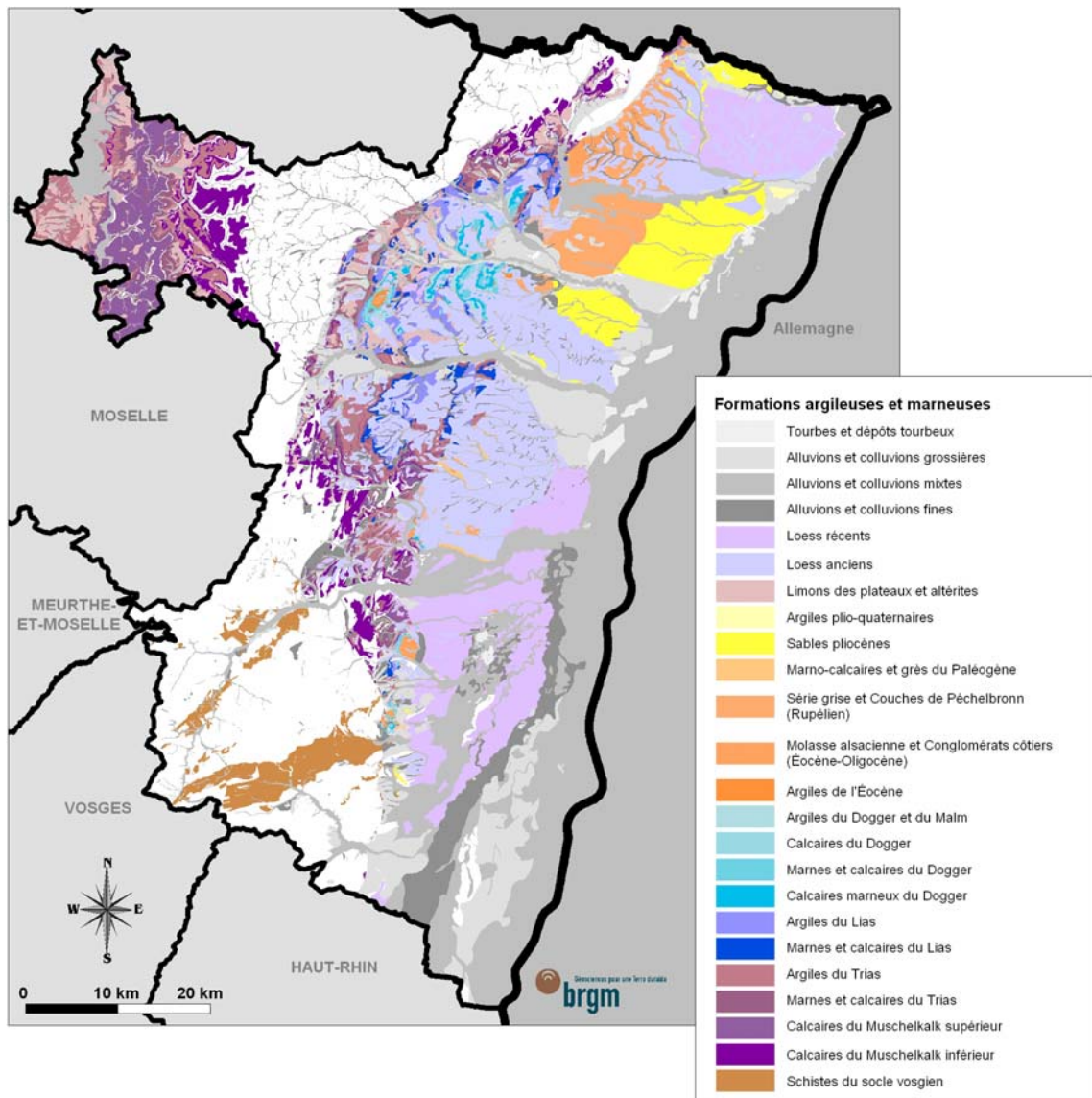


Illustration 5 - Carte des formations argileuses et marneuses du département du Bas-Rhin

Alluvions et colluvions grossières (2)

Ce groupe est composé de formations sédimentaires alluviales récentes à actuelles, d'origine vosgienne ou rhénane :

- les alluvions rissiennes et würmiennes des basses et moyennes terrasses rhénanes recouvertes de limons de débordement ;
- les alluvions vosgiennes ;
- les sables alluviaux ;
- les formations d'épandage ;
- les cônes de déjection ;

- les éboulis et cryoclastes ;
- les remblais.

Il s'agit de formations essentiellement détritiques grossières, composées principalement de galets et de graviers avec des lentilles et/ou de passées argileuses mises en évidence dans les notices. Cette hétérogénéité dans la granulométrie s'explique par la diversité des formations d'alimentation et le contexte de dépôt des formations du groupe. Les alluvions les plus grossières ont néanmoins été écartées de l'étude car jugées *a priori* non argileuses.

Ce regroupement affleure le long de la bordure orientale du département dans la plaine rhénane ainsi qu'aux débouchés des rivières d'origine vosgienne et s'étend sur près de 380 km² dans le département.

Alluvions et colluvions mixtes (3)

Les formations ici regroupées, de nature et d'épaisseur variables sont les suivantes :

- limons de débordement sur alluvions rhénanes ;
- alluvions vosgiennes de fond de vallons ;
- alluvions des rivières du Ried (hors limons de débordement de l'III) ;
- colluvions rissiennes et würmiennes.

Ce sont des alluvions et colluvions à granulométrie hétérogène. Les descriptions des notices géologiques mettent en évidence une composante argileuse non prédominante fréquente (sable-argileux, limons-argileux, argilo-limono-sableux).

Cet ensemble affleure dans tout le département où il couvre plus de 1 000 km², ce qui représente de l'ordre de 23 % de la superficie départementale. Dans la plaine, il caractérise les dépôts fins du Rhin et des rivières de plaine. Dans les collines sous-vosgiennes et le Massif vosgien, il caractérise les interfluves et les fonds de vallées.

Alluvions et colluvions fines (4)

Cet ensemble regroupe plusieurs formations de nature variable, à savoir :

- limons de débordement du Rhin et des rivières de plaines (III, Bruche...) ;
- colluvions de pentes indifférenciées (fines) ;
- dépôts soliflués.

Les limons de débordement se situent le long des cours d'eau. Tout comme les tourbes, ces formations sont fortement compressibles. Les colluvions et dépôts soliflués sont des ensembles hétérogènes, plus altérés et argileux, situés sur les bas de pentes et les coteaux.

Ces dépôts affleurent dans tout le département de manière très localisée excepté en ce qui concerne les limons de débordement de l'Ill qui forment une grande plage. L'ensemble couvre plus de 220 km² au total.

Lœss récents (5)

Les lœss sont des limons éoliens d'origine périglaciaire. Lorsqu'ils sont récents, peu altérés, la fraction argileuse est inférieure à 7 % (Schaaf-Raeth, 1979). Ce ne sont donc pas des dépôts argileux *stricto-sensu*. Cependant, de par leur structure particulière, les lœss sont sensibles aux fluctuations de teneur en eau, comme précisé plus loin, ce qui leur confère un comportement mécanique particulier aboutissant sous certaines conditions à des phénomènes de tassements.

Les lœss récents affleurent dans l'extrême nord-est du département, ainsi que dans la plaine entre Strasbourg et Sélestat, sur une superficie totale de plus de 330 km².

Lœss anciens (6)

Les lœss anciens sont également des dépôts éoliens d'origine périglaciaire, mais ils sont enrichis en argiles par illuviation et altération. La composante argileuse des lœss-lehm peut alors atteindre 25 % (Schaaf-Raeth, 1979). Cet enrichissement en argiles est d'autant plus marqué que le matériau est remanié et colluvionné. Par ailleurs, indépendamment de leur teneur en argile, les lœss ont un comportement particulier qui peut générer des désordres sur le bâti (voir chapitre : comportement géotechnique particulier des lœss).

Les lœss anciens sont situés sur les collines lœssiques qui font la jonction entre la Plaine d'Alsace et les Collines sous-vosgiennes, et couvrent plus de 560 km² dans le département.

Limons des plateaux et altérites (7)

Ce groupe est composé :

- des limons des plateaux ;
- des altérites des formations triasiques ;
- des altérites des formations mésozoïques ;
- des altérites des formations tertiaires.

Il est constitué de placages d'altérites argileuses recouvrant des formations calcaires et marneuses du Trias et du Lias. Dans le Bas-Rhin les limons des plateaux affleurent très peu et sont indissociables des altérites auxquelles ils sont mélangés. Dans les notices des cartes de Sarreguemines et de Sarre-Union, les limons des plateaux sont décrits comme étant essentiellement des placages d'altérites très argileuses des formations triasiques.

Les altérites affleurent dans le nord du département, dans les Collines sous-vosgiennes et en Alsace Bossue. Ces formations superficielles n'ont pas été

cartographiées de façon systématique et leur extension en Alsace bossue a probablement été sous-estimée. La superficie totale des affleurements identifiés représente environ 115 km².

4.3.2. Les formations plio-quadernaires

Argiles plio-quadernaires (8)

Cet ensemble comprend les formations du Pliocène argileux et les Argiles du Quaternaire ancien.

Les Argiles du Quaternaire sont composées d'argiles grises, blanches et vertes, tandis que le Pliocène argileux est constitué d'argiles, parfois sableuses.

Ces affleurements sont extrêmement réduits, inférieurs à 4 km², certains ayant été mis à jour dans des gravières sous une épaisse couche d'alluvions. On les trouve dans le sud du département sur la carte géologique de Sélestat, et dans le nord, sur la feuille de Seltz-Wissembourg.

Sables pliocènes (9)

Les sables pliocènes sont de granulométrie très hétérogène. Ils sont composés de sables, de graviers, et d'argiles. Certaines passées peuvent présenter une granulométrie franchement grossière, tandis que d'autres se caractérisent par des faciès strictement argileux. Leur répartition exacte n'est pas cartographiée de manière exhaustive.

Ces sables affleurent essentiellement dans le sud du département, au niveau de la plaine, à hauteur de Haguenau, sur un peu plus de 140 km².

4.3.3. Les formations du Tertiaire

Comme il l'a été précisé dans le chapitre concernant la géologie régionale, le Tertiaire présente une variation latérale de faciès. Aussi les formations du Tertiaire ont été regroupées non pas en fonction de la stratigraphie mais en fonction de leur lithologie (Illustration 6), ce qui a permis de distinguer 4 ensembles principaux :

- Marno-calcaires et grès du Paléogène (en vert) ;
- Série grise et Couches de Pêchelbronn (Rupélien) (en bleu) ;
- Molasse alsacienne et Conglomérats côtiers (Éocène- Oligocène) (en beige) ;
- Argiles de l'Éocène (en rouge).

	Bassin de Pechelbronn		zone de bordure	bassin potassique
Aquitarien	Couches à Hydrobies, Cérithes	Couches de Niederroedern		
Chattien	série bariolée			
Rupélien	Série Grise	Molasse alsacienne		
		Marnes à Cyrènes		
		Couches à Mélettes		
		Schistes à Amphisiles		
Lattorien	Couches de Pechelbronn	Calcaire de Losbann	Conglomérats côtiers	Marnes de la Zone Salifère
Lutétien	Eocène sidérolithique ou		Calcaires lacustres	argile basale

Illustration 6 - Tertiaire affleurant dans le département du Bas-Rhin

Marno-calcaires et grès du Paléogène (10)

Ce groupe est composé des formations suivantes (des plus anciennes aux plus récentes) :

- les Marnes et calcaires lacustres de la Zone salifère (Sanoisien basal) ;
- le Calcaire de Losbann ;
- la Molasse alsacienne et les Marnes à Cyrènes indifférenciées (Rupélien supérieur à Chattien, 100 m d'épaisseur) ;
- les Marnes de la Série Bariolée (Chattien) ;
- les Couches de Niederroedern (Chattien, Aquitarien, 600 m) ;
- les Couches à Cérithes, Corbicules et Hydrobies (Aquitarien, 380 m).

Les Marnes et calcaires lacustres de la Zone salifère sont un ensemble marno-calcaire dont les affleurements sont limités, et souvent mis à jour sous couverture d'alluvions. Elles représentent la continuité de la Zone Salifère latérale du Bassin Potassique bien représenté dans le Haut-Rhin. Dans le Bas-Rhin leurs affleurements se résument à de très petites surfaces discontinues dans le sud du département.

Le Calcaire de Lobsann est une variante latérale moins argileuse des Couches de Pechelbronn. Il s'agit d'un calcaire asphaltique marneux, à l'extension très limitée.

Les Couches de Niederroedern sont formées de marnes argileuses ou argilo-sableuses bariolées, dont l'épaisseur peut atteindre 300 m.

Les Couches à Cérithes et Couches à Corbicules sont des marnes grises ou jaunâtres alternant avec des grès calcaires et des couches sableuses. Elles n'affleurent que très peu.

Ces affleurements, d'extension réduite, inférieure à 6 km², sont mis en évidence à l'interface entre les reliefs pré-vosgiens et la Plaine d'Alsace, à hauteur des Collines sous-vosgiennes dans le sud du département, et à l'interface entre le Kochersberg et la plaine d'Alsace dans le nord.

Série grise et Couches de Pechelbronn (Rupélien) (11)

Cet ensemble comprend les formations suivantes (des plus anciennes aux plus récentes) :

- les Couches de Pechelbronn (Rupélien), 700 m de puissance ;
- les Marnes à Foraminifères (Rupélien supérieur), 10 m ;
- les Schistes à Amphisiles (Rupélien supérieur), 5 m ;
- les Couches à Mélettes (Rupélien supérieur), 350 m ;
- les Marnes à Cyrènes (Rupélien), 100 m.

Les Couches de Pechelbronn sont composées de marnes bitumineuses à passées anhydritiques et de quelques rares passées gréseuses.

La Série grise est composée d'une succession de marnes (Marnes à Foraminifères, Schistes à Amphisile, Couches à Mélettes, et Marnes à Cyrènes). C'est un ensemble argileux massif, épais de plus de 400 m.

Ce groupe affleure dans le nord du département, dans le bassin de Pechelbronn, et très ponctuellement dans le sud, le long du piémont, dans les Collines sous-vosgiennes. Sa superficie totale est légèrement inférieure à 100 km².

Molasse alsacienne et Conglomérats côtiers (Éocène-Oligocène) (12)

Ce groupe, dont l'extension est inférieure à 20 km² dans le département, est composé des formations suivantes (des plus anciennes aux plus récentes) :

- Calcaires lacustres de Bouxwiller ;
- Conglomérats Côtiers (Éocène supérieur à Oligocène, 60 m de puissance) ;
- Molasse Alsacienne (Chattien).

Les formations de ce groupe sont très différentes les unes des autres. Les Conglomérats côtiers présentent des faciès variés en fonction de la nature de leur ciment, de l'origine de leurs galets (Trias et Jurassique), et de la fréquence des intercalations marneuses. Les Calcaires lacustres de Bouxwiller sont des calcaires plus

massifs présentant des intercalations de fins lits marneux. La Molasse alsacienne présente des bancs de grès calcaires ou des sables argileux. Elle est toutefois moins argileuse que les autres faciès du Chattien.

Les Conglomérats Côtiers se situent à l'interface entre la plaine et les collines sous-vosgiennes, tandis que la Molasse alsacienne est mise à jour au niveau de quelques interfluves dans les collines loessiques du nord du département.

Les Calcaires lacustres de Bouxwiller affleurent dans le nord du département au niveau de la ville éponyme.

Argiles de l'Éocène (13)

Cet ensemble regroupe l'Éocène argileux (Éocène indifférencié, d'épaisseur variable) et le Complexe argileux de Bouxwiller (Lutétien).

L'Éocène argileux (Bassin de Pechelbronn) est constitué par les argiles basales du Lutétien et par des dépôts argilo-marneux sidérolithiques. Dans la zone de bordure il correspond au Complexe argileux de Bouxwiller.

Les argiles de l'Éocène affleurent sur à peine plus de 2 km², principalement concentrées dans le champ de fractures de Saverne.

4.3.4. Les formations jurassiques

Le Jurassique présente une alternance de différents types de lithologie. Les affleurements étant de faible extension dans le département, il a été décidé de regrouper les formations en fonction de la lithologie pour ne pas en multiplier le nombre de groupes. Le Jurassique comprend les formations du Dogger et celles du Lias (Illustration 7). Les colonnes « Groupe Bas-Rhin » présentent la prise en compte de la formation lorsqu'elle est différenciée (première colonne) ou lorsqu'elle est présentée de manière indivise sur la carte originelle (deuxième colonne). Cette deuxième colonne est attribuée en fonction de la description disponible dans les notices géologiques et non pas en fonction de la composition théorique de la formation indivise.

Les formations du Dogger ont ainsi été regroupées en 4 ensembles :

- Argiles du Dogger et du Malm (bleu sombre) ;
- Calcaires du Dogger (blanc) ;
- Marnes et calcaires du Dogger (bleu moyen) ;
- Calcaires marneux du Dogger (bleu clair).

Quant aux formations du Lias, elles ont été assemblées en deux groupes :

- Calcaires et marnes du Lias (jaune) ;
- Argiles du Lias (rose).

			Evénement	Milieu	Climat	lithologie	Groupe Bas-Rhin			
Malm	Oxfordien	inf.	Oxfordien indifférencié	Régime marin avec période démerision	Mer épicontinentale, plus ou moins profonde	Climat chaud plus ou moins humide	argiles et marnes	14	14	
		Callovien					Callovien indifférencié	argiles et marnes	16	16
Bathonien	sup. et moy.	Couches à Rhynchonella varians ; Marnes de Bouxwiller	marnes				16			
	inf.	Couches à Rhynchonella varians ; Marnes et calcaires d'Imbsheim	marnes				16			
Bajocien	inf.	Grande oolithe	calcaire				15			
	sup.	Marnes à Acuminata (faciès à huître de la grande Oolithe)	lumachelle marneuse							
	moy.	Marnes et calcaires à T. blagdeni et S. humphriesianum.	marnes				16	16		
Aalénien	inf.	Marnes et calcaires à S. sowerbyi, Marnes à H. discites	marno-calcaire				14	16		
	sup.	Couches à Murchisonae : Grès calcaires à L. murchisonae (Grès de Schalkendorf)	Grès calcaires intercallations marneuses				17			
Jurassique moy. (Dogger)	Toarcien	sup.	Marnes et argiles à Astarte voltzi (Marnes de Printzheim)				marnes	18	18	
		sup.	Marnes à Lytoceras jurensis (Marnes de Schillersdorf)				marnes	18		
		moy. et inf.	Schistes cartons				argiles	18		
	Pliensbachien	sup.	Calcaire gréseux à Pleuroceras spinatum (Calcaire de Kirrwiller)				calcaire gréseux et marnes	19		
		moy.	Marnes à nodules ou Marnes à ovoïdes à Amaltheus margaritatus				marnes	18		
		inf.	Calcaire à Davoei (calcaire ocreux)	calcaire marnes	19					
			Marnes à Zeill. Numismalis (Marnes de Zinswiller)	marnes	18					
	Sinémurien	sup.	Calcaire à Echioceras raricostatum (Calcaire ocreux)	marno-calcaire finement gréseux	19					
		sup.	Argiles d'Obermodern, marnes lotharingiennes	argiles	18					
	Hettangien	Hettangien	Calcaires et marnes à Gryphaea arcuata et niveaux de marnes papyracées bitumineuses à la base	marno-calcaire : alternance régulière de bancs calcaire (0,15 à 0,20m) et de marnes (0,10 à 2m)	19					
				Invasion marine	Mer épicontinentale milieu plus ou moins confiné et réducteur					

Illustration 7 – Les formations jurassiques présentes dans le département du Bas-Rhin

Argiles du Dogger et du Malm (14)

Cet ensemble, dont l'extension géographique est inférieure à 14 km² dans le département, est composé des formations suivantes (des plus anciennes aux plus récentes) :

- les Marnes de Gundershoffen : Marnes à nodules à *L. opalinum* (30 m d'épaisseur, Aalénien inférieur) ;
- les Marnes à *S. sowerbyi*, Marnes à *H. discites* (Bajocien inférieur, 20 m) ;

- l'Oxfordien indifférencié argileux affleurant à Barr.

Les marnes de l'Aalénien et du Bajocien inférieur représentent des ensembles marneux d'une épaisseur supérieure à 20 m. Elles affleurent surtout dans le nord du département à hauteur de Bouxwiller, dans les contreforts des Vosges Gréseuses. Plus au sud, elles apparaissent de façon discontinue le long du Piémont.

Dans le champ de fractures de Barr, sur la carte de Sélestat, affleure l'Oxfordien indifférencié qui présente un faciès principalement argileux et marneux. C'est le seul endroit où affleurent des formations du Malm dans le département.

Calcaires du Dogger (15)

La Grande Oolithe est un calcaire massif, épais d'environ 40 m. Cette formation présente à la base les Marnes à *Accuminata*, dépôt lumachellique caractérisé par des bancs fins délimités par des lits marneux (5 m). Plus vers le sommet, c'est un calcaire dur et compact, présentant de rares lits marneux. La Grande Oolithe peut présenter des poches de karstification. Les Marnes à *Accuminata* et la Grande Oolithe ne sont jamais distinguées cartographiquement, ce qui explique pourquoi la Grande Oolithe a été retenue dans le cadre de la présente étude.

Cet ensemble affleure de manière très discontinue le long du Piémont vosgien, et couvre moins de 6 km² dans le département.

Marnes et calcaires du Dogger (16)

Cet ensemble regroupe les formations suivantes (des plus anciennes aux plus récentes) :

- Calcaires et marnes à *Teloceras blagdeni* et Marnes et calcaire marneux à *Stephanoceras humphriesianum* (Bajocien, 27 m de puissance) ;
- Marnes à *Rynchonella varians*, Marnes de Bouxwiller ; Marnes et calcaires d'Imbsheim (Bathonien moyen, 31 m d'épaisseur) ;
- Callovien indifférencié : marnes, calcaires (24 m).

Les formations du Bajocien se présentent sous la forme de marnes grises alternant avec des calcaires argileux. Au Bathonien, les Marnes à *Rynchonella varians* présentent des calcaires alternant avec des marnes gris-bleuté à la base (marnes et calcaires d'Imbsheim) ; au sommet ce ne sont plus que des marnes gris-bleu (Marnes de Bouxwiller). Le Callovien indifférencié, d'une épaisseur de 24 m, est constitué d'argiles et de marnes à rares passées calcaires.

Elles affleurent de manière discontinue au niveau des collines sous-vosgiennes à hauteur de Barr et de Molsheim. Dans le nord, elles affleurent également de manière plus étendue entre Bouxwiller et Haguenau. Leur extension globale dans le département est d'environ 12 km² seulement.

Calcaires marneux du Dogger (17)

Les Couches à *Murchisonae* sont des marnes sableuses avec des intercalations de grès surmontées par deux à trois mètres de calcaire marneux. Leur description varie néanmoins selon les notices, allant de grès durs à des grès marneux.

Ces couches affleurent dans le nord du département de manière étendue dans le champ de fractures de Saverne et, de manière discontinue, le long des collines sous-vosgiennes. La superficie totale de ces affleurements est inférieure à 14 km².

Argiles du Lias (18)

Ce groupe comprend les formations suivantes (des plus anciennes aux plus récentes) :

- les Marnes grises Lotharingiennes (Lotharingien, 20 m d'épaisseur) ;
- les Marnes à *Zeilleria Numismalis* ;
- les Marnes à ovoïdes à *Amaltheus* (Domérien, 35 m) ;
- les Schistes cartons et les couches à *Lytoceras* (Toarcien inférieur, 9 m) ;
- les Marnes à *Astarte voltzi* (Toarcien supérieur, 10 m).

Dans le département du Bas-Rhin, le Lias présente des faciès essentiellement marneux, dont les épaisseurs varient de 3 à 35 m.

Ce groupe affleure au niveau du Piémont des Vosges, principalement dans la partie nord du département, sur une superficie totale d'environ 130 km². On observe néanmoins quelques affleurements étroits et discontinus dans le sud, au niveau du champ de fractures de Barr.

Calcaires et marnes du Lias (19)

Cet ensemble regroupe les formations suivantes (des plus anciennes aux plus récentes) :

- les Calcaires et marnes à gryphées de l'Hettangien-Sinémurien et les niveaux de marnes papyracées bitumineuses (10 m d'épaisseur) ;
- Les Calcaires ocreux (Calcaire à Davoei et Calcaire à *Echioceras raricostatum*) ;
- les Calcaires gréseux à *Pleuroceras spinatum* du Domérien (2 à 3 m).

En dépit de leur dénomination respective, ces trois formations correspondent à des niveaux marno-calcaires.

Le faciès des Calcaires et marnes à gryphées consiste en une alternance régulière de bancs calcaires d'épaisseur moyenne de 0,15 à 0,20 m et de niveaux de marnes feuilletées et d'argiles grises, dont l'épaisseur varie de 0,10 à 2 m.

Les Calcaires ocreux et les Calcaires gréseux retenus dans cette formation sont des marno-calcaires d'une puissance relativement faible. Ils peuvent présenter des

passées finement gréseuses (Calcaire à *Echioceras* et Calcaires gréseux à *Pleuroceras spinatum*) tandis que le Calcaire à Davoei est un calcaire marneux.

Cet ensemble de formations est généralement nettement moins argileux que les autres faciès du Lias dans le département.

Ce groupe affleure le long du Piémont des Vosges, dans le nord du département, et est souvent mis à jour par l'érosion dans les interfluves des collines lœssiques dans le champ de fractures de Saverne.

4.3.5. Les formations du Trias

Le Trias présente des faciès lithologiques variés. Les affleurements étant de faible extension, il a été décidé de regrouper les formations en fonction de la lithologie (Illustration 8) afin de ne pas multiplier le nombre de groupes.

Cet ensemble comprend :

- les Argiles du Trias (rose sombre) ;
- les Marnes et calcaires du Trias (beige) ;
- les Calcaires du Muschelkalk supérieur (jaune) ;
- les Calcaires du Muschelkalk inférieur (vert).

Les colonnes « Groupe Bas-Rhin » présentent la prise en compte de la formation lorsqu'elle est différenciée (première colonne) ou lorsqu'elle est présentée de manière indivise sur la carte originelle (deuxième colonne). Cette deuxième colonne est attribuée en fonction de la description disponible dans les notices géologiques et non pas en fonction de la composition théorique de la formation indivise.

Argiles du Trias (20)

Cet ensemble regroupe les formations suivantes (des plus anciennes aux plus récentes) :

- la Zone moyenne argilo-marneuse à myacites et térébratules (Muschelkalk inférieur, 22 m de puissance) ;
- les Couches grises et Couches rouges (Muschelkalk moyen indifférencié, 100 m) ;
- les Argiles bariolées de la Lettenkohle (15 m) ;
- les Marnes irisées inférieures (100 m) ;
- les Argiles de Chanville (Keuper moyen et supérieur, 17 m) ;
- les Argiles bariolées des marnes irisées supérieures (25 m) ;
- les Argiles de Levallois, (Rhétien, 8 m).

				Evéne-ment	Milieu	Climat	lithologie	Groupe Bas-Rhin					
Jurassique moy. (Dogger)	Malm	Oxfordien	inf	Oxfordien indifférencié	Régime marin avec période démerision	Mer épicontinentale, plus ou moins profonde	Climat chaud plus ou moins humide	argiles et marnes	14	14			
			Callovien	Callovien indifférencié				argiles et marnes	16	16			
	Bathonien	sup. et moy.	Couches à Rhynchonella varians ; Marnes de Bouxwiller	marnes				16					
			Couches à Rhynchonella varians ; Marnes et calcaires d'Imbsheim	marnes				16					
		inf.	Grande oolithe	calcaire				15	16				
	Bajocien	sup.	Marnes à Acuminata (faciès à huître de la grande Oolithe)	lumachelle marneuse									
		moy.	Marnes et calcaires à T. blagdeni et S. humphriesianum.	marnes				16					
		inf.	Marnes et calcaires à S. sowerbyi, Marnes à H. discites	marno-calcaire				14					
	Aalénien	sup.	Couches à Murchisonae : Grès calcaires à L. murchisonae (Grès de Schalkendorf)	Grès calcaires intercallations marneuses				17	16				
		inf.	Couches à Trigonina navis (Opalinum) : Marnes à nodules à L. opalinum (Marnes et argiles de Gundershoffen)	marnes				14					
	Jurassique inf. (Lias)	Toarcién	sup.	Marnes et argiles à Astarte voltzi (Marnes de Printzheim)				Invasion marine	Mer épicontinentale milieu plus ou moins confiné et réducteur	Climat chaud plus ou moins humide	marnes	18	18
				Marnes à Lytoceras jurense (Marnes de Schillersdorf)							marnes	18	
moy. et inf.			Schistes cartons	argiles	18								
Pliënsbachien		sup.	Calcaire gréseux à Pleuroceras spinatum (Calcaire de Kirwiller)	calcaire gréseux et marneux	19								
		moy.	Marnes à nodules ou Marnes à ovoïdes à Amaltheus margaritatus	marnes	18								
			inf.	Calcaire à Davoei (calcaire ocreux)	calcaire marneux	19							
		Marnes à Zeill. Numismalis (Marnes de Zinswiller)	marnes	18									
Sinémurien		sup.	Calcaire à Echioceras raricostatum (Calcaire ocreux)	marno-calcaire finement gréseux	19								
			Argiles d'Obermodern, marnes lotharingiennes	argiles	18								
Hettangien		Hettangien	Calcaires et marnes à Gryphaea arcuata et niveaux de marnes papyracées bitumineuses à la base	marno-calcaire : alternance régulière de bancs calcaire (0,15 à 0,20m) et de marnes (0,10 à 2m)	19								

Illustration 8 - Formations du Trias affleurant dans le département

Le Muschelkalk présente deux niveaux argileux d'importance variable. Le premier correspond à la zone moyenne argilo-marneuse du Muschelkalk inférieur et le second est composé par les Couches grises et les Couches rouges, constituées d'argiles franches. Les Couches grises présentent des passées anhydritiques.

Le Keuper est marqué par la présence de niveaux argileux de forte épaisseur, au sein des Marnes irisées et, plus secondairement, au sein de la Lettenkohle. Ce sont des argiles bariolées pouvant présenter des accumulations anhydritiques.

Ces formations, qui couvrent au total environ 130 km² dans le département, affleurent de part et d'autre des Vosges gréseuses et sont caractérisées par la présence d'argile continue dont l'épaisseur est importante.

Marnes et calcaires du Trias (21)

Ce groupe, qui affleure sur un peu moins de 80 km² dans le département, comprend les formations suivantes (des plus anciennes aux plus récentes) :

- Muschelkalk moyen indivis (Couches rouges, Couches grises, Couches blanches) ;
- Lettenkohle indivise (Dolomie inférieure, Argiles de la Lettenkohle, Dolomie limite) ;
- Marnes irisées moyennes (20 m d'épaisseur) ;
- Grès du Rhétien (25 m).

Les formations du Muschelkalk moyen et de la Lettenkohle ont été rattachées à ce groupe lorsqu'elles sont présentées de manière indivise. Mais la description précise des formations différenciées est présentée dans les Argiles du Trias (Couches rouges, Couches grises, Argiles de la Lettenkohle) ou les Calcaires du Muschelkalk supérieur (Couches blanches, Dolomie limite).

Les Marnes irisées moyennes (5 m d'épaisseur) sont composées d'argiles bariolées, parfois dolomitiques, de 3 m d'épaisseur, intercalées entre les Grès à roseaux (10 m) à la base et la Dolomie de Beaumont (ou Dolomie moellon) au sommet (5 m).

Les Grès rhétiens affleurent peu dans le département. Leur faciès présente une alternance de grès fin et lité avec des argiles noires, rouges ou violettes indurées.

Calcaires du Muschelkalk supérieur (22)

Cet ensemble regroupe les formations suivantes (des plus anciennes aux plus récentes) :

- Couches blanches (Muschelkalk moyen, 4 m d'épaisseur) ;
- Calcaires à cératite (Muschelkalk supérieur, 50 m) ;
- Calcaires à térébratules (Muschelkalk supérieur, 6 m) ;
- Dolomie inférieure (Lettenkohle inférieure).

Ce regroupement est constitué de roches carbonatées intercalées de bancs marneux dont l'importance peut varier. Ces calcaires et dolomies peuvent présenter une couverture d'altérites argileuses non cartographiées.

Cet ensemble, qui s'étend sur plus de 140 km², affleure de part et d'autre des Vosges. Il constitue une partie essentielle de l'Alsace Bossue. Dans le fossé rhénan, le

regroupement affleure le long des collines sous-vosgiennes. Les affleurements sont étroits à hauteur de Bouxwiller et s'étendent davantage vers le nord et le sud.

Calcaires du Muschelkalk inférieur (23)

Ce groupe comprend les formations suivantes (des plus anciennes aux plus récentes) :

- Grès Coquilliers (12 m) ;
- Dolomie à *Myopohoraria orbicularis* (Muschelkalk inférieur, 5 m) ;
- Couche à térébratules (Muschelkalk inférieur).

Cet ensemble affleure en Alsace Bossue, et dans les Collines sous-vosgiennes, sur une superficie totale de près de 120 km².

4.3.6. Formations de l'ère primaire

Schistes du socle vosgien (24)

Les formations rattachées à ce groupe sont les suivantes :

- Série métamorphique de Villé et du Climont, Schistes et phyllades, Schistes de Steige (Ordovicien-Silurien) ;
- Schistes phtanitiques noirs et gris à nodules du Val de Bruche et du Rabodeau ;
- Grauwackes, schistes phtanitiques et schistes versicolores ;
- Carbonifère : Conglomérats, arkoses et schistes noirs houillers.

Les schistes sont des roches métamorphiques et ne sont pas réputés être argileux. Cependant les processus d'altération génèrent des altérites argileuses colluvionnées sur les coteaux, souvent mal cartographiées sur les cartes géologiques à 1/50 000 actuellement disponibles.

Cet ensemble affleure dans le Massif vosgien, dans la partie sud-ouest du département, sur un peu moins de 100 km².

4.4. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE REGIONAL

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 par tassements différentiels.

Toutefois, les variations piézométriques des principales nappes du département 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 phénomènes de 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.

4.4.1. Les grands aquifères

La nappe des Grès vosgiens

Le caractère montagneux et la nature géologique des Vosges expliquent l'absence de grands aquifères au sein du massif. Ces grands aquifères se trouvent en bordure sur les piémonts et dans les plaines environnantes. Il s'agit à l'ouest des grès vosgiens et, à l'est, des alluvions de la plaine du Rhin. Alimentée principalement par les eaux de pluie, la nappe des Grès vosgiens fournit d'innombrables sources captées qui ressortent soit à la base de l'aquifère, soit dans le conglomérat principal, mieux cimenté donc moins perméable, soit le long des failles. Les rares exploitations par pompage n'ont donné que des résultats limités en termes de débit. Vers l'ouest, ces couches gréseuses s'enfoncent sous les formations du Trias moyen et la nappe passe rapidement à l'état de nappe captive en Lorraine. Cette nappe constitue un réservoir primordial pour l'alimentation des villes et villages des Vosges occidentales.

La nappe des alluvions du Rhin

A l'est du Massif des Vosges, s'étend l'une des plus grandes nappes d'Europe pouvant dépasser les 150 m d'épaisseur. Elle est alimentée par les précipitations vosgiennes et rhénanes, et par les eaux du Rhin d'origine alpine. Ce réservoir fournit les grandes agglomérations et les industries alsaciennes. Exploitée par puits et forages, cette nappe bénéficie de la forte perméabilité des alluvions permettant des débits de pompage impressionnants (1 000 m³/h, Société Rhône-Poulenc à Mulhouse). Malgré sa grande taille, cette nappe est vulnérable aux pollutions industrielles et agricoles.

4.4.2. Les petits aquifères sédimentaires locaux

Alluvions des vallées vosgiennes

Le remplissage alluvial et fluvio-glaciaire des vallées vosgiennes, les formations glacio-lacustres et certaines moraines (régions des lacs, haute vallée de la Meurthe et vallée de la petite Meurthe), permettent de compléter l'alimentation de nombreux villages situés dans le cœur du massif. Généralement leur épaisseur est de 5 à 10 m mais dans certaines zones de surcreusement glaciaire, l'épaisseur des alluvions peut atteindre plusieurs dizaines de mètres (70 m à Fellingring). Ces formations sédimentaires, caractérisées par une granulométrie très hétérogène, fournissent des débits de pompage variables suivant la teneur en argile. Plus en aval, les cônes de

déjection des rivières vosgiennes sont intensément exploités par pompages comme ceux de la Doller, de la Thur et de l'Ognon qui alimentent des villes comme Thann et Aspach-le-Haut.

Formations de versant

Les coteaux et les bas de pente sont généralement recouverts par des formations superficielles peu épaisses comme des cônes d'éboulis, des plaquages de moraines glaciaires ou d'anciens dépôts alluviaux. Ces aquifères sont généralement très limités dans l'espace. Les écoulements hypodermiques dans ces aquifères sont extrêmement vulnérables aux pollutions du fait de leur faible épaisseur et de leur granulométrie trop hétérogène qui ne garantit pas un filtrage parfait. Ces eaux souterraines peu profondes reviennent à la surface par l'intermédiaire des sources ou alimentent les nappes souterraines en fond de vallée.

Les champs de fractures des collines sous vosgiennes

Sur le flanc alsacien, la tectonique a découpé et comprimé de petits réservoirs alimentés par les eaux météoriques qui s'infiltrent et circulent le long des failles. Les nappes sont sous pression (nappes captives) et les sources qui s'en échappent peuvent jaillir en surface (puits artésien). Dans cette zone, les principaux aquifères sont les grès du Trias et les calcaires du Muschelkalk ou de la Grande oolithe. En remontant à la surface, ces eaux peuvent se mélanger avec des eaux de nappes superficielles.

Les aquifères en milieu cristallin

Les Vosges hercyniennes sont constituées dans leur majeure partie de roches cristallophylliennes et magmatiques. A l'échelle du détail la perméabilité des roches magmatiques est quasiment nulle. Pourtant ce massif ancien est le siège de nombreuses sources, qui constituent la première alimentation en eau potable des villages vosgiens. Dans le massif cristallin, les eaux météoriques s'infiltrent et se concentrent dans les zones fracturées et dans les arènes, constituées de sables grossiers et de blocs.

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 subaffleurantes, 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, 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, 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 quantifiables, estimées pour chacune des 24 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. Pour les trois caractéristiques naturelles des terrains, cela permet d'attribuer une note de 1 à 4 à chacune des formations identifiées. Les caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique des 24 formations sont successivement présentées dans les paragraphes suivants.

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 compte, puisque les formations argileuses peu épaisses présentent un potentiel de retrait ou de gonflement moindre que les formations puissantes.

Pour chaque notice de carte géologique, les formations argileuses et marneuses ont été notées de 1 à 4 conformément au barème généralement utilisé dans ce type de démarche (Tableau 1) et sur la base, d'une part, des descriptions disponibles dans les notices ou en bibliographie et, d'autre part, de l'expertise du géologue régional. Au final, chaque formation argileuse et marneuse, dispose d'autant de note lithologique de cartes où elle est présente. La note lithologique finale attribuée à chaque formation est déterminée de manière à être la plus représentative possible des différents faciès identifiés au sein de cette formation dans le département.

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

Tableau 1 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la note lithologique de la formation.

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. Sa valeur relative en vue d'une hiérarchisation des formations argileuses est cependant difficilement contestable.

5.2.2. Caractérisation lithologique des formations argileuses ou marneuses du département du Bas-Rhin

Les notes ainsi attribuées à chacune des formations à composante argileuse identifiées dans le département sont présentées dans le Tableau 2. Sur la base des critères énoncés dans la partie précédente on constate que sept formations obtiennent la note 4, trois formations reçoivent la note 3, neuf formations obtiennent la note 2 et enfin cinq formations sont caractérisées par la note 1.

N°	Nom de la formation	Superficie (km ²)	note lithologique
1	Tourbes et dépôts tourbeux	35,70	4
2	Alluvions et colluvions grossières	377,52	1
3	Alluvions et colluvions mixtes	1 113,06	2
4	Alluvions et colluvions fines	216,44	3
5	Loess récents	327,11	1
6	Loess anciens	561,98	2
7	Limons des plateaux et altérites	115,37	2
8	Argiles plio-quadernaires	3,93	4
9	Sables pliocènes	141,29	1
10	Marno-calcaires et grès du Paléogène	5,95	3
11	Série grise et Couches de Pêchebron (Rupélien)	98,95	4
12	Molasse alsacienne et Conglomérats côtiers (Éocène-Oligocène)	19,51	2
13	Argiles de l'Éocène	2,14	4
14	Argiles du Dogger et du Malm	13,66	4
15	Calcaires du Dogger	5,63	1
16	Marnes et calcaires du Dogger	12,05	3
17	Calcaires marneux du Dogger	13,80	2
18	Argiles du Lias	47,70	4
19	Marnes et calcaires du Lias	25,32	2
20	Argiles du Trias	130,45	4
21	Marnes et calcaires du Trias	77,11	2
22	Calcaires du Muschelkalk supérieur	142,46	2
23	Calcaires du Muschelkalk inférieur	119,36	2
24	Schistes du socle vosgien	97,75	1

Tableau 2 - Notes lithologiques des formations retenues

Les formations présentant une note lithologique élevée (3 et 4) sont plus nombreuses que les formations présentant une note lithologique basse (1 et 2). Cependant cela ne

reflète que la grande diversité lithologique et stratigraphique que présente le département. En effet, du point de vue des superficies concernées les notes 1 et 2 sont plus représentatives du département et couvrent près de la moitié de la superficie départementale.

5.3. CARACTERISATION MINERALOGIQUE DES FORMATIONS ARGILEUSES ET MARNEUSES

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 vermiculite est, elle aussi, considérée comme argile potentiellement gonflante. 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, interstratifiés et vermiculite) présents dans la phase argileuse. Les notes de 1 à 4 sont attribuées en fonction des coupures suivantes (Tableau 3).

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

Tableau 3 - Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la composition minéralogique de la phase argileuse de la formation géologique.

5.3.2. Source de données

Dans la mesure où les formations sédimentaires sont semblables dans tout le fossé rhénan, l'ensemble des mesures du Bas-Rhin et du Haut-Rhin a été utilisé pour évaluer la caractérisation minéralogique des regroupements effectués.

Les données sont principalement issues de la bibliographie. Certaines proviennent de documents récents pour lesquels la méthode d'analyse est connue (Guignat et Vouaux, 2004 ; Riehl, 2007 ; Ménillet, publication en cours ; Pannet *et al.*, 2008 ; Barchi *et al.*, 2006 ; Géron *et al.*, 2009).

Pour compléter les données existantes, 28 prélèvements spécifiques ont été effectués pour analyses dans le cadre de la présente étude (Annexe 4). La plus grande partie

des données exploitées pour caractériser les formations provient cependant de thèses, des notices de cartes géologiques et d'articles plus anciens pour lesquels la méthodologie n'est pas toujours explicitée. Ceci a pour conséquence de possibles incertitudes quant à la fiabilité des mesures. En effet, les méthodes utilisées par le passé pour étudier la minéralogie de la fraction argileuse ne permettaient pas de distinguer aussi nettement les minéraux mal cristallisés (smectites, interstratifiés) au bénéfice de minéraux mieux cristallisés comme l'illite ou la kaolinite.

Rappelons que les données minéralogiques restent des éléments ponctuels. Les formations géologiques ne sont pas des entités homogènes dans l'espace du fait de leur origine sédimentaire dont le contexte de dépôt peut varier et influencer sur la minéralogie des argiles. De plus ces formations ont pu subir des processus ultérieurs à leur dépôt et induits par un contexte local (hydromorphie, remaniement, cristallisation). Ces éléments ne peuvent pas être mis en évidence par la carte géologique.

Au total, on compte 390 mesures de la composition minéralogique de la fraction argileuse pour l'ensemble de la région Alsace.

5.3.3. Caractérisation minéralogique des formations argileuses ou marneuses du département du Bas-Rhin

La bibliographie et les nouvelles analyses effectuées permettent de caractériser l'ensemble des regroupements du département à l'exception des Tourbes et dépôts tourbeux. Vingt-trois des 24 formations ou regroupements de formations retenues du fait de leur composante argileuse ou marneuse bénéficient ainsi d'une caractérisation semi-quantitative des argiles. Un seul regroupement est caractérisé uniquement de manière qualitative.

Du point de vue de la composition minéralogique des différentes formations, on observe que les formations quaternaires sont les seules pour lesquelles les argiles gonflantes sont prédominantes. Le Trias présente majoritairement des illites. Le Jurassique quant à lui présente de fortes proportions de kaolinites (Illustration 9). Enfin, le Tertiaire présente à nouveau une forte proportion d'illite.

A partir de ces données et du barème de notation présenté dans la partie précédente l'ensemble des formations argileuses et marneuses du département peut être caractérisée selon la composition dominante de sa phase argileuse. La note attribuée (Tableau 4) est fonction du pourcentage moyen des minéraux gonflant pour chaque formation, en prenant en compte la dispersion des valeurs quand le nombre de mesures est suffisant et a été ajustée pour certaines formations d'extension régionale en tenant compte également des données recueillies dans les départements voisins.

Cette caractérisation permet de mettre en évidence qu'aucune des formations retenue n'a reçu la note maximale de 4. Cinq regroupements ont été caractérisés par une note de 3. Treize présentent une note de 2 et enfin cinq groupes de formation ont reçu la note minimale de 1.

Le nombre de données par regroupement varie de 1 à 112. Trois regroupements sont caractérisés par plus de 45 mesures, douze présentent entre 5 et 38 mesures, et six regroupements présentent moins de 5 mesures. Par ailleurs, pour un grand nombre formations les valeurs minimales et maximales sont très contrastées, ce qui s'explique par les éléments énoncés dans le chapitre précédent.

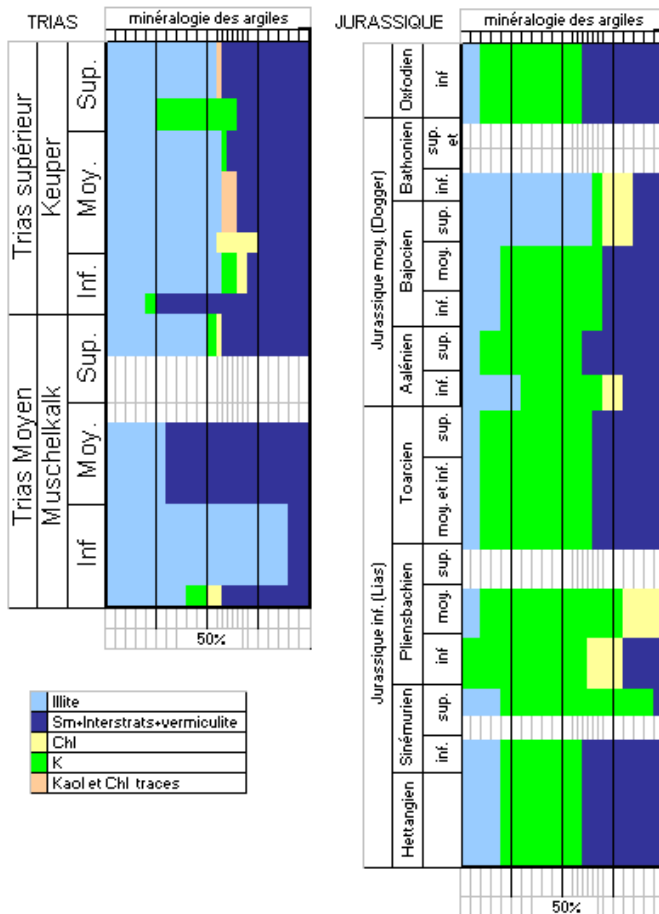


Illustration 9 - Composition minéralogique du Trias et du Jurassique, K = kaolinite, I = illite, Chl = chlorite, autre non gonflant = principalement attapulgite, minéraux gonflants = smectites, interstratifiés gonflants et vermiculite

Les formations de note 3 correspondent aux dépôts sédimentaires récents (alluvions et lœss anciens) caractérisés par du remaniement. Le regroupement des alluvions fines, composées par les limons de débordement et les colluvions fines fortement remaniées présente des valeurs élevées (avec une seule valeur inférieure à 50 %, un grand nombre de valeurs proches de 80 %). Par ailleurs la note 3 caractérise aussi les Argiles plio-quaternaires du nord du département.

Les formations de note 2 correspondent à des regroupements datés du Trias au Quaternaire. Il est à noter que les Calcaires du Muschelkalk supérieur présentent un pourcentage moyen de minéraux gonflants qui dépasse légèrement la valeur seuil de

50 %, mais la prise en compte de données minéralogiques issues des départements voisins, et notamment de Moselle où cette formation s'étend largement, conduit à lui attribuer malgré tout une note minéralogique de 2. Les autres regroupements présentent en général des valeurs proches de 30 à 40 %. Quant aux Calcaires du Muschelkalk inférieur, bien qu'ils présentent des valeurs peu élevées, leur note a été ajustée en fonction des valeurs obtenues en Moselle et en Meurthe-et-Moselle.

Les regroupements ayant reçu une note de 1 présentent des valeurs moyennes proches de 15 à 20 % d'argiles gonflantes. Les Argiles de l'Éocène présentent une absence apparente de minéraux gonflants, mais il n'existe qu'une seule mesure sur cette formation et elle est ancienne (Sittler, 1965).

Une comparaison avec les départements proches (Moselle, Meurthe-et-Moselle, Vosges) montre que les notes minéralogiques attribuées aux formations d'extension régionale sont relativement similaires.

N°	Nom de la formation	Nbre de valeurs	% minéraux argileux non gonflants				% minéraux argileux gonflants			% minéraux gonflants : données recueillies dans les départements			note minéralogique pour le Bas-Rhin	
			k	i	chl	ang	min.	max.	moy	52 et 70	88	54 et 57		
1	Tourbes et dépôts tourbeux	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Alluvions et colluvions grossières	9	13	33	3	0	29	100	51	-	-	-	-	3
3	Alluvions et colluvions mixtes	17	4	29	2	0	30	92	65	-	-	-	-	3
4	Alluvions et colluvions fines	21	5	18	0	0	24	98	78	-	-	-	-	3
5	Loess récents	7	13	38	5	0	24	64	44	-	-	-	-	2
6	Loess anciens	63	23	20	2	0	0	90	55	-	-	-	-	3
7	Limons des plateaux et altérites	1	16	47	0	0	37	37	37	-	16,5	53,7	-	2
8	Argiles plio-quaternaires	6	12	28	7	0	20	100	53	-	-	-	-	3
9	Sables pliocènes	9	36	30	0	0	0	60	34	30	-	-	-	2
10	Marno-calcaires et grès du Paléogène	53	8	53	10	0	0	90	29	-	-	-	-	2
11	Série grise et Couches de Pêchebronn (Rupélien)	112	13	47	12	0	0	90	27	-	-	-	-	2
12	Molasse alsacienne et Conglomérats côtiers (Oligocène-Éocène)	37	21	59	2	0	0	80	18	-	-	-	-	1
13	Argiles de l'Éocène	2	30	70	0	0	0	0	0	-	-	-	-	1
14	Argiles du Dogger et du Malm	4	45	28	3	0	8	41	25	49	-	-	-	2
15	Calcaires du Dogger	2	5	65	10	0	0	40	20	18	-	-	-	1
16	Marnes et calcaires du Dogger	2	55	19	0	0	25	29	27	33	-	-	-	2
17	Calcaires marneux du Dogger	2	48	13	0	0	27	53	40		-	-	-	2
18	Argiles du Lias	4	66	13	6	0	0	27	15	20	10	27	1	
										28	28	17		
										22	17	17		
19	Marnes et calcaires du Lias	6	42	18	0	0	21	59	41	25	6	19	2	
										39,5	39,5	37,8		
										37,8	37,8	37,8		
20	Argiles du Trias	20	7	54	4	2	0	80	33	48	42,7	50,2	2	
										65	48,5	48,5		
										59	78,5	55		
21	Marnes et calcaires Trias	5	19	45	5	0	10	55	31	17	24	26	2	
										43,5	43,5	43,5		
										54	46	28		
22	Calcaires du Muschelkalk supérieur	4	3	41	3	0	25	74	53	-	-	25	2	
23	Calcaires du Muschelkalk inférieur	3	7	59	3	0	9	55	31	43	-	42,5	2	
24	Schistes du socle vosgien	1	-	-	-	-	illite majoritaire			-	7,5	-	1	

Tableau 4 - Pourcentages de minéraux gonflants dans la phase argileuse et comparaison avec les départements limitrophes. k = kaolinite, i = illite, chl = chlorite, ang = autre non gonflant

5.4. CARACTERISATION GEOTECHNIQUE DES REGROUPEMENTS ARGILEUX ET MARNEUX

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.

Les expertises de sinistres consultées indiquent que le type d'essais effectués 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 généralement 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 d'hydratation 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).

Seuls les résultats des essais correspondant aux caractéristiques intrinsèques du sol sont pris en compte dans le cadre de 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 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.

5.4.2. Indice de plasticité

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 (Tableau 5) :

Indice de plasticité	Susceptibilité	Note
IP < 15	faible	1
15 ≤ IP < 30	moyenne	2
30 ≤ IP < 40	forte	3
IP ≥ 40	très forte	4

Tableau 5 - Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de l'indice de plasticité

A l'origine de la mise en place de ce type de travaux les limites de la note 2 étaient fixées de 12 à 25. Mais l'expérience acquise au travers des études déjà réalisées montre cependant que ces coupures peuvent être ajustées avec les valeurs de bleu et que des adaptations sont nécessaires. En particulier, les seuils à 12 et 25 semblent plutôt devoir être décalés vers 15 et 30. C'est donc cette dernière limite qui a été prise en compte.

5.4.3. Essais au bleu de méthylène

Les essais au bleu de méthylène 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 en fonction de la valeur de bleu (Tableau 6) :

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

Tableau 6 - Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction des valeurs au bleu

Les valeurs au bleu disponibles pour certaines formations concernées dans la présente étude se sont révélées assez nombreuses (260 au total). Ce paramètre permet, avec le concours avantageux des limites d'Atterberg, une analyse statistique du comportement des formations visées.

5.4.4. 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 diminution de la teneur en eau, au-delà de la limite de retrait. Les coupures présentées ont été proposées (Mastchenko, 2001) pour caractériser le potentiel de retrait avec ce paramètre (Tableau 7).

Cependant, le nombre de valeurs de retrait linéaire recueillies en Alsace est trop faible pour que ce paramètre puisse être utilisé ici.

Retrait linéaire	Susceptibilité	Note
RI < 0,4	faible	1
0,4 ≤ RI < 0,65	moyenne	2
0,65 ≤ RI < 0,75	forte	3
RI ≥ 0,75	très forte	4

Tableau 7 - Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du retrait linéaire

5.4.5. Cas particulier des loëss

En plus des caractéristiques géotechniques mises en évidence lors du présent travail les loëss sont des matériaux qui possèdent un comportement géotechnique particulier.

C'est un matériau granulaire, cohérent, poreux et peu perméable dont le comportement est fortement lié aux conditions hydriques⁴. La structure granulaire et cohérente peut s'effondrer quand les conditions hydriques changent sous une charge statique (saturation) ou se liquéfier quand des sollicitations cycliques engendrent des pressions interstitielles trop importantes dans le loëss saturé.⁵

Les effondrements de sols loëssiques en surface se présentent généralement sous la forme de cuvettes de 3 à 5 m de diamètre avec un tassement de 0,5 à 1 m environ – ils sont généralement le résultat de l'infiltration d'eau, de l'endommagement du loëss dû à des sollicitations cycliques quand le loëss se présente dans des conditions non saturées, et de la liquéfaction de certaines couches de loëss quand elles sont saturées⁶.

5.4.6. Obtention de la note finale

La note finale est obtenue en fonction des différentes notes géotechniques attribuées à partir des valeurs au bleu et des indices de plasticité. Il est possible que les notes attribuées à partir des valeurs au bleu ou des indices de plasticité diffèrent l'une de l'autre. Dans ce cas, les valeurs au bleu sont systématiquement privilégiées car jugées plus représentatives de l'aptitude d'un sol au retrait-gonflement. Cependant, il est possible que la moyenne des valeurs au bleu soit proche des limites de classe. Une attention particulière est alors portée à la distribution statistique des données disponibles pour éviter tout biais lié à une valeur anormalement basse ou élevée.

Par ailleurs on restera attentif aux données de valeur au bleu communiquées par le LRPC, car certaines d'entre elles ont pu être effectuées sur des matériaux de remaniement de type remblais, ce qui pourrait influencer les résultats.

5.4.7. Source des données

Les données présentées dans le cadre de cette étude proviennent de rapports d'études géotechniques. Ceux-ci ont été réalisés soit à l'occasion d'expertises dans le cadre de reconnaissances des dommages aux bâtiments, soit dans le cadre d'études géotechniques avant construction. Ils ont été transmis au BRGM par des organismes

⁴ Comportement cyclique du loëss du Nord de la France,
http://c.f.m.s3.free.fr/exposes070406/CFMS070406_Cui.pdf

⁵ http://pastel.paristech.org/bib/archive/00002185/01/Chapitre_VI.pdf

⁶ <http://pastel.paristech.org/bib/archive/00002185/01/Introduction.pdf>

publics (mairie, préfectures, DDE, SNCF), par des bureaux d'études (Fondasol, Antea, CETE-LRPC, Géotec, Arcadis-ESG), par des entreprises de réparation (Uretek) et par des mutuelles d'assurances (MACIF, MAAF, Groupama). Les coordonnées complètes des bureaux d'études ayant fourni des données géotechniques sont présentées en annexe (Annexe 3) conformément au protocole signé entre le BRGM et l'Union Syndicale de Géotechnique (USG). Nous tenons ici à remercier l'ensemble des organismes et bureaux d'études qui ont accueilli le personnel du BRGM et accepté de mettre à disposition leurs dossiers d'archives dans le cadre de la présente étude.

Lors de l'envoi du questionnaire d'enquête pour le recensement des sinistres, adressé à l'ensemble des communes du département, il avait été demandé à ces dernières de transmettre également leur accord pour autoriser l'accès aux études éventuelles effectuées par le LRPC sur leur territoire. Sur les 527 communes que compte le département, 379 d'entre elles ont répondu à l'enquête, et 377 ont répondu favorablement à la demande. Ceci a permis d'accéder à 379 mesures issues de 270 dossiers (Tableau 8).

D'autres données géotechniques proviennent d'archives du BRGM, de la BSS (Banque des données du sous-sol, gérée par le BRGM dans le cadre de ses actions de service public et au titre du Code Minier) et 28 mesures de valeurs au bleu ont été effectuées spécifiquement dans le cadre de cette étude.

Source	Nombre de dossiers	Nombre d'Ip	Nombre de Vb
ANTEA	1	1	1
Arcadis	9	12	
Prélèvements BGRM	1		28
Archives BRGM	6	99	
BSS (BRGM)	100	137	
CCR	8	16	2
Commune de Soultz-sous-Forêt	1	4	
Commune d'Allenwiller	2	3	1
Commune de Ballersdorf	2	2	4
Commune de Guewenheim	1		1
Commune de Rittershoffen	1		2
Commune de Roppentzwiller	1		4
Commune de Sarre-Union	1	2	1
Commune de Zinswiller	1	1	
DDE 68	1		1
Fondasol	13	25	
Géotec	3	3	
LRPC	270	168	211
SNCF	2	35	9
Uretek	15	22	9

Tableau 8 – Sources des données et nombre de résultats exploités dans le cadre de la caractérisation géotechnique des formations

5.4.8. Caractérisation géotechnique

Les données brutes par formation argileuse sont synthétisées dans le Tableau 9 qui intègre également les données géotechniques recueillies lors de la réalisation de l'étude de l'aléa retrait-gonflement dans les départements limitrophes (Moselle, Meurthe-et-Moselle, Vosges), dans la mesure où ces dernières donnent également des indications sur la caractérisation des formations d'extension régionale.

Les notes géotechniques ainsi attribuées montrent qu'aucune formation ne présente la note maximale de 4, que deux formations sont qualifiées par la note 3, que treize d'entre elles sont caractérisées par une note de 2 et qu'enfin sept formations ont reçu la note de 1. Il est à noter par ailleurs que seuls deux regroupements n'ont pas pu être caractérisés faute de données disponibles et de difficultés d'accès à la formation lors des investigations opérées sur site.

Certains regroupements sont caractérisés par une forte dispersion des valeurs. C'est le cas pour l'ensemble des dépôts quaternaires (alluvions et loess) pour lesquels les valeurs minimales sont très faibles (V_b inférieur à 1) alors que les valeurs maximales sont parfois très élevées (V_b localement supérieur à 7). Malgré cette grande hétérogénéité dans les valeurs, seuls les loess anciens ont été distingués par la note 2.

Le regroupement de la Molasse alsacienne et Conglomérats côtiers (Éocène-Oligocène) présente une valeur au bleu proche de la limite (2,4 en moyenne) et il a donc été décidé de lui attribuer une note géotechnique de 2, de même que pour les Argiles du Trias (pour lesquelles les données recueillies en Moselle dans un environnement comparable sont d'ailleurs nettement supérieures).

Le regroupement des Argiles du Dogger et du Malm présente aussi une forte hétérogénéité, avec des valeurs au bleu allant de 0,84 à 5,66. Le fait de supprimer ou non les données minimale et maximale ne modifie cependant pas la moyenne qui justifie l'attribution de la note 2 à l'ensemble du groupe.

En ce qui concerne les Calcaires du Muschelkalk supérieur, les valeurs au bleu sont proches de la limite supérieure de la classe 1 mais la prise en compte des résultats obtenus en Moselle justifie l'attribution d'une note géotechnique de 2.

Cartographie de l'aléa retrait-gonflement du Bas-Rhin

N°	Nom de la formation	Alsace								autres départements								Note géotechnique
		Indice de plasticité				Valeur au bleu (Vb) g/100g				Moselle		Meurthe-et-Moselle		Vosges		Haute-Saône		
		nb.val.	min.	max.	moy	nb.val.	min.	max.	moy.	moy. lp	moy. Vb	moy. lp	moy. Vb	moy. lp	moy. Vb	moy. lp	moy. Vb	
1	Tourbes et dépôts tourbeux	2	20,2	50,4	35,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	
2	Alluvions et colluvions grossières	66	6	60,5	21,6	59	0,02	6,1	0,9	-	-	-	-	-	-	-	1	
3	Alluvions et colluvions mixtes	73	4	42	18,7	97	0,03	7,7	1,1	-	-	-	-	-	-	-	1	
4	Alluvions et colluvions fines	30	7	62	21,7	16	0,46	4,7	1,8	-	-	-	-	-	-	-	1	
5	Loess récents	38	6	36	14,2	35	0,04	4,6	1,7	-	-	-	-	-	-	-	1	
6	Loess anciens	216	6	55	20,2	17	0,70	8,0	3,1	-	-	-	-	-	-	-	2	
7	Limons des plateaux et altérites	5	15	29,8	22,0	2	1,16	4,6	2,9	24,6	2,5	24,3	3,7	0,4	25,2	27,1	4,7	2
8	Argiles plio-quaternaires	1	12,5	12,5	12,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	
9	Sables pliocènes	8	7	49	24,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3	2	
10	Marno-calcaires et grès du Paléogène	5	14	49	28,4	2	1,53	3,4	2,5	-	-	-	-	-	-	-	2	
11	Série grise et Couches de Pêchebronn (Rupélien)	15	9	56	31,4	2	1,97	3,9	3,0	-	-	-	-	-	-	-	2	
12	Molasse alsacienne et Conglomérats côtiers (Oligocène-Éocène)	-	-	-	-	3	1,39	4,1	2,4	-	-	-	-	-	-	-	2	
13	Argiles de l'Éocène	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
14	Argiles du Dogger et du Malm	2	18,1	22,9	20,5	4	0,84	5,7	3,5	-	-	-	-	-	-	23,5	3,6	2
15	Calcaires du Dogger	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,0	-	-
16	Marnes et calcaires du Dogger	9	12,5	45	26,7	2	3,19	3,9	3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	2
17	Calcaires marneux du Dogger	4	22	24	23,3	1	2,50	2,5	2,5	-	-	-	-	-	-	39,8	2,6	2
18	Argiles du Lias	13	16	42	29,2	2	5,29	6,8	6,0	24,6	3,7	25,9	2	25,5	-	21,5	3,7	3
										26,8	3,8	26,4	4,5	28,5	-	26,0	4,2	
19	Marnes et calcaires du Lias	1	55,7	55,7	55,7	3	2,24	4,0	3,2	24,6	2,4	15,9	-	24,2	-	25,9	2,7	2
										25,6	3	24,3	-	28,8	2,9	-	-	
20	Argiles du Trias	26	8,7	49,4	23,9	8	0,99	7,0	2,4	29,4	5,1	31,1	-	34,5	4,9	22,7	4,1	2
										26	4,8	25,1	3,6	26,3	1,9	-	-	
21	Marnes et calcaires Trias	3	15	39	26,0	2	1,70	6,2	4,0	26,6	4,5	-	-	27,3	2	24,8	3,5	2
										26,8	4,6	27	-	22,8	-	-	-	
										23,4	3,1	-	-	20,8	0,2	24,8	3,1	
22	Calcaires du Muschelkalk supérieur	4	21	26	22,8	4	1,25	4,2	2,2	32	6,7	-	-	-	-	-	-	1
23	Calcaires du Muschelkalk inférieur	3	10	36,2	20,1	1	1,66	1,7	1,7	18,5	0,8	14,5	-	-	-	24,4	2,6	1
24	Schistes du socle vosgien	1	15,4	15,4	15,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

Tableau 9 - Caractérisation géotechnique des formations argileuses et marnieuses du département

6. Élaboration de la carte de susceptibilité

6.1. DETERMINATION D'UN DEGRE DE SUSCEPTIBILITE

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 deux 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 présentées dans le Tableau 10 :

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

Tableau 10 - Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement

Moyennant ce traitement, les notes de susceptibilité attribuées aux 24 formations retenues comme argileuses sont présentées dans le Tableau 11 :

N°	Nom de la formation	Superficie (km ²)	Note lithologique	Note minéralogique	Note géotechnique	Moyenne	niveau de susceptibilité
1	Tourbes et dépôts tourbeux	35,70	4	-	3	3,50	fort
2	Alluvions et colluvions grossières	377,52	1	3	1	1,67	faible
3	Alluvions et colluvions mixtes	1 113,06	2	3	1	2,00	faible
4	Alluvions et colluvions fines	216,44	3	3	1	2,33	moyen
5	Loess récents	327,11	1	2	1	1,33	faible
6	Loess anciens	561,98	2	3	2	2,33	moyen
7	Limons des plateaux et altérites	115,37	2	2	2	2,00	faible
8	Argiles plio-quadernaires	3,93	4	3	1	2,67	moyen
9	Sables pliocènes	141,29	1	2	2	1,67	faible
10	Marno-calcaires et grès du Paléogène	5,95	3	2	2	2,33	moyen
11	Série grise et Couches de Pêchebronn (Rupélien)	98,95	4	2	2	2,67	moyen
12	Molasse alsacienne et Conglomérats côtiers (Éocène-Oligocène)	19,51	2	1	2	1,67	faible
13	Argiles de l'Éocène	2,14	4	1	-	2,50	moyen
14	Argiles du Dogger et du Malm	13,66	4	2	2	2,67	moyen
15	Calcaires du Dogger	5,63	1	1	-	1,00	faible
16	Marnes et calcaires du Dogger	12,05	3	2	2	2,33	moyen
17	Calcaires marneux du Dogger	13,80	2	2	2	2,00	faible
18	Argiles du Lias	47,70	4	1	3	2,67	moyen
19	Marnes et calcaires du Lias	25,32	2	2	2	2,00	faible
20	Argiles du Trias	130,45	4	2	2	2,67	moyen
21	Marnes et calcaires du Trias	77,11	2	2	2	2,00	faible
22	Calcaires du Muschelkalk supérieur	142,46	2	2	2	2,00	faible
23	Calcaires du Muschelkalk inférieur	119,36	2	2	1	1,67	faible
24	Schistes du socle vosgien	97,75	1	1	1	1,00	faible

Tableau 11 - Susceptibilité des formations argileuses retenues

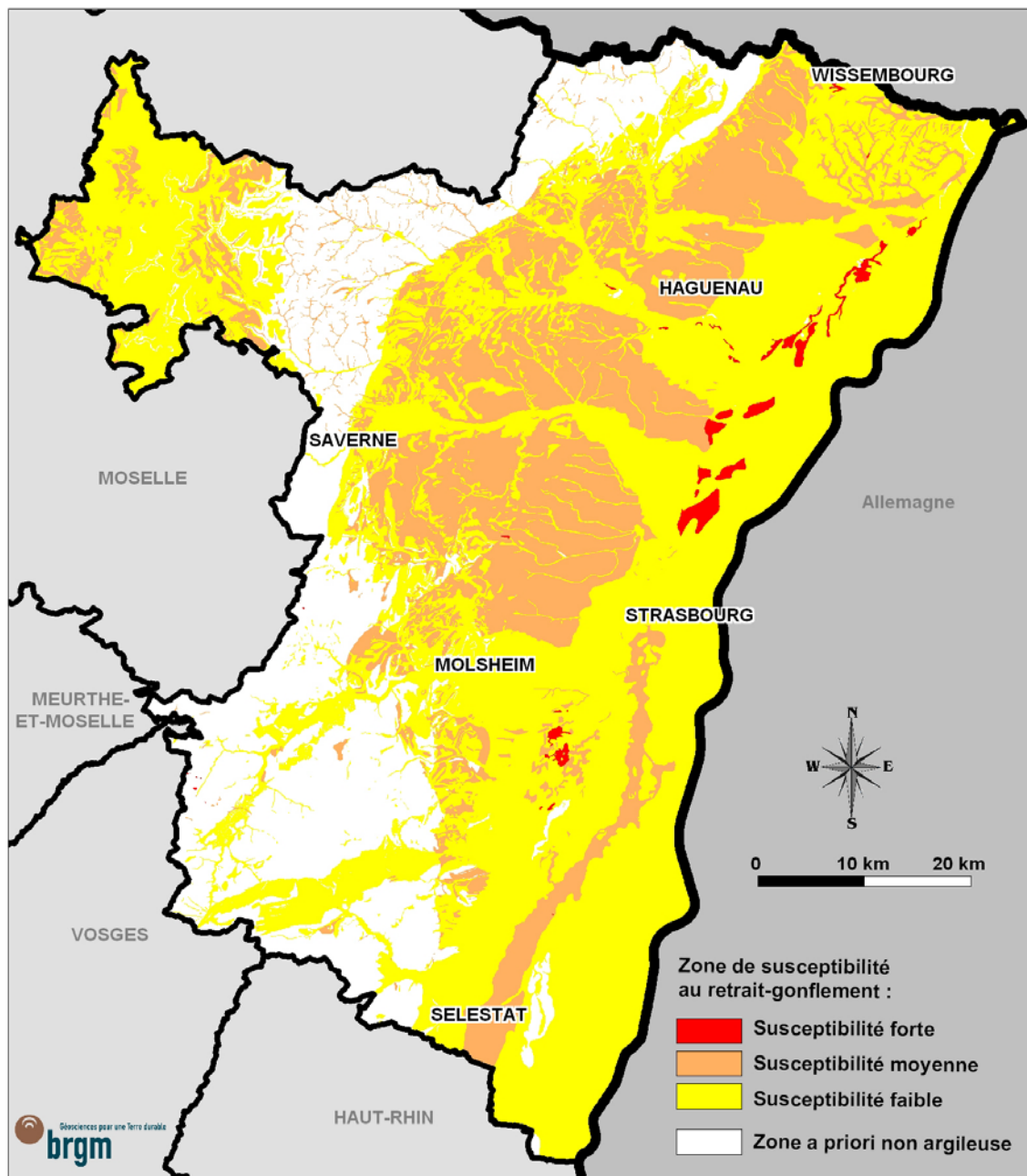


Illustration 10 - Carte de susceptibilité au retrait gonflement des formations argileuses et marneuses du département du Bas-Rhin

6.2. SYNTHÈSE

Dans le département du Bas-Rhin une seule formation, celle des Tourbes et dépôts tourbeux, est jugée fortement susceptible, tandis que dix formations ont été considérées comme moyennement susceptibles et treize formations faiblement susceptibles.

Au final moins de 1% du territoire est classé en susceptibilité forte, près de 23 % est considéré en susceptibilité moyenne, et plus de 53 % en susceptibilité faible. Les formations *a priori non argileuses* présentent près de 23% du territoire (Tableau 12).

N°	Nom de la formation	Superficie (km ²)	% de la superficie départementale	niveau de susceptibilité
1	Tourbes et dépôts tourbeux	35,70	0,74%	fort
Total en susceptibilité forte		35,70	0,74%	
4	Alluvions et colluvions fines	216,44	4,51%	moyen
6	Loess anciens	561,98	11,70%	moyen
8	Argiles plio-quadernaires	3,93	0,08%	moyen
10	Marno-calcaires et grès du Paléogène	5,95	0,12%	moyen
11	Série grise et Couches de Pêchelbronn (Rupélien)	98,95	2,06%	moyen
13	Argiles de l'Éocène	2,14	0,04%	moyen
14	Argiles du Dogger et du Malm	13,66	0,28%	moyen
16	Marnes et calcaires du Dogger	12,05	0,25%	moyen
18	Argiles du Lias	47,70	0,99%	moyen
20	Argiles du Trias	130,45	2,72%	moyen
Total en susceptibilité moyenne		1 093,26	22,77%	
2	Alluvions et colluvions grossières	377,52	7,86%	faible
3	Alluvions et colluvions mixtes	1 113,06	23,18%	faible
5	Loess récents	327,11	6,81%	faible
7	Limons des plateaux et altérites	115,37	2,40%	faible
9	Sables pliocènes	141,29	2,94%	faible
12	Molasse alsacienne et Conglomérats côtiers (Éocène-Oligocène)	19,51	0,41%	faible
15	Calcaires du Dogger	5,63	0,12%	faible
17	Calcaires marneux du Dogger	13,80	0,29%	faible
19	Marnes et calcaires du Lias	25,32	0,53%	faible
21	Marnes et calcaires du Trias	77,11	1,61%	faible
22	Calcaires du Muschelkalk supérieur	142,46	2,97%	faible
23	Calcaires du Muschelkalk inférieur	119,36	2,49%	faible
24	Schistes du socle vosgien	97,75	2,04%	faible
Total en susceptibilité faible		2 575,29	53,63%	
Total des formations argileuses		3 704,24	77,14%	
Formations a priori non argileuses		1 098,04	22,86%	
Total département		4 802,28	100,00%	

Tableau 12 - Superficie des formations par niveau de susceptibilité

6.3. COMPARAISON AVEC LES DEPARTEMENTS LIMITROPHES

A titre indicatif, il apparaît utile de comparer les résultats obtenus sur les départements limitrophes pour lesquels la carte d'aléa retrait-gonflement est déjà publiée (Moselle, Meurthe-et-Moselle, Vosges) ou est en cours de finalisation (Haut-Rhin). Étant donné les variations spatiales de faciès, les regroupements parfois différents justifiés par l'état des connaissances et l'étendue des affleurements des formations dans chaque

département), il se peut que les formations présentent des différences d'un département à l'autre du point de vue de leur susceptibilité. Cependant, ces différences restent peu significatives et peuvent être expliquées.

La continuité avec le département du Haut-Rhin est parfaite dans la mesure où les formations qui affleurent dans tout le fossé rhénan sont identiques et qu'elles ont été regroupées et caractérisées de manière similaire, en exploitant les mêmes sources de données.

Avec les départements lorrains limitrophes, on observe quelques différences d'interprétation, en particulier au niveau des formations du Trias et du Jurassique pour lesquelles les regroupements de formations ont été effectués différemment. Par exemple, dans le département du Bas-Rhin, la zone argilo-marneuse à myacites du Muschelkalk inférieur a été rattachée aux Argiles du Trias et distinguée des formations calcaires du Muschelkalk inférieur, ce qui explique qu'elle ait été caractérisée avec un niveau de susceptibilité plus élevé qu'en Moselle où elle est rattachée à un ensemble globalement moins argileux.

7. Analyse de la sinistralité

7.1. RECONNAISSANCE DE L'ÉTAT DE CATASTROPHE NATURELLE ET PROCEDURE EXCEPTIONNELLE D'INDEMNISATION

7.1.1. La procédure de reconnaissance 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. Selon les 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.

7.1.2. Procédure exceptionnelle d'indemnisation

Dans le cadre de la solidarité nationale, une procédure exceptionnelle d'aide pour les dommages aux bâtiments causés par la sécheresse durant l'été 2003 a été mise en place (article 110 de la loi de finances 2006). Cette procédure vise à indemniser les dégâts survenus lors de la sécheresse 2003 sur des habitations principales dans des communes ayant fait la demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle mais ne l'ayant pas obtenu. En effet, le nombre de communes sinistrées lors de cet épisode climatique dépassait de loin le nombre de communes reconnues en état de catastrophe naturelle.

Aucune commune du Bas-Rhin n'a cependant bénéficié de cette procédure exceptionnelle.

7.2. IDENTIFICATION DES COMMUNES SINISTREES

7.2.1. Localisation des communes sinistrées

Au 15 mai 2009, 24 des 527 communes que compte le département (soit près de 4 % d'entre elles) 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. Une seule commune présente deux arrêtés successifs de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle au titre de mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols. Par ailleurs, une commune du nord du département a récemment introduit une demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle au titre de mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols.

Les communes concernées par les arrêtés d'état de catastrophe naturelle dans le département sont principalement localisées dans les champs de fractures des Collines sous-vosgiennes, ou au niveau des terrasses de loess (Illustration 11).

Dans le seul cadre du régime des catastrophes naturelles, les indemnités versées dans le département pour des sinistres de ce type ont été évaluées par la Caisse centrale de réassurance en septembre 2008 à 1,45 millions d'euros en coûts actualisés, ce qui place le Bas-Rhin en 64^{ème} position des départements français selon ce critère.

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

Ces arrêtés portent principalement sur la sécheresse de l'été 2003, avec 22 des 24 communes concernées par des arrêtés. Ils décrivent une période courte de 3 mois allant de juillet à septembre 2003 (Tableau 13). La seconde période concernée par les arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle correspond aux années sèches entre 1990 et 1996, ces arrêtés portant sur des durées de 3 à 6 ans, mais ne concernant que trois communes. Il est à noter que la commune de Truchtersheim est la seule commune à avoir été reconnue en état de catastrophe naturelle pour les deux périodes. Aucune commune ne présente de sinistre indemnisé au titre de la procédure exceptionnelle (loi de finances 2006) dans le département.

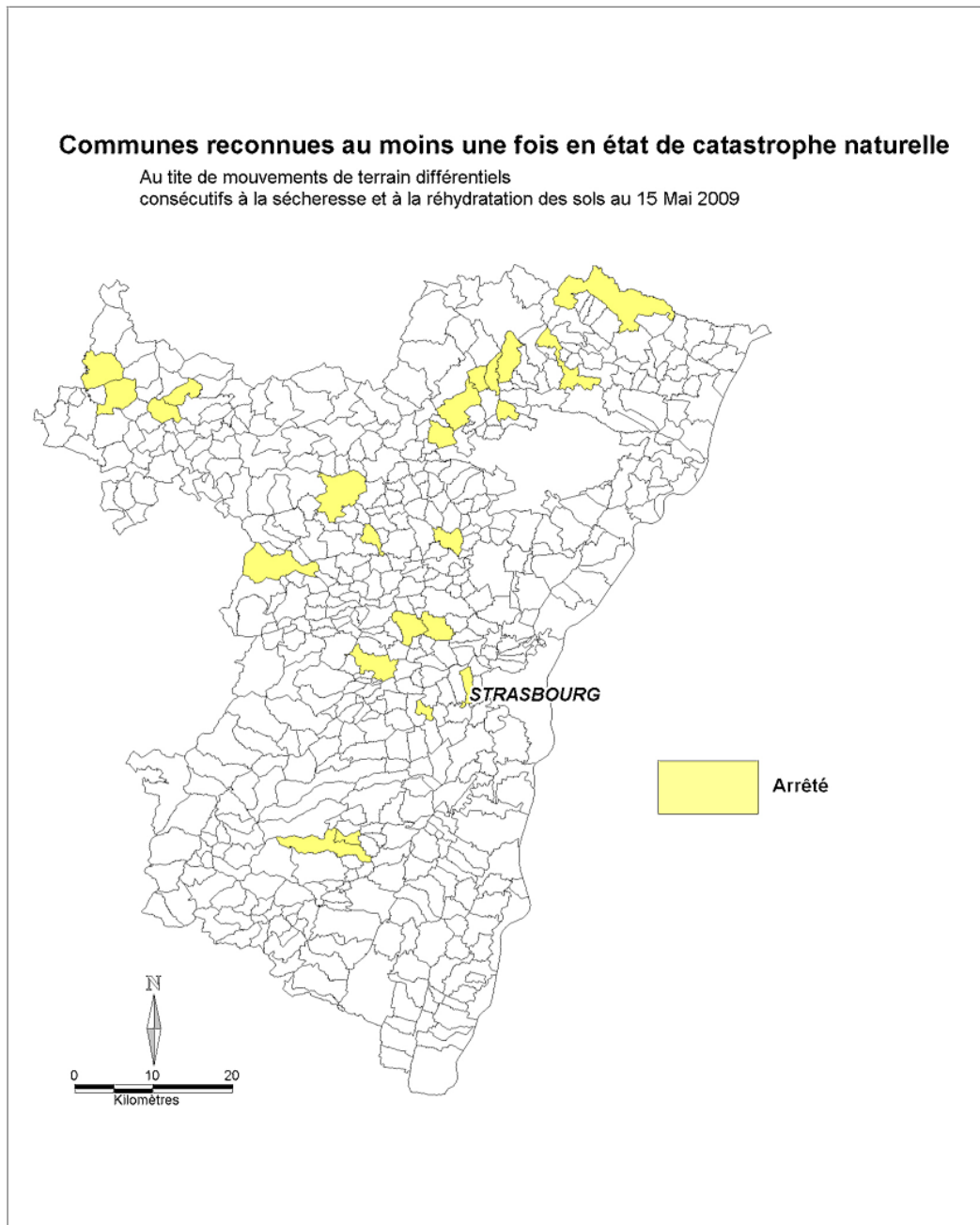


Illustration 11 - Carte de localisation des communes reconnues en état de catastrophe naturelle au titre de mouvements de terrain consécutifs à la sécheresse et la réhydratation des sols

Code INSEE	Commune	Début période	Fin période	Date publication de l'arrêté	Date publication JO
Période 1990-996					
67247	Kolbsheim	01/01/1990	31/12/1996	02/02/1998	18/02/1998
67282	Marlenheim	01/01/1990	30/09/1993	08/09/1994	25/09/1994
67495	Truchtersheim	01/01/1990	30/06/1994	09/12/1996	20/12/1996
Sécheresse 2003					
67021	Barr	01/07/2003	30/09/2003	25/08/2004	26/08/2004
67061	Bouxwiller	01/07/2003	30/09/2003	18/10/2007	25/10/2007
67095	Diemeringen	01/07/2003	30/09/2003	30/03/2006	02/04/2006
67110	Durrenbach	01/07/2003	30/09/2003	17/04/2009	22/04/2009
67147	Froeschwiller	01/07/2003	30/09/2003	27/05/2005	31/05/2005
67160	Goersdorf	01/07/2003	30/09/2003	23/03/2007	01/04/2007
67176	Gundershoffen	01/07/2003	30/09/2003	27/05/2005	31/05/2005
67189	Heiligenstein	01/07/2003	30/09/2003	31/03/2008	04/04/2008
67234	Keskastel	01/07/2003	30/09/2003	22/11/2005	13/12/2005
67278	Mackwiller	01/07/2003	30/09/2003	05/05/2006	14/05/2006
67287	Melsheim	01/07/2003	30/09/2003	30/03/2006	02/04/2006
67292	Mietesheim	01/07/2003	30/09/2003	24/04/2007	04/05/2007
67301	Mommenheim	01/07/2003	30/09/2003	22/11/2005	13/12/2005
67303	Monswiller	01/07/2003	30/09/2003	31/03/2008	04/04/2008
67434	Sarre-Union	01/07/2003	30/09/2003	22/11/2005	13/12/2005
67434	Sarre-Union	01/07/2003	30/09/2003	31/03/2008	04/04/2008
67437	Saverne	01/07/2003	30/09/2003	22/11/2005	13/12/2005
67452	Schnersheim	01/07/2003	30/09/2003	27/05/2005	31/05/2005
67474	Soultz-sous-Forêts	01/07/2003	30/09/2003	27/05/2005	31/05/2005
67495	Truchtersheim	01/07/2003	30/09/2003	18/10/2007	25/10/2007
67544	Wissembourg	01/07/2003	30/09/2003	16/06/2006	14/07/2006
67550	Woerth	01/07/2003	30/09/2003	27/07/2006	08/08/2006
67551	Wolfisheim	01/07/2003	30/09/2003	30/03/2006	02/04/2006

Tableau 13 – Communes ayant été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle au titre de mouvements de terrain consécutifs à la sécheresse et la réhydratation des sols.

7.3. COLLECTE DES DONNÉES DE SINISTRES

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

- consultation des dossiers de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle disponibles à la préfecture du Bas-Rhin ainsi qu'à la Caisse Centrale de Réassurance ;
- enquête systématique par courrier avec relances téléphoniques ciblées auprès de l'ensemble des communes du département ;

- exploitation des dossiers communiqués par des assureurs (Groupama, MAAF, MACIF), des entreprises (Uretek Grand-Est) et des bureaux d'étude (Fondasol, Géotec, Arcadis-ESG), dont la liste et les adresses figurent en Annexe 3.

Les données ainsi recueillies de différentes sources peuvent porter sur un même sinistre et il a donc été nécessaire d'éliminer les doublons. Les sinistres ont été localisés *via* le site internet cadastre.gouv.fr. Il apparaît que les Collines sous-vosgiennes, les terrasses lœssiques et l'Alsace Bossue concentrent une bonne part de sinistres, tandis que la Plaine d'Alsace proprement dite et les Vosges semblent relativement épargnées par le phénomène (Illustration 12).

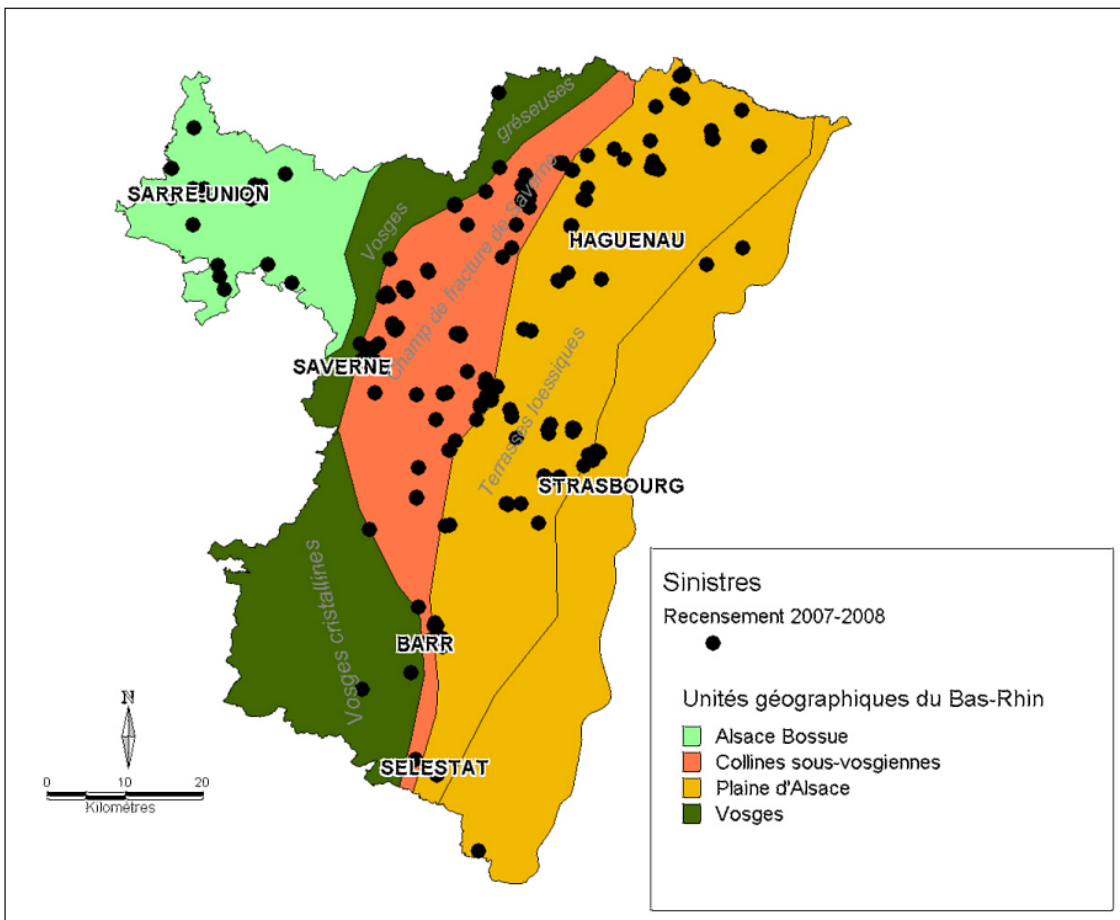


Illustration 12 - Carte de localisation des sinistres recensés fin 2008

L'enquête, réalisée auprès de l'ensemble des communes en collaboration avec la préfecture, s'est déroulée d'août 2007 à décembre 2008. Une première lettre a été envoyée en août 2007 et une relance a été effectuée par courrier en mai 2008, suivie de relances ciblées par téléphone. Les sinistres déclarés par les communes ont été localisés par leurs soins sur un fond topographique fourni par le BRGM et provenant des Scan 25 de l'IGN. Cette enquête a permis de recenser au total 166 sinistres. Sur les 527 communes du département, 379 ont répondu, soit un taux de réponse de près

de 72 %, ce qui est acceptable compte tenu de l'ampleur limitée des conséquences du retrait-gonflement des sols argileux dans ce département. En particulier, les 24 communes ayant fait l'objet d'une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ont toutes répondu à l'enquête.

Les dossiers fournis par les assureurs, entreprises de réparation et bureaux d'études, ainsi que les dossiers de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ont permis de recenser 86 sinistres supplémentaires.

Au total, après élimination des doublons, on compte 252 sinistres répertoriés sur 88 des 527 communes du département. Le nombre de sinistres recensés par commune varie de 1 à 19, avec une majorité de communes très peu sinistrées (1 à 3 sinistres). Il est à noter que 59 % des sinistres recensés lors de la présente étude se situent dans des communes qui n'ont encore jamais été reconnues en état de catastrophe naturelle sécheresse à ce jour.

Il faut noter que certaines déclarations de sinistres sont tardives, ce qui peut en partie expliquer que les périodes de déficit hydrique et les dates des sinistres ne soient pas vraiment corrélés. 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. Ceci pourrait également expliquer une partie des sinistres signalés comme postérieurs à l'été 2003.

Il convient cependant de garder à l'esprit que la principale source de données de sinistres provient des mairies, lesquelles ont uniquement recensé les sinistres dont elles avaient la connaissance, sans toujours savoir quelle était leur date de survenance. D'ailleurs, sur les 252 sinistres recensés, 148 n'ont pas pu être datés avec précision. Le plus ancien sinistre daté remonte à l'année 1980 et le plus récent serait apparu en 2008. Par ailleurs 85 sinistres sont postérieurs à l'été 2003.

7.4. REPARTITION DES SINISTRES PAR FORMATION GEOLOGIQUE

La nature des terrains affleurant constitue le principal facteur de prédisposition au phénomène de retrait-gonflement, ce qui conduit à étudier la répartition des sinistres sur chacune des formations retenue comme potentiellement argileuse. L'ensemble des 252 sinistres a ainsi été rattaché aux formations argileuses et marneuses répertoriées dans le département (Tableau 14). Le nombre de sinistre par formation argileuse et marneuse varie fortement, deux formations ne présentant aucun sinistre, tandis qu'une formation ne présente qu'un seul sinistre. Le maximum est de 52 sinistres pour les loëss anciens, toutefois très étendus dans le département.

Cependant le nombre de sinistres par formation est un indicateur très partiel de la propension d'une formation à générer des sinistres. En effet, le nombre de sinistre par formation est fortement tributaire de la surface d'affleurement, laquelle est très inégale d'une formation à l'autre. La densité de sinistre qui rapporte le nombre de sinistres pour 100 km² de formation affleurante permet de comparer les formations les unes aux autres. Ainsi la colonne densité de sinistres pour 100 km² de surface affleurante (Tableau 14) permet d'établir une hiérarchie plus fiable entre les différentes formations.

Globalement ce sont l'ensemble des formations quaternaires qui présentent le plus grand nombre de sinistres. Cependant en termes de densité de sinistres pour 100 km² de surface affleurante, ce sont les Marno-calcaires et grès du Paléogène, les Calcaires du Dogger, les Argiles du Lias, et les Marnes et calcaires du Trias qui présentent les densités de sinistres les plus élevées (jusqu'à 83 sinistres pour 100 km²)

N°	Nom de la formation	Superficie (km ²)	Nombre de sinistres	Densité de sinistres (pour 100 km ²)
1	Tourbes et dépôts tourbeux	35,70	1	1,59
2	Alluvions et colluvions grossières	377,52	21	49,42
3	Alluvions et colluvions mixtes	1 113,06	34	125,94
4	Alluvions et colluvions fines	216,44	13	20,12
5	Loess récents	327,11	17	44,35
6	Loess anciens	561,98	52	39,75
7	Limos des plateaux et altérites	115,37	5	3,61
8	Argiles plio-quaternaires	3,93	0	0,01
9	Sables pliocènes	141,29	1	7,56
10	Marno-calcaires et grès du Paléogène	5,95	5	0,83
11	Série grise et Couches de Pêchebron (Rupélien)	98,95	11	5,92
12	Molasse alsacienne et Conglomérats côtiers (Éocène-Oligocène)	19,51	1	1,69
13	Argiles de l'Éocène	2,14	0	0,3
14	Argiles du Dogger et du Malm	13,66	2	0,89
15	Calcaires du Dogger	5,63	4	1,09
16	Marnes et calcaires du Dogger	12,05	2	1,17
17	Calcaires marneux du Dogger	13,80	0	0,57
18	Argiles du Lias	47,70	13	1,76
19	Marnes et calcaires du Lias	25,32	5	1,27
20	Argiles du Trias	130,45	17	6,72
21	Marnes et calcaires du Trias	77,11	25	4,15
22	Calcaires du Muschelkalk supérieur	142,46	16	5,52
23	Calcaires du Muschelkalk inférieur	119,36	3	4,56
24	Schistes du socle vosgien	97,75	4	2,62

Tableau 14 - Densité de sinistres pour 100 km² de formation affleurante

7.5. FRÉQUENCE D'OCCURRENCE RAPPORTÉE A LA SURFACE BATIE

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 et cela pourrait donc biaiser l'analyse sur les densités de sinistres par formation. En effet, une formation géologique s'étendant principalement en milieu rural peu bâti sera nécessairement moins touchée qu'une formation aussi susceptible mais très urbanisée. C'est pourquoi les densités de sinistres par formation géologique ont été rapportées à 100 km² de surface effectivement bâtie, conformément à la méthodologie retenue au niveau national.

7.5.1. Détermination la surface urbanisée ou bâtie par formation

Afin de calculer, pour chacune des formations retenues comme potentiellement argileuse, la superficie effectivement bâtie à ce jour, l'outil utilisé est la couche « Bâti » de la BD Topo de l'IGN (issue de la vectorisation des cartes au 1/25 000), mise à disposition par la DDE pour les besoins spécifiques de l'étude.

Cet outil n'ayant pu être utilisé dans la plupart des départements déjà couverts par des cartes d'aléa retrait-gonflement, la surface urbanisée par formation argileuse est habituellement évaluée en numérisant les contours des zones bâties à partir des cartes topographiques de l'IGN au 1/25 000, ce qui aboutit à un zonage nettement plus grossier. Pour garder un élément de comparaison avec d'autres départements déjà couverts de la sorte, cette répartition des zones urbanisées a été approchée en utilisant l'emprise spatiale des zones urbanisées disponibles via la BD Carto de l'IGN. Ces contours sont naturellement très imprécis par comparaison avec ceux de la BD Topo qui individualisent chaque bâtiment, mais sont plus proches des outils utilisés dans d'autres départements limitrophes déjà traités.

Dans la suite du rapport, la superficie obtenue à partir du calcul de la surface des bâtiments dans la BD Topo sera appelée conventionnellement « surface bâtie », tandis que la surface calculée à partir de la BD Carto de l'IGN sera plutôt appelée « surface urbanisée ». Il peut exister un rapport de un à cinq entre les deux modes de calculs mais globalement les proportions restent similaires et il s'avère que les deux méthodes conduisent à une hiérarchisation équivalente quant à la sinistralité par formation.

7.5.2. Densité de sinistre pour 100 km² de surface urbanisée/bâtie

Dans le département du Bas-Rhin, quelle que soit la méthode de calcul des surfaces bâties ou urbanisées, on constate que les densités moyennes de sinistres sont faibles. Cette densité moyenne est de 75 sinistres pour 100 km² de surface urbanisée, et de 319 sinistres pour 100 km² de surface bâtie.

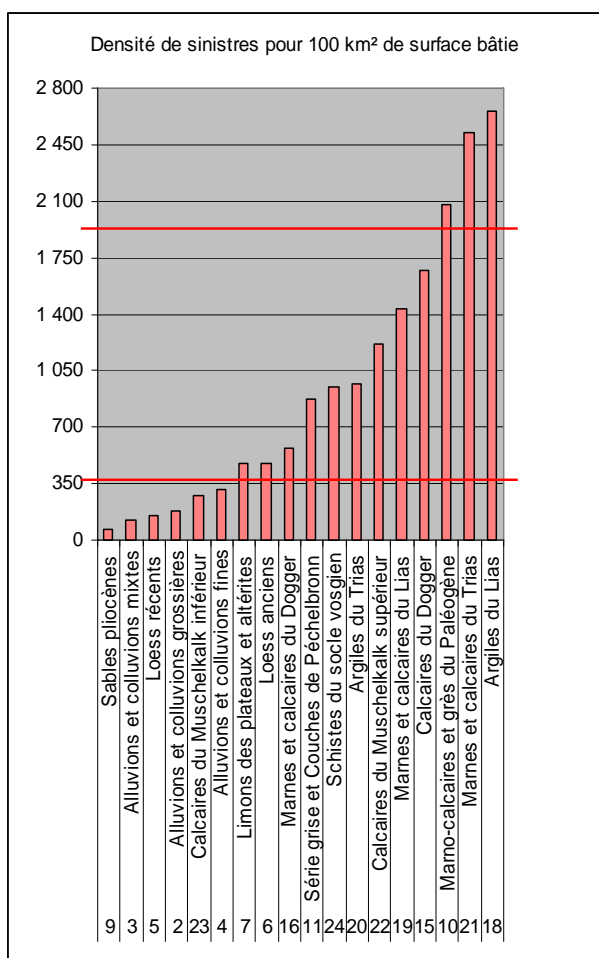
La comparaison de la densité moyenne de sinistres avec d'autres départements montre que le Bas-Rhin est relativement épargné par le phénomène. En effet, la densité moyenne de sinistres calculée pour une cinquantaine de départements déjà couverts par des cartes d'aléa retrait-gonflement est de l'ordre de 1 000 sinistres pour 100 km² de surface urbanisée. Elle est par exemple de 735 en Moselle et de 1 320 en Meurthe-et-Moselle, deux départements limitrophes où ont été dénombrés

respectivement 2 546 et 3 006 sinistres. Si l'on se réfère à la BD Topo pour l'évaluation des densités de sinistres à partir des zones bâties, la densité calculée dans le Bas-Rhin est également faible, même par rapport à un département comme la Haute-Saône où le nombre de sinistres recensé est similaire (238) mais avec une densité moyenne de sinistres de 1 249 sinistres pour 100 km² de surface bâtie.

Les formations du Lias et du Trias, qui ne représentent qu'environ 10 % de la surface urbanisée du département concentrent à elles seules près de 40 % des sinistres recensés. La densité de sinistres en Moselle et dans le Bas-Rhin est par ailleurs comparable pour les formations du Trias.

7.5.3. 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 bâtie de la formation, mais on constate que l'on obtient une hiérarchisation identique si l'on rapporte plutôt la sinistralité à la surface urbanisée par formation. Les résultats indiquent que la prise en compte du taux d'urbanisation modifie sensiblement la



hiérarchisation des formations géologiques en termes de densité de sinistres, dans la mesure où ce taux varie d'une formation à l'autre. La densité moyenne de sinistres pour 100 km² de formation bâtie est de 322 (et de 76 si l'on se réfère à la surface urbanisée).

L'histogramme présentant les formations des moins sinistrées au plus sinistrées (Illustration 13), met en évidence deux seuils. Le premier se situant autour de 100 sinistres pour 100 km² de surface urbanisée (environ 350 en surface bâtie), le second seuil est à 500 sinistres pour 100 km² de surface urbanisée (2 000 en surface bâtie). Les lignes rouges correspondent aux deux seuils retenus pour délimiter les classes de sinistralité.

Illustration 13 - Distribution des densités de sinistres pour 100 km² de surface bâtie par formation

A partir de cette distribution des densités de sinistres et des seuils ainsi identifiés pour permettre une hiérarchisation objective de la sinistralité des différentes formations (Tableau 15), une note de sinistralité allant de 1 à 3 est attribuée à chaque formation. La note 1 correspondant à une sinistralité faible, caractérisant l'ensemble des formations moins sinistrées que la moyenne. La note 3 correspond à des formations dont la sinistralité est très significativement supérieure à celle observée pour la majorité des formations argileuses ou marneuses retenues.

Densité de surface bâtie (dsb)	Densité de surface urbanisée (dsu)	Note de sinistralité
dsb < 350	dsu < 100	1
de 530 à 2 000	de 100 à 500	2
dsb > 2000	dsu > 500	3

Tableau 15 - Barème de notation de la sinistralité

Il est à noter que, pour certaines formations, la sinistralité n'est pas significative (notée NS dans le tableau). En effet, les formations peuvent présenter des surfaces bâties (ou urbanisées) très faibles, de telle sorte qu'un seul sinistre pourrait générer un degré de sinistralité anormalement élevé par effet de pépité. Ceci concerne six formations au total dans le département du Bas-Rhin. Cependant, si pour une formation dont la surface urbanisée (ou bâtie) est petite on constate un fort nombre de sinistres, celle-ci sera quand même jugée représentative.

En appliquant le barème énoncé précédemment, on constate ainsi que trois formations se détachent avec des densités de sinistres élevées (Tableau 16) tandis que neuf formations ont été considérées comme présentant une note de sinistralité moyenne et que six formations sont caractérisées par une sinistralité faible.

Cette hiérarchie des formations en fonction des sinistres qu'elles génèrent n'est valable qu'à l'échelle du département puisque la notation est effectuée en fonction de la moyenne départementale et de la distribution des densités de sinistres. Les notes de densité de sinistres sont donc difficilement comparables d'un département à l'autre.

N°	Nom de la formation	Superficie (km ²)	Nombre de sinistres	Surface des zones urbanisées (km ²)	Surface des zones bâties (km ²)	Densité de sinistres p/r zones urbanisées	Densité de sinistres p/r zones bâties	Note de sinistralité
1	Tourbes et dépôts tourbeux	35,70	1	1,59	0,32	NS	NS	NS
2	Alluvions et colluvions grossières	377,52	21	49,42	11,79	42	178	1
3	Alluvions et colluvions mixtes	1 113,06	34	125,94	28,08	27	121	1
4	Alluvions et colluvions fines	216,44	13	20,12	4,13	65	315	1
5	Loess récents	327,11	17	44,35	10,95	38	155	1
6	Loess anciens	561,98	52	39,75	10,92	131	476	2
7	Limons des plateaux et altérites	115,37	5	3,61	1,06	139	472	2
8	Argiles plio-quaternaires	3,93	0	0,01	0	NS	NS	NS
9	Sables pliocènes	141,29	1	7,56	1,59	13	63	1
10	Marno-calcaires et grès du Paléogène	5,95	5	0,83	0,24	602	2 083	3
11	Série grise et Couches de Pêchelbron (Rupélien)	98,95	11	5,92	1,26	186	873	2
12	Molasse alsacienne et Conglomérats côtiers (Éocène-Oligocène)	19,51	1	1,69	0,3	NS	NS	NS
13	Argiles de l'Éocène	2,14	0	0,3	0,08	NS	NS	NS
14	Argiles du Dogger et du Malm	13,66	2	0,89	0,23	NS	NS	NS
15	Calcaires du Dogger	5,63	4	1,09	0,24	367	1 667	2
16	Marnes et calcaires du Dogger	12,05	2	1,17	0,35	171	571	2
17	Calcaires marneux du Dogger	13,80	0	0,57	0,15	NS	NS	NS
18	Argiles du Lias	47,70	13	1,76	0,49	739	2 653	3
19	Marnes et calcaires du Lias	25,32	5	1,27	0,35	394	1 429	2
20	Argiles du Trias	130,45	17	6,72	1,76	253	966	2
21	Marnes et calcaires du Trias	77,11	25	4,15	0,99	602	2 525	3
22	Calcaires du Muschelkalk supérieur	142,46	16	5,52	1,32	290	1 212	2
23	Calcaires du Muschelkalk inférieur	119,36	3	4,56	1,09	66	275	1
24	Schistes du socle vosgien	97,75	4	2,62	0,42	153	952	2
Total		3 704,24	252	331,41	78,11			
Moyenne						76,04	322,62	

Tableau 16 - Densité de sinistres pour 100 km² de surface affleurante urbanisée ou bâtie

8. carte d'aléa

8.1. DETERMINATION DU NIVEAU D'ALEA

L'aléa retrait-gonflement des sols argileux est, par définition, la probabilité d'occurrence du phénomène. Le niveau d'aléa a été ici évalué, de manière purement qualitative, pour chaque regroupement par la combinaison de la susceptibilité et de la densité des sinistres.

La susceptibilité des regroupements de formations géologiques a été caractérisée à partir de la moyenne des notes attribuées pour chacun des critères lithologique, minéralogique et géotechnique. L'indice de susceptibilité ainsi obtenu a été décliné en trois classes qualifiées respectivement par une susceptibilité faible, moyenne et forte, et prend 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 bâti. Les notes de sinistralité ont été attribuées en fonction de seuils, correspondant respectivement à 350 sinistres pour 100 km² de surface bâtie (ou à 100 sinistres pour 100 km² de surface urbanisée) et à 2 000 sinistres pour 100 km² de surface bâtie (ou 500 sinistres pour 100 km² de surface urbanisée).

En effet, 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. L'indice d'aléa 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 formations pour lesquelles la densité de sinistres a été jugée non significative, le niveau d'aléa retenu découle directement de la note de susceptibilité attribuée précédemment.

En appliquant la méthodologie citée précédemment on obtient une note d'aléa pour chaque formation géologique retenue (Tableau 17). À l'exception des Alluvions et colluvions fines, le niveau d'aléa correspond à celui qui avait été attribué pour en caractériser la susceptibilité.

N°	Nom de la formation	Superficie	note lithologique	note minéralogique	note géotechnique	Susceptibilité	note de sinistralité	indice d'aléa	aléa
1	Tourbes et dépôts tourbeux	35,70	4	-	3	3	NS	-	fort
2	Alluvions et colluvions grossières	377,52	1	3	1	1	1	3	faible
3	Alluvions et colluvions mixtes	1 113,06	2	3	1	1	1	3	faible
4	Alluvions et colluvions fines	216,44	3	3	1	2	1	5	faible
5	Loess récents	327,11	1	2	1	1	1	3	faible
6	Loess anciens	561,98	2	3	2	2	2	6	moyen
7	Limons des plateaux et altérites	115,37	2	2	2	1	2	4	faible
8	Argiles plio-quaternaires	3,93	4	3	1	2	NS	-	moyen
9	Sables pliocènes	141,29	1	2	2	1	1	3	faible
10	Marno-calcaires et grès du Paléogène	5,95	3	2	2	2	3	7	moyen
11	Série grise et Couches de Péchelbronn (Rupélien)	98,95	4	2	2	2	2	6	moyen
12	Molasse alsacienne et Conglomérats côtiers (Éocène-Oligocène)	19,51	2	1	2	1	NS	-	faible
13	Argiles de l'Éocène	2,14	4	1	-	2	NS	-	moyen
14	Argiles du Dogger et du Malm	13,66	4	2	2	2	NS	-	moyen
15	Calcaires du Dogger	5,63	1	1	-	1	2	4	faible
16	Marnes et calcaires du Dogger	12,05	3	2	2	2	2	6	moyen
17	Calcaires marneux du Dogger	13,80	2	2	2	1	NS	-	faible
18	Argiles du Lias	47,70	4	1	3	2	3	7	moyen
19	Marnes et calcaires du Lias	25,32	2	2	2	1	2	4	faible
20	Argiles du Trias	130,45	4	2	2	2	2	6	moyen
21	Marnes et calcaires du Trias	77,11	2	2	2	1	3	5	faible
22	Calcaires du Muschelkalk supérieur	142,46	2	2	2	1	2	6	faible
23	Calcaires du Muschelkalk inférieur	119,36	2	2	1	1	1	3	faible
24	Schistes du socle vosgien	97,75	1	1	1	1	2	4	faible

Tableau 17 - Calcul du niveau d'aléa des formations argileuses et marneuses

8.2. CARTE D'ALEA

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 14, et en carte hors-texte à l'échelle 1/125 000 (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 présentant un aléa très faible. Elles couvrent 23 % de la superficie départementale réseau hydrographique inclus. 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 quelques sinistres.

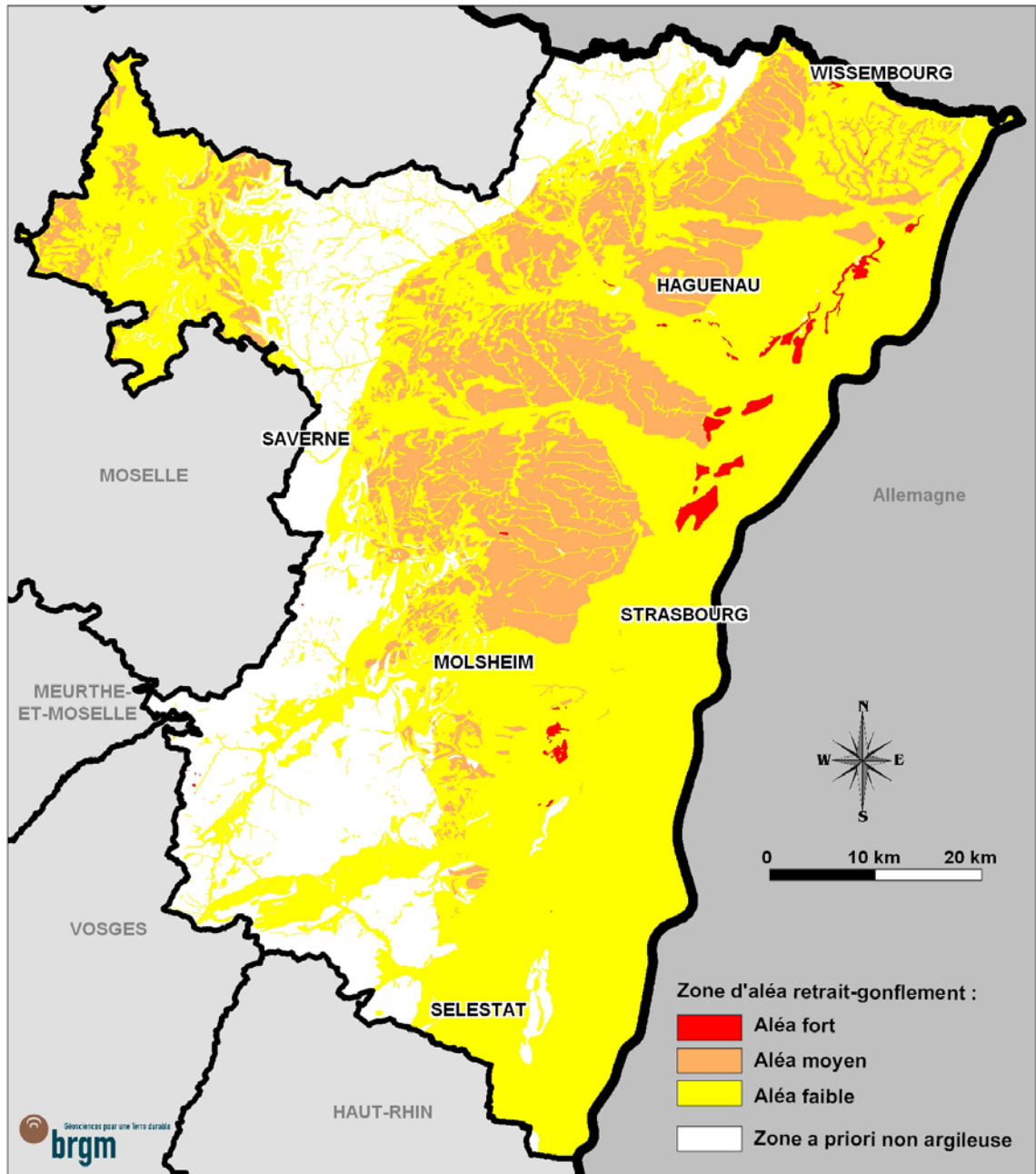


Illustration 14 – Carte départementale d'aléa retrait-gonflement

Les regroupements argileux ou marneux sont représentés par trois couleurs (jaune, orange et rouge) selon leur niveau d'aléa retrait-gonflement (qualifié respectivement de faible, moyen et fort).

On constate ainsi que la carte d'aléa reste très proche de celle qui avait été établie précédemment pour la susceptibilité, ce qui indique que la prise en compte de la sinistralité ne vient que confirmer la hiérarchisation établie à partir de la caractérisation physique des formations à composante argileuse. Seule une formation passe d'une susceptibilité moyenne à un aléa faible. Mais ce résultat est à relativiser car la sinistralité est relativement faible dans ce département et jugée statistiquement non significative pour plusieurs des formations examinées.

N°	Nom de la formation	Superficie (km ²)	% de la superficie départementale	niveau d'aléa
1	Tourbes et dépôts tourbeux	35,70	0,74%	fort
Total en aléa fort		35,70	0,74%	
6	Loess anciens	561,98	11,70%	moyen
8	Argiles plio-quadernaires	3,93	0,08%	moyen
10	Marno-calcaires et grès du Paléogène	5,95	0,12%	moyen
11	Série grise et Couches de Pêchelbronn (Rupélien)	98,95	2,06%	moyen
13	Argiles de l'Éocène	2,14	0,04%	moyen
14	Argiles du Dogger et du Malm	13,66	0,28%	moyen
16	Marnes et calcaires du Dogger	12,05	0,25%	moyen
18	Argiles du Lias	47,70	0,99%	moyen
20	Argiles du Trias	130,45	2,72%	moyen
Total en aléa moyen		876,82	18,26%	
2	Alluvions et colluvions grossières	377,52	7,86%	faible
3	Alluvions et colluvions mixtes	1 113,06	23,18%	faible
4	Alluvions et colluvions fines	216,44	4,51%	faible
5	Loess récents	327,11	6,81%	faible
7	Limos des plateaux et altérites	115,37	2,40%	faible
9	Sables pliocènes	141,29	2,94%	faible
12	Molasse alsacienne et Conglomérats côtiers (Éocène-Oligocène)	19,51	0,41%	faible
15	Calcaires du Dogger	5,63	0,12%	faible
17	Calcaires marneux du Dogger	13,80	0,29%	faible
19	Marnes et calcaires du Lias	25,32	0,53%	faible
21	Marnes et calcaires du Trias	77,11	1,61%	faible
22	Calcaires du Muschelkalk supérieur	142,46	2,97%	faible
23	Calcaires du Muschelkalk inférieur	119,36	2,49%	faible
24	Schistes du socle vosgien	97,75	2,04%	faible
Total en aléa faible		2 791,73	58,13%	
Total des formations argileuses		3 704,24	77,14%	
Formations a priori non argileuses		1 098,04	22,86%	
Total département		4 802,28	100,00%	

Tableau 18 - Classement des formations en fonction du niveau d'aléa

On retrouve ainsi une seule formation classée en aléa fort, celle des Tourbes et dépôts tourbeux, encore que les phénomènes de tassements différentiels susceptibles de s'y produire ne relèvent pas directement du retrait-gonflement. Cette formation occupe

moins de 1 % du territoire départemental (Tableau 18). On retient finalement neuf formations classées en aléa moyen, couvrant au total un peu plus de 18 % de la superficie départementale. Enfin, quatorze formations ont été classées en aléa faible, sur une surface totale légèrement supérieure à 58 % du département.

L'aléa faible est donc prépondérant dans le département du Bas-Rhin tandis que l'aléa fort y est très marginal.

8.3. COHERENCE AVEC LES DEPARTEMENTS LIMITROPHES

Parmi les départements limitrophes du Bas-Rhin, les trois départements lorrains situés en limite occidentale sont déjà couverts par une carte d'aléa retrait-gonflement publiée. Il s'agit des départements de la Moselle (57), de la Meurthe-et-Moselle (54) et des Vosges (88). Par ailleurs, le département du Haut-Rhin (68) a été cartographié simultanément à celui du Bas-Rhin.

La cohérence entre les cartes d'aléa du Haut et du Bas-Rhin ne pose pas de problème particulier. Globalement les contours de l'aléa se prolongent sans divergence notable entre les départements du Bas-Rhin et ceux des Vosges et de la Meurthe-et-Moselle. Les seules différences significatives concernent la Moselle au niveau de l'Alsace Bossue (Illustration 15).

La principale divergence d'interprétation se situe au niveau des Argiles du Trias car celles-ci ont été interprétées différemment en Moselle et dans le Bas-Rhin. En Moselle, ces faciès relativement argileux et qui apparaissent en aléa moyen dans les départements alsaciens, avaient en effet été traités en respectant davantage la stratigraphie, ce qui avait conduit à les intégrer à des formations globalement moins argileuses, si bien qu'elles ressortaient finalement en aléa faible. Les distinctions apportées en Alsace permettent une meilleure individualisation de ces faciès et font donc davantage ressortir l'aléa associé.

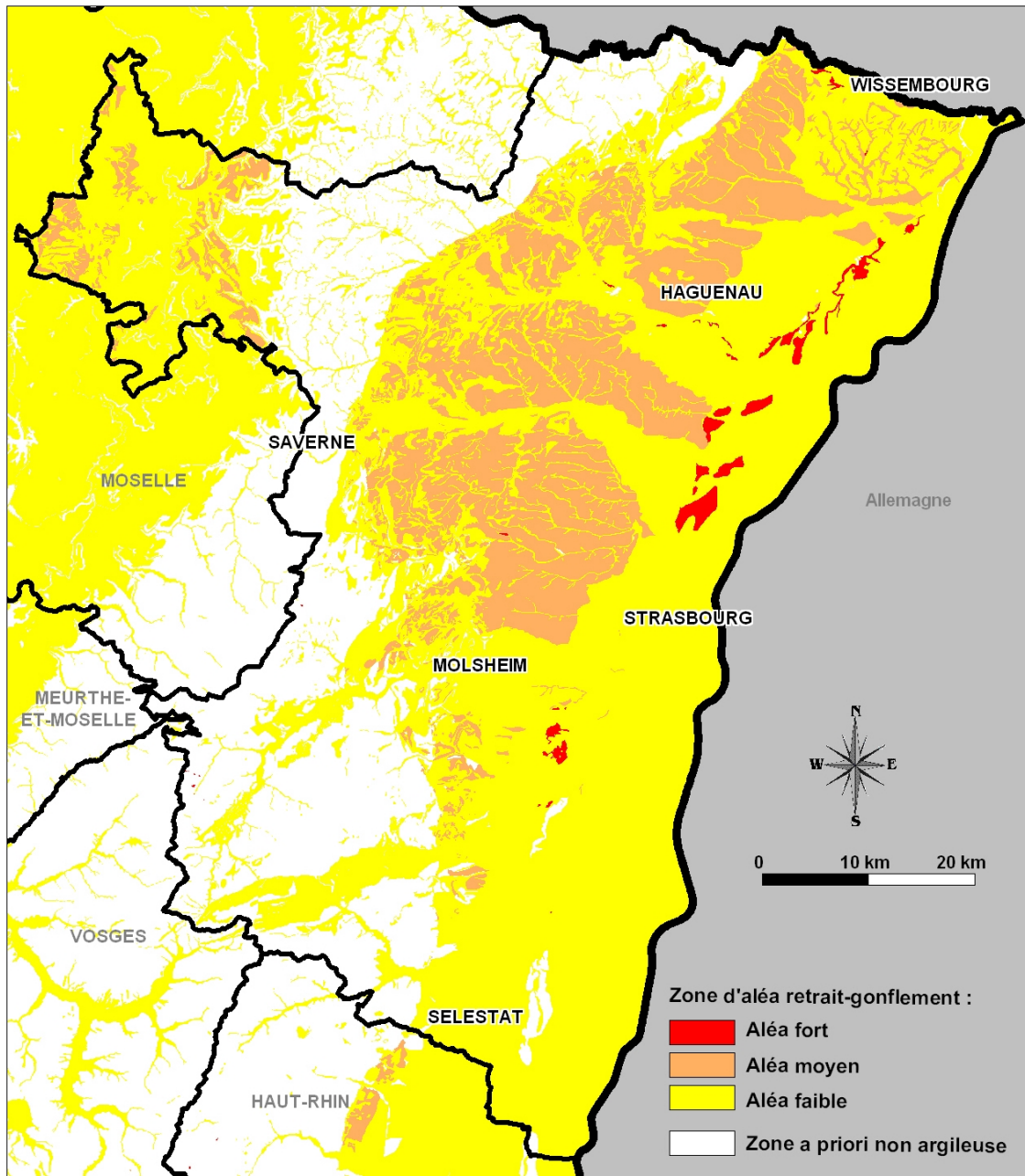


Illustration 15 – Cohérence de la carte d'aléa du Bas-Rhin avec celles établies pour les départements limitrophes

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 du Bas-Rhin. 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 et de 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 soixantaine d'autres départements. D'autres études départementales sont en cours de réalisation, le programme devant à terme couvrir l'ensemble du territoire métropolitain.

La démarche de l'étude a d'abord consisté en l'établissement d'une cartographie départementale synthétique des formations argilo-marneuses affleurantes à subaffleurantes, à partir de la synthèse des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000 et d'observations bibliographiques existantes. La carte synthétique recense en définitive 24 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, 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. Au total, 252 sinistres répartis dans 88 communes du département ont ainsi été recensés et localisés. Cet échantillon, bien qu'assurément non exhaustif, paraît représentatif du phénomène tel qu'il a été observé à ce jour dans le département.

En appliquant au département du Bas-Rhin la méthodologie mise au point au niveau national, une seule formation identifiée comme argileuse a été classée en aléa fort mais ne représente qu'une part marginale du territoire départemental. Sur une superficie départementale totale évaluée dans le cadre de l'étude à 4 802 km² :

- 0,7 % a été considéré en aléa fort bien que correspondant plutôt à des formations tourbeuses sensibles aux tassements différentiels mais selon un mécanisme qui n'est pas véritablement du retrait-gonflement au sens strict ;
- 18,3 % a été classé en aléa moyen ;
- 58,1 % a été caractérisé par un niveau d'aléa faible ;
- 22,9% est considéré comme *a priori* non argileux.

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 du Bas-Rhin, dont l'échelle de validité est le 1/50 000 et qui est présentée sous forme de planche hors-texte à l'échelle 1/125 000, 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'une étude géotechnique à la parcelle 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 oeuvre 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 tâche. *Norme française NF p18-592*

Barchi P., avec la collaboration de **Magalhães S.** et **Capron A.** (2006) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux pour le département de Meurthe-et-Moselle. Rapport BRGM/RP-54860-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 collaboration 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 tab., 4 ann., 1 pl. h.-t.

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

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, 117 p., 39 ill., 5 ann., 3 cartes h.-t.

Guignat S. et Vouaux V., 2006, Présence d'argiles gonflantes dans le département du Haut-Rhin, Campagne d'échantillonnage et résultats d'analyses Communes de Gildwiller, Hegenheim, Landser, Ruelisheim (Haut-Rhin) note technique BRGM/ALSNT06N14

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

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

Ménillet F. (1995) – Les formations superficielles des Vosges et de l'Alsace, Identification, potentialités, contraintes. *Rapport BRGM 38640*, 106 p., 34 fig., 4 tabl., 20 ph.

Menillet F. publication en cours, Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Haguenau (198).

Pannet P., Géron A., Cartannaz C. (2008) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux pour le département de la Moselle. BRGM/RP-56535-FR, 188 p., 41 ill., 5 ann., 3 cartes h.-t.

Paul P. (1983), Climat de l'Alsace, Encyclopédie de l'Alsace volume 3, Edition Plublitolal Strasbourg,

Prian J.-P., Donsimoni M., Vincent M. avec la collaboration 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. Rapport BRGM n° RP-50376-FR, 269 p., 32 fig., 11 tabl., 6 ann., 3 cartes h.-t.

Le Roy S. avec la collaboration 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.

Riehl A. (2007) - Étude des alluvions des cours d'eau de la Bruche, la Doller, la Fecht, l'III et la Thur. *Mémoire de Master1, Université F.Rabelais, Tours*

Shaaf-Raeth O. 1979 - Sédimentologie des lœss et alluvions quaternaires du Hangenbieten et Achenheim, (Alsace, France). *Thèse*

Skrzypek E., Cruz-Mermy D., Chèvremont P., Ménillet F. (2007) – Carte géologique harmonisée du département du Bas-Rhin (67). Notice géologique. BRGM/RP-56028-FR, 319 p., 4 fig., 3 tabl., 8 ann., 3 pl h.-t.

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 R 39967*, 89 p.

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) – Étude 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 collaboration 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.

Audiguier M., Geremew Z., Laribi S., Cojean R. (2007) – Caractérisation au laboratoire de la sensibilité au retrait-gonflement des sols argileux. *Revue Française de Géotechnique* n° 120-121, 4^{ème} trim. 2007, pp. 67-82

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, pp. 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

Bigot G. et Zerhouni M. (2000) – Retrait, gonflement et tassement des sols fins. *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 229, pp. 105-114

Bordes M., Després R. (2008) – Exemples concrets et illustrés des effets des périodes de sécheresse prolongée sur des constructions situées sur des sols argileux à fort aléa. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris*, pp. 367-375

Bozozuk M. (1962) – Soil shrinkage damages shallow foundations at Ottawa, Canada. *Division of Building Research NRCC Canada*, Research paper 63

Bréda N., Granier A., Aussenac G. (2004) – La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Rev. For. LVI*, février 2004, pp. 109-131

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.

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

Dumas P., Chavarot A., Legrand H., Macaire A., Dimitrov C., Martin X., Queffelec C. (2005) : Rapport particulier sur les risques de subsidence dus à la sécheresse – Mission d'enquête sur le régime d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles. *Inspection générale des Finances* n° 2005-M-020-07, *Conseil général des Ponts et Chaussées* n° 2004-0304-01, *Inspection générale de l'Environnement* n° IGE/05/006

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

Fityus SG., Smith DW., Allman MA. (2004) - An expansive soil test site near Newcastle. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(7), pp. 686-695

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

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

Gouvenot D., Modaressi A. (2007) – L'état de sécheresse exceptionnelle et ses conséquences sur l'habitat. *Experts*, n° 75, juin 2007, pp. 54-58

Guignat S., Vouaux V., 2006, Présence d'argiles gonflantes dans le département du Haut-Rhin, Campagne d'échantillonnage et résultats d'analyses, Communes de Gildwiller, Hegenheim, Landser, Ruelisheim (Haut-Rhin), Note technique n° BRGM06PIR01

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, 136 p.
- 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
- Jacquard C.** (2007) – Pathologie des fondations superficielles sur sols argileux. Retour d'expérience en Midi-Pyrénées. *Revue Française de Géotechnique* n° 120-121, 4^{ème} trim. 2007, pp. 155-164
- 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, pp. 29-41
- Madsen M.T., Müller-Vonmoos M.** (1989). The swelling behaviour of clays. *In Elsevier (Éd.) : Applied Clay Science*, 4, pp. 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, pp. 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, pp. 93-104
- Mantho A.T.** (2005) – Échanges sol – atmosphère : application à la sécheresse. *Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées*, 250 p.
- 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, pp. 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.

Philipponnat G. (1978) – Désordres dus à la présence de sols gonflants dans la région parisienne. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, n° 364, p. 1-15

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

Plat E., Vincent M., Le Roy S., Fleureau J.-M., Masrouri F., Pantet A. (2008) – Suivi expérimental des profils hydriques et des déformations dans deux sols argileux sujets au retrait-gonflement. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris*, pp. 195-201

Plat E., Le Roy S., Vincent M. avec la collab. de **Sulcas E., Lecat L., Hemmati S., Surdyk N., Dubus I.** (2008) – Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique. Rapport final de phase 3. Rapport BRGM/RP-56886-FR, 111 p., 98 ill.

Richards B.G., Peter P., Emerson W.W. (1983) – The effects of vegetation on the swelling and shrinking of soils in Australia. *Geotechnique. Vol. XXXIII*, pp. 127-139

Robinet J.C., Pakzad M., Plas F. (1994) – Un modèle rhéologique pour les argiles gonflantes. *Rev. Fr. Géotech.*, 67, pp. 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, pp. 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, pp. 65-85

SITTLER C. 1965. Le paléogène des fossés rhénan et rhodanien-Etudes sédimentologiques et paléoclimatiques. Mémoire du service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine N°24.

Skempton A.W. (1954) – A foundation failure due to clay shrinkage caused by poplar trees. *Proc. Instn. Civ. Engrs.* Part I, 3, Jan., pp. 66-83

de Solère H. (2007) – Retour d'expérience de la sécheresse 2003. *Revue Française de Géotechnique* n° 120-121, 4^{ème} trim. 2007, pp. 21-26

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

Tessier D., Blaise F., Coquet Y., Courbet C., Priem J., Lemaire Y., Trillaud, S. (2006) – Analyse comparative de politiques de prévention du risque de « sécheresse géotechnique » - Modélisation et visualisation du phénomène. Rapport final. *INRA, Unité de Sciences du Sol, Versailles*, 288 p.

Tessier D., Coquet Y., Lefèvre Y., Bréda N. (2007) – Rôle de la végétation dans les processus de propagation de la sécheresse dans les sols argileux. *Revue Française de Géotechnique* n° 120-121, 4^{ème} trim. 2007, pp. 21-26

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, pp. 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) – 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, ppp. 511-516

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

Cartes géologiques à 1/50 000

Blanalt J. G., von Eller J. P., Fluck P., Geffroy J., Hirlemann G., Jehl M., Bonnet C., Schreiner J., Sittler C., Schwoerer P., Tricart J., Hirth C., Weil R. (1972) - Notice explicative, feuille Colmar/Artolsheim (342) - Orléans : BRGM, 55 p. Carte géologique : von Eller J. P., Blanalt J. G., Wolff C. Théobald N., Dellenbach J., Hirlemann G., Rihland M., Kessler P., Tricart J., Hirth C., Wimmnauer W., Hasemann W., Schreiner A., Vogt H. (1972)

Blanalt J.G., Eller J.P. von, Fluck P., Geffroy J., Jeannette D., Ruhland M., Schwoerer P.,Thévenin A., Stieber A., Vogt H. (1970) - Notice explicative, feuille Sélestat - Champ du feu - Schlossberg (307). Orléans : BRGM, 47p. Carte géologique : Von Eller J. P., Jacquet P., Kern B., Hildwein G., Laubacher G., Hameurt J., Schirardin J., Blanat J.-G., Hirlemann G., Tricart J., Vogt H., Hirth C., Ham P. (1970)

Blanalt J.G., Sittler C., Cloots A.R., Geissert F., Thevenin A., Schwoerer P., Valentin J., Chalumeau G., Rinck G. et Ringot B. (1971) - Notice explicative, carte géol. (1/50 000) feuille Strasbourg (272). Orléans : BRGM, 37p. Carte géologique :Maire G., Cloots A. R., Dubois G., Blanalt J. G. (1971)

Goguel J., Guillaume M., Guillaume L (1959) - Notice explicative, France (1/50 000), feuille Sarre-Union (196). Orléans : BRGM, 6 p. Carte géologique :Goguel J., Guillaume M., Guillaume L., Lemoine M. (1959)

Guillaume M., Limasset J.C. (1967) - Notice explicative, feuille Sarreguemines (166). Orléans : BRGM, 12 p. Carte géologique : Goguel J., Blanalt J.G., Van Werveke L., Meyer G, Schumacher E., Klinkhammer B., Heintzmann G., Théobald N., Legagneur G.

Maire G., Cloots A.R., Blanalt J.G., Sittler C., Geissert F., Hummel P., Thévenin A., Stieber A., Schwoerer P. (1972) - Notice explicative, feuille Brumath /Drusenheim (234). Orléans : BRGM, 31 p. Carte géologique : Maire G., Cloots A.R., Maitre C., Otrowski V., Wilsdorf P., Blanalt J. G., Fauler W., Vogt H. (1972)

Ménillet F., Boudot J.-P., Geissert F., Leiber J., Schwoerer P. (1986). Notice explicative, feuille Benfeld (308). Orléans : BRGM, 74p. Carte géologique : Boudot J.-P., Geissert F., Ménillet F., Leiber J. (1986)

Ménillet F., Coulombeau C., Konrad H.J., Schwoerer P. (1989) – Notice explicative, feuille Lembach (168). Orléans : BRGM, 91 p. Carte géologique : Ménillet F., Benecke E.W., Schumacher E., Van Werveke L., Leppia A., Thürach H., Konrad H.J., Illies H., Rinck G., Schwoerer P. (1989)

Ménillet F., Durand M., Von Eller J.P., Juteau T., Hollinger J., Maïaux C., Lougnon J. (1978) - Notice explicative, feuille Cirey-sur-Vézouze (270). Orléans : BRGM, 48 p. Carte géologique Ménillet F., Durand M., Clermonté J., Bücking ., Hollinger J., Von Eller J.P., Juteau T., Champetier Y., Fauvel J. P., Haguenauer B. Clermonté J., (1978)

Menillet F., Geissert F., Boudot J.-P., Thévenin A., Schwoerer P. (1976) - Notice explicative, feuille Wissembourg/Seltz (169-199). Orléans : BRGM, 59 p. Carte géologique : Menillet F., Geissert F., Vogt H., Thévenin A. (1976)

Ménillet F., Théobald N., Cavelier C., Geissert F., Boudot J.P., Thévenin A.G., Dillmann F., Schwoerer P., Blumenroeder J., Sittler Cl. (1970) - Notice explicative, feuille Haguenau (198). Orléans : BRGM, 48 p. Carte géologique : Simler L., Both J., Daum J.R., Dubois G., Van Werveke L. (1970)

Menillet F., Théobald N., Lillié F., Boudot J.P., Thévenin A., Schwoerer P., Lougnon J. (1975) - Notice explicative, feuille Molsheim (271). Orléans : BRGM, 82 p. Carte géologique : Théobald N., Blanalt J.G., Van Eller J.P., Lillié F., Juteau T., Mihara S., Schirardin J., Van Werveke L., Schumacher E., Bücking H., Steur A., Vogt H., Maire G., Rinck G. (1975)

Menillet F., Vogt H., Boudot J. P., Hoff M., Geissert F., Schwoerer P., Lougnon J. (1979) - Notice explicative, feuille Saverne (233). Orléans : BRGM, 61 p. Carte géologique : Menillet F., Vogt H., Letterman M., Rinck G., Sittler C., Schumacher E., Bücking H., Weigand B., Dubois G., Jund J., Fourquoire J., Humbert J. (1979)

Menillet F., Vogt H., Boudot J.P., Petry F., Thévenin A., Geissert F., Schwoerer P. (1979) - Notice explicative, feuille Bouxwiller (197). Orléans : BRGM, 59 p. Carte géologique : Menillet F., Vogt H., Reichelt R., Schumacher E., Van Werveke L., Haug E., Bücking H., Gross J.J., Schirardin J., Thévenin A., Pétry F. (1979)

Théobald N., Perriaux J., Langenfeld F., Both J. (1967) - Notice explicative, feuille Bitche / Walschbronn (167). Orléans : BRGM, 12 p. Carte géologique : Goguel J., Blanalt J.G., Théobald N., Schumacher E., Van Werveke L., Guillaume L., (1967)

Von Eller J.P., Ménillet F., Hollinger J., Guillaume Ch., Billoret R., Fluck P., Maïaux C. (1975) - Notice explicative, feuille St-Dié (306). Orléans : BRGM, 45p. Carte géologique : Von Eller J.-P., Hameurt J., Juteau T., Fluck P., Hollinger J., Tricart J., Rolland A., Cloots A. R., Trautmann J., Billoret B., Guillaume Ch., Pfeiffer B., Blanat J.G. (1975)

Référence des sources de données minéralogiques

BLANCK J.P. and WACQUANT J.P. Contribution à l'étude des formations loessiques d'Eguisheim (Sud-Ouest de Colmar, Haut-Rhin, France). 1971. Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr., 24, 2-3, p57-91, Strasbourg, 1971

CAMEZ T. and ROTH C. Evolution des minéraux argileux des lehms des environs de Strasbourg. 1957. Bull. Serv. Carte Géol. Als-Lorr., t10, fasc2, Strasbourg, 1957

Carte géologique de Bouxwiller, notice, n°197

Carte géologique de Lembach, notice, n°168.

Carte géologique de Saverne, notice, n° 233.

Carte géologique de Sélestat, notice, n°307

Carte géologique de Sélestat, notice, n°307

Carte géologique de Seltz, notice, n°199.

DEMDAMI L. 1981, Essai de caractérisation géotechnique des formations superficielles et des sols du Sundgau, Thèse, INRA

DOEBL F., MULLER C., SCHULER M., SITTLER C., and WEILER H. Les mernes à foraminifères et les schistes à poisson de Bremmelbach (Bas Rhin), études sédimentologiques et micropaléontologiques. Reconstitution du milieu au début du Rupélien dans le fossé rhénan. 1976. Sci. Géol., Bull, 29, 4, p285-320, Strasbourg, 1976.

FREDERIC C., 1997. Les formations Superficielles de la région de Strasbourg : Annexes, ULP.

GALL J,C, 1971 Faunes et paysages du grès à Voltzia du Nord des Vosges, Mémoire de l'université de Strasbourg, 318p,

GAMERMANN N. Contribution de la diagénèse des Grès : couleur rouge, argile authigène et induration. Formations d'Estrada Nova De Rosario do Sul et de Butocatu (Brésil), et du Buntsandstein des Vosges (France). Sc. Géol. Mémoire n°59, 1979

LUCAS J. et SITTLER C. Etude préliminaire et de reconnaissance de gisements d'argile en Alsace, Rapport BRGM ALS/0508 pour Dow Chemical France.

MENILLET F. Carte géologique de Haguenau notice, n°198, publication en cours.

MILLOT G., CAMEZ T., and WERNERT P. Evolution des minéraux argileux dans les loess et les lehms d'Achenheim (Alsace). 1957. Bull. SErv.Carte Géol. Als.-Lorr., t 10, fasc.2, Strasbourg, 1957

NUSS M-L. Recherches sur quelques schistes des Vosges et leur transformation au voisinage des massifs granitiques. 1954. Bulletin de service de la carte géologique d'Alsace-Lorraine, 7, p 85-98

RIEHL A. Etude des alluvions des cours d'eau de la Bruche , la Doller, la Fecht, l'Ill et la Thur, 2007, mémoire de Master1, Université F.Rabelais, TOURS (37)

SHAAF-RAETH O. 1979, Sédimentologie des loess et alluvions quaternaires du Hangenbieten et Achenheim, (Alsace, France), thèse.

SITTLER C. 1965. Le paléogène des fossés rhénan et rhodanien-Etudes sédimentologiques et paléoclimatiques. Mémoire du service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine N°24.

TARDY Y. and GAC J.Y. Minéraux argileux et Vermiculite -Al dans quelques sols et arènes des Vosges. Hypothèse sur la néoformation des minéraux a 14A°. 1968. Bull. Serv. Carte Geol. Als Lorr., 21, 4, p285-304, Strasbourg, 1968

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).

Annexe 2 : Sinistres recensés dans le cadre de l'étude

Commune	Id	X_Le2	Y_Le2	n°	année
ALBE	67003_A_112	968993,82	2384752,07	24	-
	67004_A_195	968979,15	2384746,8	24	-
BARR	67021_A_108	976929,33	2390577,13	14	-
	67021_A_109	977710,45	2390999,31	15	-
	67021_A_110	977459,32	2390875,01	12	-
	67021_A_135	978387,89	2390806,73	4	-
	67021_A_136	979233,63	2390187,03	10	-
	67021_A_137	979249,9	2391223,87	2	-
	67021_A_152	979262,5	2391235,32	2	-
	67021_A_158	978385,03	2390481,01	7	-
	67021_A_159	978692,98	2390580	4	-
	67021_A_160	978297,5	2390669,25	4	-
	67021_A_161	978303,23	2390717,71	2	-
	67021_A_162	978297,5	2390706,37	2	-
	67021_A_163	978280,43	2390694,91	2	-
	67021_A_164	978508,53	2390525,69	4	-
	67021_A_165	978454,8	2391328,47	2	-
	67021_A_205	978179,38	2390682,54	4	-
	67021_A_215	977600,35	2390917,74	16	-
67021_A_217	979723,98	2390788,05	5	-	
67021_A_218	978787,04	2390428,88	4	-	
BERNARDVILLER	67032_A_001	975215,63	2386826,42	24	-
	67032_A_002	975220,79	2386854,95	24	-
BISCHHEIM	67447_A_127	998950,34	2415197,91	5	2005
BOUXWILLER	67061_A_003	974267,01	2436220,81	20	2003
	67061_A_004	974789,56	2435771,59	20	2003
	67061_A_005	977287,36	2438387,28	14	2003
	67061_A_111	974446,08	2436130,41	20	-
67061_A_207	977436,87	2438212,79	6	-	
BUST	67071_A_209	959891,66	2436782,65	20	-
CHATENOIS	67073_A_006	975816,77	2375732,17	2	2004
CLEEBOURG	67074_A_007	1006517,52	2459382,45	11	-
DAMBACH	67083_A_219	986416,44	2461100,16	1	-
DIEMERINGEN	67095_A_008	955194,17	2449285,16	23	2005
	67095_A_009	956066,14	2449231,55	23	2006
	67095_A_010	955732,18	2448952,35	20	2006
	67095_A_011	955332,8	2448924,05	3	2006
	67095_A_138	955696,2	2448858,17	20	-
DOSENHEIM-SUR-ZINSEL	67103_A_227	972084,16	2435433,16	2	2003
	67103_A_228	972300,58	2435249,5	21	1995
	67103_A_229	972379,97	2435127,84	21	1998
	67103_A_230	971688,33	2435034,23	3	1998
DUNTZENHEIM	67107_A_012	982424,22	2425401,97	6	1997
DURNINGEN	67109_A_013	985517,77	2421761,48	6	1986
	67109_A_014	984844,8	2421991,42	6	2003
	67109_A_015	984759,56	2421977,21	6	2003
	67109_A_016	985563,25	2422238,54	6	2003
	67109_A_017	984946,99	2422298,11	6	2003
DURRENBACH	67110_A_258	997234,93	2447541,56	3	2008
	67110_A_259	997588,82	2447394,11	3	2008
ECKBOLSHEIM	67118_A_220	994243	2411880,04	5	-
ELSENHEIM	67121_A_018	983814,61	2363977,09	2	2007
ENTZHEIM	67124_A_221	991508,16	2406054,74	3	-
ESCHBACH	67132_A_200	995652,06	2444027,66	6	-
	67132_A_201	995734,55	2444096,98	6	-
	67132_A_202	995751,39	2444106,37	6	-
	67132_A_203	995758,84	2444140,17	6	-
FLEXBOURG	67139_A_184	975950,13	2409241,89	3	-
	67139_A_185	975964,33	2409247,39	3	-
	67139_A_186	975885,51	2409158,71	3	-
	67139_A_187	975875,66	2409176,24	3	-
	67139_A_188	975892,15	2409169,71	3	-
	67139_A_189	975880,12	2409188,27	3	-
	67139_A_190	975885,51	2409269,27	3	-
67139_A_191	975875,66	2409245,1	3	-	

Cartographie de l'aléa retrait-gonflement du Bas-Rhin

Commune	Id	X_Le2	Y_Le2	n°	année
FROESCHWILLER	67147_A_019	994232,11	2452155,31	19	2003
	67147_A_020	994472,82	2452122,88	19	2003
	67147_A_021	994578,68	2452138,24	19	2003
GOERSDORF	67160_A_257	997763,31	2453106,79	22	2003
GOUGENHEIM	67163_A_022	984697,24	2423852,68	19	2007
	67163_A_023	984669,74	2423891,17	19	2007
	67163_A_024	984820,97	2424469,97	6	2007
GRIESHEIM-SUR-SOUFFEL	67173_A_025	992837,71	2417434,95	6	2003
GUNDERSHOFFEN	67176_A_096	990370,73	2447894,66	18	2005
	67176_A_097	989494,29	2447389,99	3	2004
	67176_A_139	990405,56	2447914,02	18	-
	67176_A_153	990268,65	2447357,91	3	-
	67176_A_211	989955,08	2448269,64	3	-
	67176_A_222	989468,17	2447417,14	3	-
	67176_A_223	990400,98	2448038,1	18	-
67176_A_224	990397,31	2446468,98	3	-	
GUNSTETT	67177_A_114	997837,32	2448995,31	11	-
HAGUENAU	67180_A_098	999558,58	2437303,01	9	1991
HANGENBIETEN	67182_A_113	989300,44	2408462,03	6	-
HARSKIRCHEN	67183_A_140	944406,27	2447681,45	3	-
HEILIGENSTEIN	67189_A_026	978357,42	2392828,15	2	-
	67189_A_027	978374,49	2392578,17	16	-
	67189_A_028	978533,51	2392867,91	4	-
	67189_A_029	978187,05	2392836,63	10	-
	67189_A_030	978246,74	2393188,81	15	-
HERBITZHEIM	67191_A_196	947421,8	2456718,53	21	-
HIRSCHLAND	67201_A_120	950653,4	2437594,24	22	2003
	67201_A_121	950480,18	2439048,68	21	2003
	67201_A_122	951304,95	2435999,58	22	2003
HOHENGOEFT	67208_A_197	978452,85	2419255,09	4	-
KEFFENACH	67232_A_231	1005885,22	2455058,33	11	2003
KESKASTEL	67234_A_141	944606,99	2451484,06	3	-
KIENHEIM	67236_A_031	985910,39	2423280,07	6	2003
	67236_A_032	985940,29	2423390,4	6	2003
	67236_A_033	985982,68	2423409,19	6	2003
	67236_A_034	986129,67	2423429,24	6	2003
	67236_A_035	986056,69	2423401,86	6	2003
	67236_A_036	986072,5	2423361,76	6	2003
	67236_A_037	986001,59	2423374,7	6	2003
	67236_A_038	986243,78	2423411,02	6	2003
	67236_A_039	986198,18	2423349,38	6	2003
	67236_A_099	986132,88	2423454,9	6	1993
	67236_A_198	986238,28	2423477,01	6	-
KLEINGOEFT	67244_A_040	975891,69	2422434,91	6	1980
KOLBSHEIM	67247_A_041	987603,01	2408339,67	10	1983
	67247_A_042	987419,47	2408500,75	10	1990
	67247_A_043	987503,22	2408442,78	10	1990
LAMPERTSLOCH	67257_A_044	1001191,62	2453918,39	6	2007
	67257_A_166	1002558,07	2452613,58	11	-
LANDERSHEIM	67258_A_045	979342,7	2422553,71	6	2005
	67258_A_046	979863,75	2422673,09	6	2005
MACKWILLER	67278_A_047	954725,13	2447501,46	20	2003
MARLENHEIM	67282_A_100	980012,8	2415358,65	20	2005
	67282_A_101	980133,56	2415311,79	20	1993
MARMOUTIER	67283_A_048	970646,45	2422736,45	6	2003
MELSHEIM	67287_A_102	981421,98	2430169,24	18	2006
	67287_A_103	981385,09	2430102,1	4	2006
	67287_A_104	981475,71	2430085,26	18	2006
	67287_A_142	981510,77	2430078,39	18	-
	67287_A_143	981460,13	2430184,82	18	-
	67287_A_144	981467,12	2430094,08	18	-
	67287_A_145	981067,85	2430324,25	6	-
	67287_A_146	981060,86	2430320,81	6	-
	67287_A_214	981446,73	2430118,72	18	-
	67287_A_216	981426,56	2430212,66	18	-
	67287_A_232	981486,94	2430113,33	18	-
67287_A_233	981441,57	2430236,38	18	-	

Commune	Id	X Le2	Y Le2	n°	année
MIETESHEIM	67292_A_049	988717,87	2444278,91	6	2003
MOLSHEIM	67300_A_105	979607,81	2405672,77	21	1990
	67300_A_234	980181,44	2405804,06	3	-
MOMMENHEIM	67301_A_050	989658,01	2430864,55	3	2004
	67301_A_235	990637,67	2430618,57	2	-
MONSWILLER	67302_A_051	970530,74	2428547,54	3	2004
	67302_A_052	971035,64	2428913,12	2	2004
MULHAUSEN	67307_A_053	982478,06	2444267,11	3	-
MUNDOLSHEIM	67309_A_054	995914,08	2417677,61	5	2003
	67309_A_055	995896,66	2418187,66	5	2003
	67309_A_056	995914,08	2418194,65	5	2003
	67309_A_057	995914,08	2418170,13	5	2003
	67309_A_058	995931,61	2418240,02	5	2003
67309_A_059	996203,93	2418114,22	6	2003	
NEUGARTHEIM-ITTLLENHEIM	67228_A_155	983631,64	2419269,29	11	-
NIEDERHASLACH	67325_A_208	969830,96	2405233,75	3	-
NORDHEIM	67335_A_156	980949,62	2416562,87	15	1986
OBERBRONN	67340_A_236	986558,16	2451538,94	23	-
OBERLAUTERBACH	67346_A_060	1019864,28	2454329,57	5	-
	67346_A_061	1019664,59	2454346,52	5	-
OBERSCHAEFFOLSHEIM	67350_A_237	992253,65	2412029,55	5	-
OHLUNGEN	67359_A_062	994052,81	2437077,2	6	2003
	67359_A_063	994088,79	2437058,64	6	2003
OTTERSTHAL	67366_A_064	968715,31	2428944,86	22	2003
PFÄFFENHOFFEN	67372_A_213	986899,8	2440064,2	15	-
PFULGRIESHEIM	67375_A_192	992695,07	2417946,73	6	2003
	67375_A_193	992795,89	2418223,41	6	2003
	67375_A_194	993034,88	2418612,59	6	2003
RATZWILLER	67385_A_065	959122,8	2450732,15	20	1989
REICHSHOFFEN	67388_A_238	989827,8	2450653,33	3	-
	67388_A_239	989404,01	2449317,36	20	-
ROESCHWOOG	67405_A_240	1017722,9	2441267,96	3	-
ROTHBACH	67415_A_066	980761,39	2446702,47	21	-
	67415_A_067	980766,88	2446687,58	21	-
	67415_A_068	980773,87	2446673,37	21	-
	67415_A_069	980757,95	2446722,86	21	-
	67415_A_070	980752,79	2446750,59	21	-
	67415_A_071	980772,5	2446748,75	21	-
	67415_A_167	980823,71	2446678,98	20	-
	67415_A_168	980805,26	2446691,81	21	-
	67415_A_169	980795,41	2446697,54	21	-
	67415_A_170	980779,6	2446698,92	21	-
	67415_A_171	980829,44	2446859,66	22	-
	67415_A_172	980796,67	2446852,55	22	-
	67415_A_173	980771,12	2446846,94	22	-
	67415_A_174	980837,92	2446824,14	21	-
	67415_A_175	980839,41	2446768,69	21	-
	67415_A_176	980843,65	2446797,1	21	-
	67415_A_177	980803,78	2446795,73	21	-
	67415_A_178	980725,53	2446812,8	22	-
	67415_A_179	980741,22	2446775,79	21	-
	67415_A_180	980734,12	2446855,42	22	-
67415_A_181	980745,46	2446889,56	22	-	
67415_A_182	980759,67	2446673,37	21	-	
67415_A_183	980754,05	2446688,95	21	-	
SAINT-NABOR	67428_A_251	976194,5	2395222,84	2	-
SARRE-UNION	67434_A_072	948706,1	2448827,92	7	2006
	67434_A_073	948333,64	2448337	22	2006
	67434_A_074	948574,69	2448738,68	7	2005
	67434_A_075	948409,48	2448578,51	22	2005
	67434_A_076	947265,76	2448867,57	21	2005
	67434_A_077	948345,44	2448190,13	7	2005
	67434_A_148	947493,63	2448218,77	3	-
	67434_A_149	947435,78	2448081,86	22	-
67434_A_157	948710,57	2448171,91	22	2005	
SARREWERDEN	67435_A_199	947313,19	2444262,98	22	2005

Commune	Id	X Le2	Y Le2	n°	année
SAVERNE	67437_A_106	969664,38	2428166,72	20	2001
	67437_A_107	969659,57	2428399,52	20	2003
	67437_A_150	970576,45	2426675,62	2	-
	67437_A_210	969504,1	2428363,31	20	-
	67437_A_241	969339,01	2427204,92	2	-
	67437_A_242	969906,69	2426800,15	2	-
	67437_A_243	968684,26	2426675,28	2	-
SCHILTIGHEIM	67447_A_128	998836,35	2415204,44	5	2005
	67447_A_129	998571,93	2414089,13	5	2005
	67447_A_130	997905,95	2414748,35	5	2007
	67447_A_244	999402,54	2415007,84	3	-
SCHLEITHAL	67451_A_151	1017639,27	2458856,02	6	-
SCHNERSHEIM	67452_A_125	984141,35	2421097,1	20	2003
	67452_A_126	984105,61	2420901,88	21	2003
SCHWEIGHOUSE-SUR-MODER	67458_A_245	995311,45	2438058,7	11	-
SEEBACH	67351_A_078	1013861,98	2455197,3	6	2004
	67351_A_079	1013836,09	2455267,08	6	2004
	67351_A_080	1013761,05	2455489,56	5	2004
	67351_A_081	1013691,28	2456348,02	6	2004
SELESTAT	67462_A_246	978576,81	2373746,26	2	-
	67462_A_247	978603,28	2373776,5	2	-
SIEWILLER	67467_A_082	956852,42	2439095,54	7	2003
SOUFFLENHEIM	67472_A_248	1013060,47	2439152,48	3	-
SOULTZ-SOUS-FORETS	67474_A_131	1005950,07	2451534,12	6	-
	67474_A_132	1006363,88	2452202,51	4	-
	67474_A_133	1006215,29	2452380,55	11	-
	67474_A_134	1006317,94	2451809,77	4	-
	67474_A_212	1006959,18	2451323,43	6	-
	67474_A_249	1006486,93	2451478,33	11	-
	67474_A_250	1006365,83	2451815,04	4	-
STEINBOURG	67478_A_083	973407,87	2431084,75	6	-
	67478_A_084	972900	2431564,79	2	-
	67478_A_085	972802,04	2431371,51	2	-
	67478_A_086	973455,99	2431011,77	6	-
	67478_A_087	973370,98	2431070,66	6	-
	67478_A_088	973135,55	2430804,75	3	-
	67478_A_089	973139,9	2430793,75	3	-
STEINSELTZ	67479_A_090	1009255,11	2460967,15	11	-
	67479_A_091	1009972,19	2460475,2	11	1980
STRASBOURG	67482_A_252	997381,57	2413285,89	5	-
STUTZHEIM-OFFENHEIM	67485_A_253	988677,42	2416922,72	6	-
TRUCHTERSHEIM	67495_A_092	987862,85	2420513,61	6	2006
	67495_A_147	987955,99	2420250,22	6	-
	67495_A_225	988153,28	2419588,48	6	-
UBERACH	67496_A_206	988117,3	2441249,75	4	-
WEITERSWILLER	67524_A_093	972255,55	2440029,6	22	-
WESTHOFFEN	67525_A_204	976101,7	2413092,16	20	-
WISSEMBOURG	67544_A_094	1010158,47	2463362,07	3	-
	67544_A_123	1010139	2463644,02	3	-
	67544_A_124	1009598,58	2463249,45	11	-
WOERTH	67550_A_154	995758,38	2451239,8	21	-
	67550_A_254	995954,86	2451183,2	21	-
WOLFISHEIM	67551_A_226	992985,85	2411585,94	5	-
ZINSWILLER	67558_A_095	984787,17	2448525,01	18	2000

Annexe 3 : Listes des bureaux d'étude et assurances ayant contribué à l'étude

Fondasol
1 rue Evariste Galois
67201 ECKBOLSHEIM

CETE
LRPC Alsace
11 rue Jean Mentelin
67200 STRASBOURG

Geotec
9 rue Manurhin
68120 RICHWILLER

Uretek Grand-Est
12 rueEglise
68280 SUNDHOFFEN

ANTEA
15 rue Tanin
BP 12
LINGOLSHEIM Cedex 67834

Arcadis Esg
95 rue Boecklin
67000 STRASBOURG

SNCF direction de Strasbourg
Pole ingénierie –Groupe ouvrage d'art
3 bd du président Wilson
67000 STRASBOURG

Coordonnées de l'Union Syndicale de Géotechnique

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

Annexe 4 : Résultats des analyses minéralogiques réalisées dans le cadre de cette étude

N° SOND	X_Le2	Y_Le2	K	I	Chl	Ver	Sm +Inter	lithologie	fines_%	code harmo	Formation argileuse	n°
1	980857,51	2446819,1	6	20	0	0	74	argile grise	79,25	180	Calcaires du Muschelkalk supérieur	22
2	980908,38	2446881,65	3	24	0	0	73	argile grasse	73,14	184	Calcaires du Muschelkalk supérieur	22
4	994603,65	2452021,26	24	17	0	0	59	argile limoneuse	76,79	163	Marnes et calcaires du Lias	19
5	1006345,9	2451326,18	39	9	0	0	52	argile brun rouge compacte et lisse	92,88	106	Série grise et Couches de Pêchebron (Rupélien)	11
6	994774,25	2437733,1	40	8	0	0	52	limon	36,17	99	Série grise et Couches de Pêchebron (Rupélien)	11
7	959959,6	2436766,72	0	82	0	18	0	limon brun clair	71,06	196	Argiles du Trias	20
8	956948,43	2439187,07	16	47	0	0	37	limon	95,38	82	Limons des plateaux et altérites	7
9	947658,49	2444220,48	4	54	0	0	42	argile, élément calcaires	75,71	184	Calcaires du Muschelkalk supérieur	22
10	956167,65	2449208,52	0	91	0	9	9	limons, éléments grossiers	47,31	193	Calcaires du Muschelkalk inférieur	23
11	959288,24	2450812,01	0	94	0	6	0	argile limoneuse	87,92	196	Argiles du Trias	20
12	981606,55	2430032,22	66	10	0	0	24	limon	85,8	159	Argiles du Lias	18
13	981372,72	2430455,43	50	26	0	0	24	argile limoneuse	96,2	61	Alluvions et colluvions fines	4
15	995603,48	2419072,58	29	47	0	0	24	limons	95,08	47	Loess récents	5
16	984249,39	2423862,65	37	16	0	0	47	argile grise	82,21	163	Marnes et calcaires du Lias	19
17	985841,76	2423368,86	26	12	0	0	62	limon ocre	93,79	58	Loess anciens	6
18	986238,86	2423197,35	47	10	0	0	43	argile grise foncée	95,5	58	Loess anciens	6
19	987705,2	2408322,72	14	21	0	0	65	limon argileux brun clair	89,69	92	Marno-calcaires et grès du Paléogène	10
20	976016,23	2409361,27	1	20	0	0	79	argile grasse	99,33	62	Alluvions et colluvions mixtes	3
21	978442,77	2392570,61	46	25	0	0	29	argile limoneuse	83,52	144	Marnes et calcaires du Dogger	16
22	977921,49	2392824,15	63	12	0	0	25	argile compacte	83,26	144	Marnes et calcaires du Dogger	16
23	977278,19	2390904,34	34	46	0	0	20	argile, éléments grossiers	49,88	112	Molasse alsacienne et Conglomérats côtiers (Oligocène-Éocène)	12
24	977036,11	2390570,72	52	7	0	0	41	argile limoneuses éléments calcaires	65,63	133	Argiles du Dogger et du Malm	14
25	978046,71	2390629,72	37	10	0	0	53	limons, éléments grossiers calcaires	56,17	145	Calcaires marneux du Dogger	17
26	970595,36	2364983,57	56	11	0	0	33	argile plastique	88,43	163	Marnes et calcaires du Lias	19
27	970905,49	2364983,11	63	10	0	0	27	argile très plastique	92,58	154	Argiles du Lias	18
28	979365,15	2310877,02	18	18	0	0	64	argile limoneuse	99,71	46	Loess récents	5
29	975479,02	2288259,46	48	44	0	0	8	argile limoneuse	87,6	134	Argiles du Dogger et du Malm	14
30	957146,51	2312914,26	10	8	0	0	82	argile limoneuse, qlq éléments grossiers	94,35	888	Alluvions et colluvions fines	4

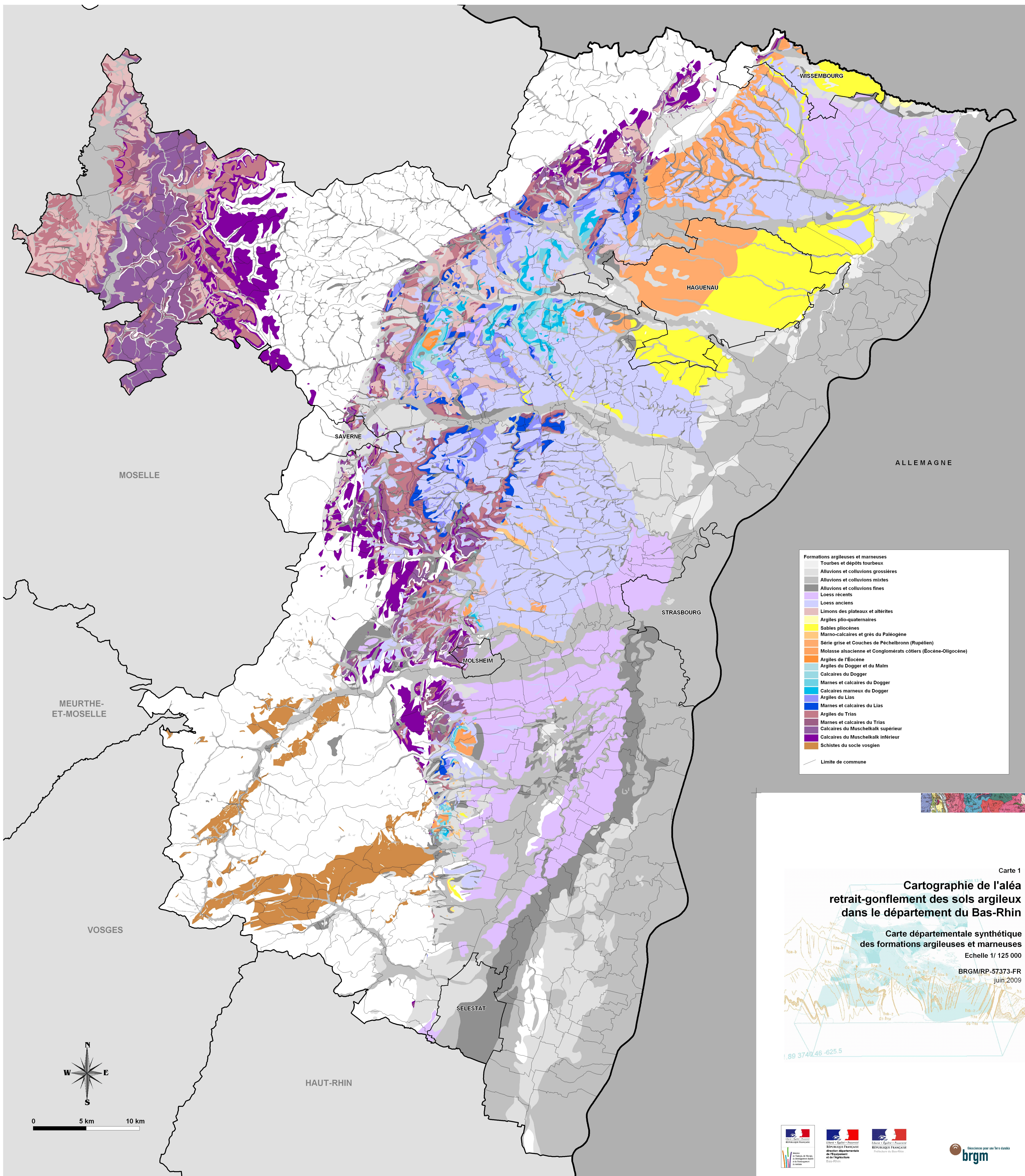


Géosciences pour une Terre durable

brgm

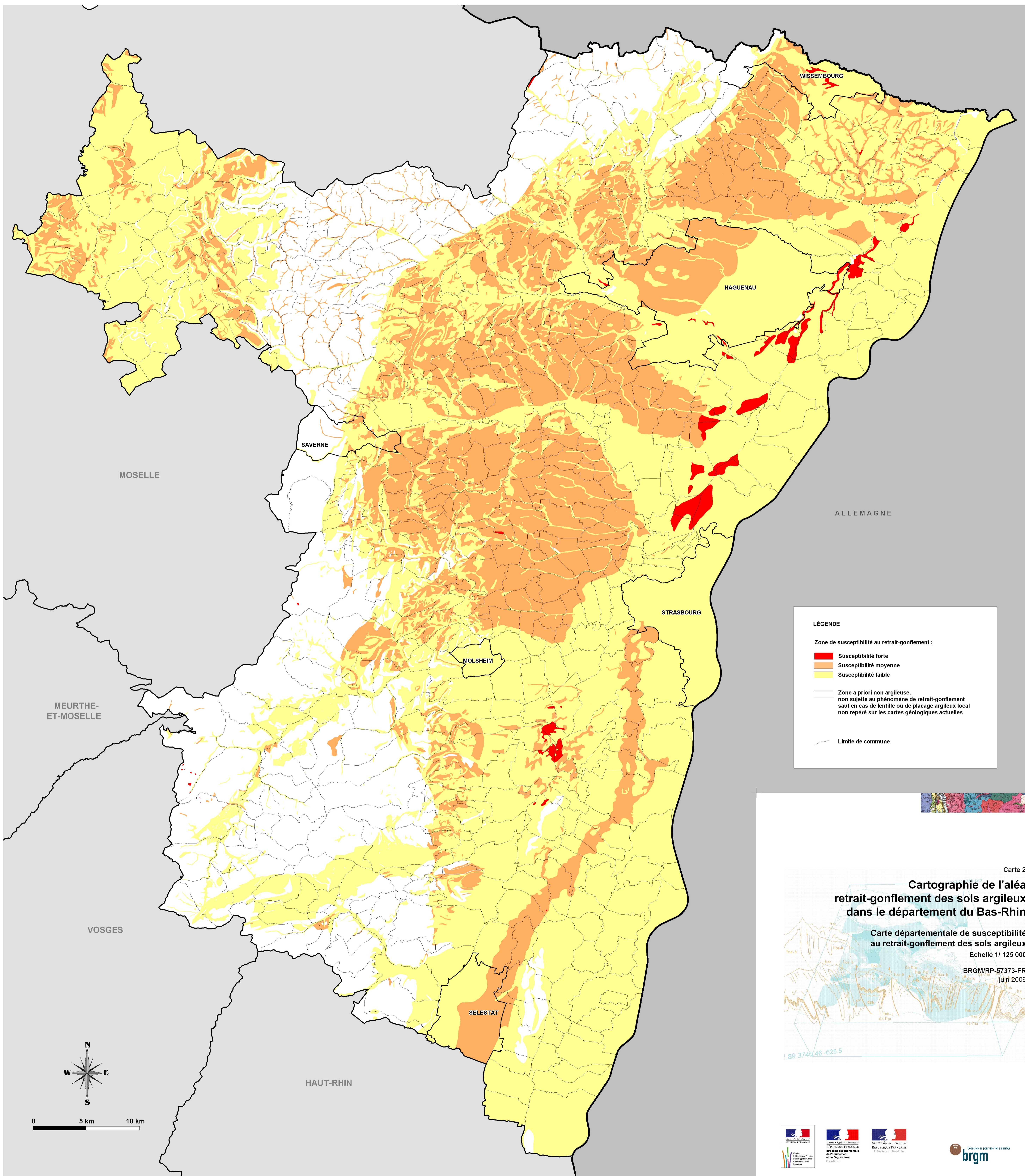
Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Alsace
15 rue du tanin
B117
67 384 – Tanneries - France
Tél. : 03 88 77 48 90



- Formations argileuses et marneuses**
- Tourbes et dépôts tourbeux
 - Alluvions et colluvions grossières
 - Alluvions et colluvions mixtes
 - Alluvions et colluvions fines
 - Loess récents
 - Loess anciens
 - Limons des plateaux et altérites
 - Argiles plio-quaternaires
 - Sables pliocènes
 - Marno-calcaires et grès du Paléogène
 - Série grise et Couches de Pechelbronn (Rupélien)
 - Molasse alsacienne et Conglomérats côtiers (Éocène-Oligocène)
 - Argiles de l'Éocène
 - Argiles du Dogger et du Malm
 - Calcaires du Dogger
 - Marnes et calcaires du Dogger
 - Calcaires marneux du Dogger
 - Argiles du Lias
 - Marnes et calcaires du Lias
 - Argiles du Trias
 - Marnes et calcaires du Trias
 - Calcaires du Muschelkalk supérieur
 - Calcaires du Muschelkalk inférieur
 - Schistes du socle vosgien
- Limite de commune

Carte 1
**Cartographie de l'aléa
 retrait-gonflement des sols argileux
 dans le département du Bas-Rhin**
 Carte départementale synthétique
 des formations argileuses et marneuses
 Echelle 1/ 125 000
 BRGM/RP-57373-FR
 juin 2009
 1.89 3740.46 -625.5



LÉGENDE

Zone de susceptibilité au retrait-gonflement :

- Susceptibilité forte
- 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

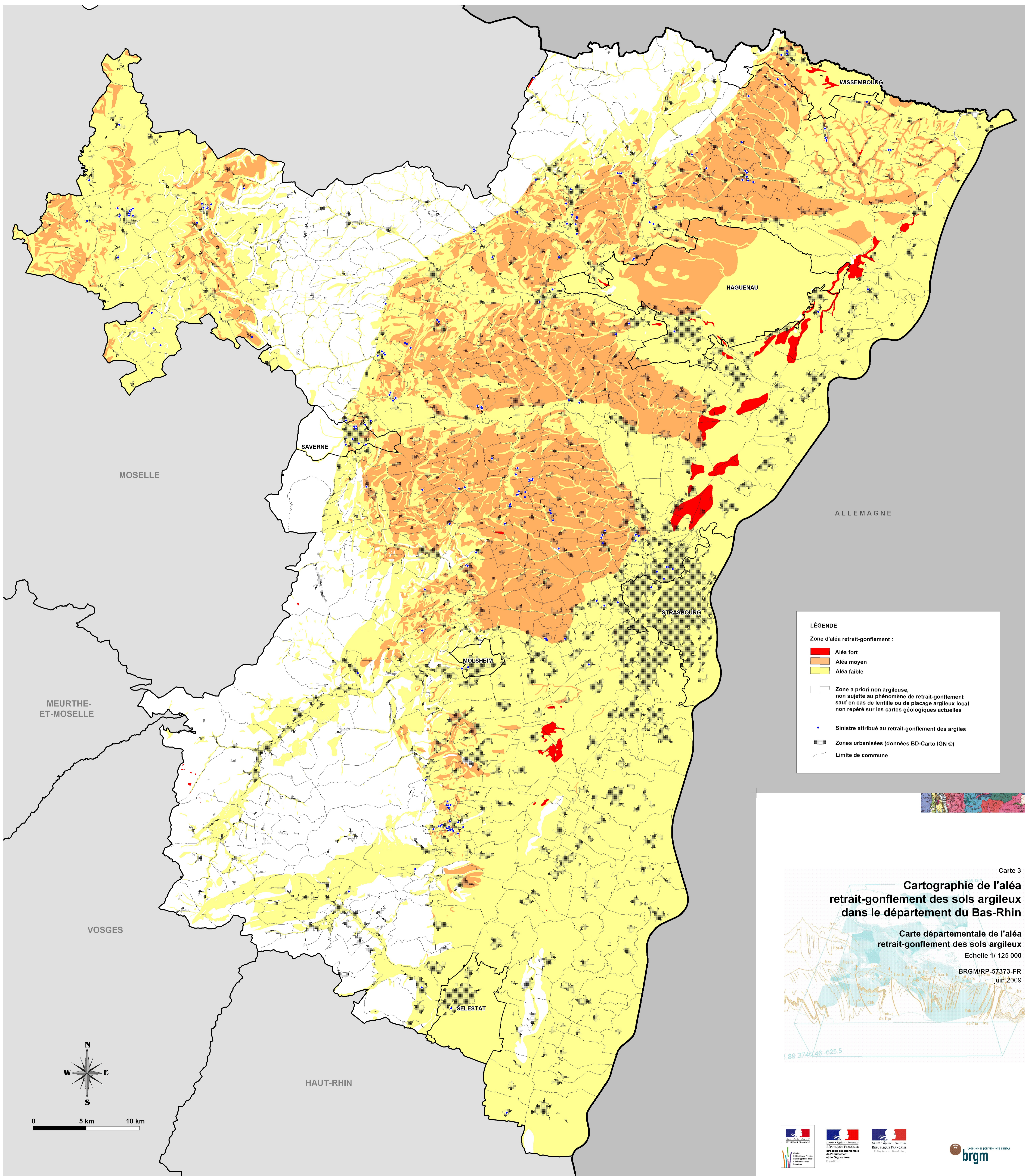
Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Bas-Rhin

Carte départementale de susceptibilité
au retrait-gonflement des sols argileux

Echelle 1/125 000

BRGM/RP-57373-FR
juin 2009

1.89 3740.46 -625.5



LÉGENDE

Zone d'aléa retrait-gonflement :

- Aléa fort
- 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

Zones urbanisées (données BD-Carto IGN ©)

Limite de commune

Carte 3

Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Bas-Rhin

Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux

Echelle 1/ 125 000

BRGM/RP-57373-FR
juin 2009

1.89 3740.46 -625.5