

Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Territoire de Belfort

Rapport final

BRGM/RP-57743-FR

février 2010



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Territoire de Belfort

Rapport final

BRGM/RP-57743-FR
février 2010

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Service public du BRGM 08RISD08

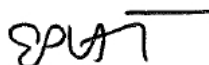
M. Donsimoni
avec la collaboration de
E. Bayle, S. Le Roy

Vérificateur :

Nom : Emmanuelle PLAT

Date : 15 février 2010

Signature :



Approbateur :

Nom : Yves SIMÉON

Date : 22 février 2010

Signature :



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : argiles, marnes, argiles gonflantes, smectites, retrait-gonflement, aléa, risque naturel, sinistre sécheresse, catastrophe naturelle, géotechnique, cartographie, Territoire de Belfort, Franche-Comté.

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

Donsimoni M. avec la collaboration de **Bayle E., Le Roy S.** (2010) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Territoire de Belfort. Rapport BRGM/RP-57743-FR, 121 p., 57 ill., 3 ann., 3 cartes h.-t, 1 CD-Rom.

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 dernièrement au cours de l'été 2003.

Le Territoire de Belfort fait partie des départements français touchés par le phénomène, bien que seulement 9 sinistres imputés à la sécheresse y ont été recensés et localisés dans le cadre de la présente étude. À la date du 29 janvier 2010, 2 communes sur les 102 que compte le département ont été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle pour ce phénomène, pour la période comprise entre le 1^{er} juillet et le 30 septembre 2003, soit un taux de sinistralité de 1,96 %.

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 la Mer (MEEDDM) a demandé au BRGM de réaliser une cartographie de cet aléa à l'échelle de tout le département du Territoire de Belfort, dans le but de définir les zones les plus exposées au phénomène de retrait-gonflement des argiles. 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 à terme l'ensemble du territoire métropolitain.

L'étude a été conduite par le Service géologique régional Bourgogne – Franche-Comté, en collaboration avec le Service des Actions Régionales et 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 fond national de prévention des risques naturels majeurs, dans le cadre d'une convention de cofinancement signée avec la Préfecture du Territoire de Belfort.

La démarche de l'étude a d'abord consisté à établir une cartographie départementale synthétique des formations à dominante argileuse ou marneuse, affleurantes à sub-affleurantes, à partir de la synthèse des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000. Les 16 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 urbanisée, afin de permettre des comparaisons fiables entre les formations.

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

- 28 % ont été classés en aléa moyen ;
- 34 % ont été considérés en aléa faible ;
- 38 % correspondent à des zones *à 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 Territoire de Belfort 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 éventuelle 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 sinistre.

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 lithologique, minéralogique et géotechnique des formations.....	19
2.2.3. Examen des autres facteurs de prédisposition et de déclenchement	20
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	21
3. Présentation du département du Territoire de Belfort	23
3.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE.....	23
3.1.1. Généralités	23
3.1.2. Régions naturelles, relief et hydrographie	24
3.2. CONTEXTE CLIMATIQUE	27
3.2.1. Les vents	27
3.2.2. Les précipitations.....	28
3.2.3. Les températures.....	28
3.2.4. Ensoleillement	29
3.3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL	29
3.3.1. Les formations paléozoïques.....	30
3.3.2. Les formations mésozoïques.....	33
3.3.3. Les formations cénozoïques.....	33
3.4. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	34
4. Identification et cartographie des formations géologiques à composante argilo-marneuse	35

4.1. DOCUMENTS ET MÉTHODOLOGIE UTILISÉS	35
4.1.1. Méthode utilisée	35
4.1.2. Établissement de la carte des formations argileuses au sens large	37
4.2. LITHOSTRATIGRAPHIE DES FORMATIONS ARGILEUSES AU SENS LARGE	37
4.2.1. Formations du Quaternaire	40
(1) – <i>Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel) (Fz)</i>	40
(2) – <i>Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss) (F)</i>	40
(3) – <i>Colluvions de fond de vallons et de versants (C)</i>	42
(4) – <i>Limons des plateaux, lœss, lehms (LP)</i>	42
4.2.2. Formations du Céno-Quaternaire	43
(5) – <i>Argiles résiduelles d'altération (R)</i>	43
4.2.3. Formation du Cénozoïque.....	44
(6) – <i>Série grise du Rupélien (g1a-b)</i>	44
4.2.4. Formations du Crétacé inférieur.....	45
(7) – <i>Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien – Kimméridgien (j5-6)</i>	45
(8) – <i>Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien – Oxfordien (j4-5)</i>	47
(9) – <i>Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur – Bathonien (j2-3)</i>	49
(10) – <i>Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien (l4)</i>	50
4.2.5. Formations du Trias	52
(12) – <i>Marnes et grès micacés, Marnes de Vallois du Rhétien (t7b)</i>	52
(13) – <i>Marnes irisées et dolomies du Keuper (t5-6)</i>	53
4.2.6. Formation du Paléozoïque	57
4.3. REMARQUES SUR LES FORMATIONS NON ARGILEUSES	58
5. Caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique des formations retenues	59
5.1. CRITÈRES DE HIÉRARCHISATION	59
5.1.1. Critères retenus.....	59
5.1.2. Méthode de classification.....	59
5.2. CRITÈRE LITHOLOGIQUE.....	60
5.2.1. Définition du critère lithologique et barème	60
5.2.2. Caractérisation lithologique.....	61
5.3. CRITÈRE MINÉRALOGIQUE	62
5.3.1. Définition du critère minéralogique et barème	62
5.3.2. Caractérisation minéralogique	62

5.4. CRITÈRE GÉOTECHNIQUE	68
5.4.1. Définition du critère géotechnique et barème	68
5.4.2. Teneur en eau (Wn)	69
5.4.3. Indice de plasticité (Ip).....	70
5.4.4. Essais au bleu de méthylène (Vb).....	70
5.4.5. Retrait linéaire (RI).....	71
5.4.6. Coefficient de gonflement (Cg).....	72
5.4.7. Caractérisation géotechnique	72
6. Élaboration de la carte de susceptibilité	75
6.1. DÉTERMINATION DU DEGRÉ DE SUSCEPTIBILITÉ	75
6.2. SYNTHÈSE	75
6.3. CARTE DE SUSCEPTIBILITÉ.....	76
7. Analyse de la sinistralité.....	79
7.1. PROCÉDURE DE DEMANDE DE RECONNAISSANCE DE L'ÉTAT DE CATASTROPHE NATURELLE.....	79
7.2. IDENTIFICATION DES COMMUNES SINISTRÉES	80
7.2.1. Localisation des communes sinistrées	80
7.2.2. Analyse des périodes de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.....	83
7.3. COLLECTE DES DONNÉES DE SINISTRES.....	83
7.4. FRÉQUENCE D'OCCURRENCE RAPPORTÉE A LA SURFACE BATIE.....	87
7.4.1. Détermination de la densité d'urbanisation par formation	87
7.4.2. Détermination du critère densité de sinistres	89
8. Carte d'aléa	95
8.1. DÉTERMINATION DU NIVEAU D'ALÉA.....	95
8.2. CARTE D'ALÉA	97
8.3. COHÉRENCE AVEC LES DEPARTEMENTS LIMITROPHES	99
9. Conclusion	103
10. Bibliographie.....	105

Liste des illustrations

Illustration 1 : Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche	13
Illustration 2 : Localisation du département du Territoire de Belfort.....	23
Illustration 3 : Le département du Territoire de Belfort et ses principales villes	24
Illustration 4 : Relief et hydrographie du département du Territoire de Belfort.....	25
Illustration 5 : Direction d'origine des vents dominants dans le Territoire de Belfort.....	27
Illustration 6 : Moyenne mensuelle des précipitations à Belfort	28
Illustration 8 : Moyenne mensuelle des températures minimales et maximales à Belfort relevée sur la période 1971-2000	28
Illustration 9 : Cartes géologiques à 1/50 000 recoupant le département du Territoire de Belfort (suivant le tableau d'assemblage des cartes géologiques à 1/50 000)	30
Illustration 10 : Le département du Territoire de Belfort dans son contexte géologique régional franc-comtois (extrait de la carte géologique de la France à 1/1 000 000, BRGM, 2003).....	31
Illustration 11 : Liste des 5 cartes géologiques à 1/50 000 qui concernent le département du Territoire de Belfort.....	36
Illustration 12 : Assemblage des 5 cartes géologiques à 1/50 000 qui concernent le département du Territoire de Belfort.....	36
Illustration 13 : Liste des formations argileuses retenues dans le département du Territoire de Belfort.....	38
Illustration 14 : Carte départementale synthétique des formations argileuses du Territoire de Belfort.....	39
Illustration 15 : Répartition départementale des Alluvions récentes localement tourbeuses (Fz).....	40
Illustration 16 : Répartition départementale des Alluvions anciennes (F)	41
Illustration 17 : Répartition départementale des Colluvions de fond de vallons et de versants (C)	42
Illustration 18 : Répartition départementale des Limons des plateaux, loess, lehms (LP).....	43
Illustration 19 : Répartition départementale des Argiles résiduelles d'altération (R).....	44
Illustration 20 : Répartition départementale de la Série grise du Rupélien (g1a-b)	45
Illustration 21 : Répartition départementale des Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien – Kimméridgien (j5-6)	46
Illustration 22 : Répartition départementale des Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien – Oxfordien (j4-5)	48
Illustration 23 : Répartition départementale du Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur– Bathonien (j2-3)	49
Illustration 24 : Répartition départementale des Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien (I4).....	51

Illustration 25 : Répartition départementale des Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias) (I1-3C)	52
Illustration 26 : Répartition départementale des Marnes et grès micacés, Marnes de Vallois du Rhétien (t7b)	53
Illustration 27 : Répartition départementale des Marnes irisées et dolomies du Keuper (t5-6).....	55
Illustration 28 : Répartition départementale des Couches grises et couches rouges du Muschelkalk (t4)	55
Illustration 29 : Répartition départementale des Grès et marnes du Muschelkalk (t3).....	57
Illustration 30 : Répartition départementale des Silts et pélites rouges du Permien (r).....	57
Illustration 31 : Notes attribuées aux formations argileuses en fonction des caractéristiques lithologiques	60
Illustration 32 : Notes lithologiques des 16 formations argileuses retenues.....	61
Illustration 33 : Notes attribuées aux formations argileuses en fonction du pourcentage de minéraux gonflants.....	62
Illustration 34 : Données et notes minéralogiques des 16 formations argileuses retenues	67
Illustration 35 : Notes minéralogiques des 16 formations argileuses retenues	68
Illustration 36 : Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de l'indice de plasticité de la formation.....	70
Illustration 37 : Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la valeur au bleu de méthylène de la formation	71
Illustration 38 : Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du retrait linéaire de la formation.....	71
Illustration 39 : Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du coefficient de gonflement de la formation	72
Illustration 40 : Synthèse des données géotechniques recueillies dans le cadre de cette étude et notes géotechniques	74
Illustration 41 : Barème d'attribution d'un niveau de susceptibilité d'une formation argileuse.....	75
Illustration 42 : Susceptibilité des 16 formations argileuses retenues	75
Illustration 43 : Superficie des formations par niveau de susceptibilité	76
Illustration 44 : Carte de susceptibilité au retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Territoire de Belfort	77
Illustration 45 : Arrêté interministériel de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse (source : www.prim.net, consulté au 29/01/10)	81
Illustration 46 : Communes concernées par des arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse et nombre de sinistres recensés et localisés.....	82
Illustration 47 : Sinistres recensés et localisés	84
Illustration 48 : Répartition géologique des 9 sinistres localisés.....	85

Illustration 49 : Répartition géologique des 9 sinistres localisés	86
Illustration 50 : Carte des zones bâties sur le département du Territoire de Belfort (source des données BD Topo IGN)	88
Illustration 51 : Nombre de sinistres, surface bâtie et taux d'urbanisation par formation géologique	89
Illustration 52 : Densité de sinistres et notes de sinistralité	90
Illustration 53 : Densité de sinistres et notes de sinistralité à partir des départements limitrophes	92
Illustration 54 : Niveau d'aléa des formations argileuses	96
Illustration 55 : Classement des formations en fonction de leur niveau d'aléa	97
Illustration 56 : Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement du Territoire de Belfort	98
Illustration 57 : Comparaison des niveaux d'aléa des quatre départements limitrophes (25, 70, 90, 68)	100

Liste des annexes

Annexe 1 - Rappels sur le mécanisme de retrait-gonflement des argiles	113
Annexe 2 – Regroupement des formations argileuses à partir des formations de la carte géologique harmonisée départementale	117
Annexe 3 – Liste et coordonnées des bureaux d'étude ayant fourni des données géotechniques	121

Liste des cartes hors-textes (échelle 1/125 000)

Carte 1 –	Carte départementale synthétique des formations argileuses et marneuses
Carte 2 –	Carte départementale de susceptibilité au retrait-gonflement des sols argileux
Carte 3 –	Carte départementale d'aléa retrait-gonflement des argiles

1. Introduction

Les phénomènes de retrait-gonflement de certains sols argileux provoquent des tassements différentiels qui se manifestent par des désordres affectant principalement 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 puis, 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).

En 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 sont particulièrement vulnérables à des tassements différentiels sous leurs fondations.

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 l'année 1989 (début d'application de cette procédure aux sinistres résultant de mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et la réhydratation des sols), près de 8 000 communes françaises, réparties dans 90 départements, ont été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle à ce titre. En septembre 2008, le coût des sinistres dus à la sécheresse, indemnisés en France entre 1989 et 2003 au titre du régime des catastrophes naturelles, a été évalué par la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) à 3,9 milliards d'euros, ce qui en fait la deuxième cause d'indemnisation, juste derrière les inondations.

La région Franche-Comté, bien qu'initialement relativement épargnée par ce phénomène, a connu au cours de l'été 2003 une forte occurrence de sinistres, en particulier en ce qui concerne le Jura (185 arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle) et la Haute-Saône (34 arrêtés), ainsi que, dans une moindre mesure, le Doubs et le Territoire de Belfort (respectivement 10 et 2 arrêtés). À la date du 1^{er} septembre 2009, 2 communes sur les 102 que compte le département du

Territoire de Belfort ont ainsi été reconnues en état de catastrophe naturelle sécheresse pour la période du 1^{er} juillet au 30 septembre 2003, soit un taux de sinistralité de 1,96 %.

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 la Mer (MEEDDM) a souhaité réaliser une carte de l'aléa retrait-gonflement permettant de délimiter les zones les plus exposées au phénomène. Cette étude a été confiée au BRGM qui, dans le cadre de sa mission de service public sur les risques naturels, a élaboré une méthodologie de cartographie de l'aléa retrait-gonflement des 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 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 conduite par le Service Géologique Régional Bourgogne – Franche-Comté, en collaboration avec le Service des Actions Régionales et le Service Aménagement et Risques Naturels 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 fond national de prévention des risques naturels majeurs, dans le cadre d'une convention de cofinancement signée le 14 août 2008 avec la Préfecture du Territoire de Belfort.

Cette étude s'intègre dans un programme national de cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux qui doit concerner à terme l'ensemble du territoire métropolitain.

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.

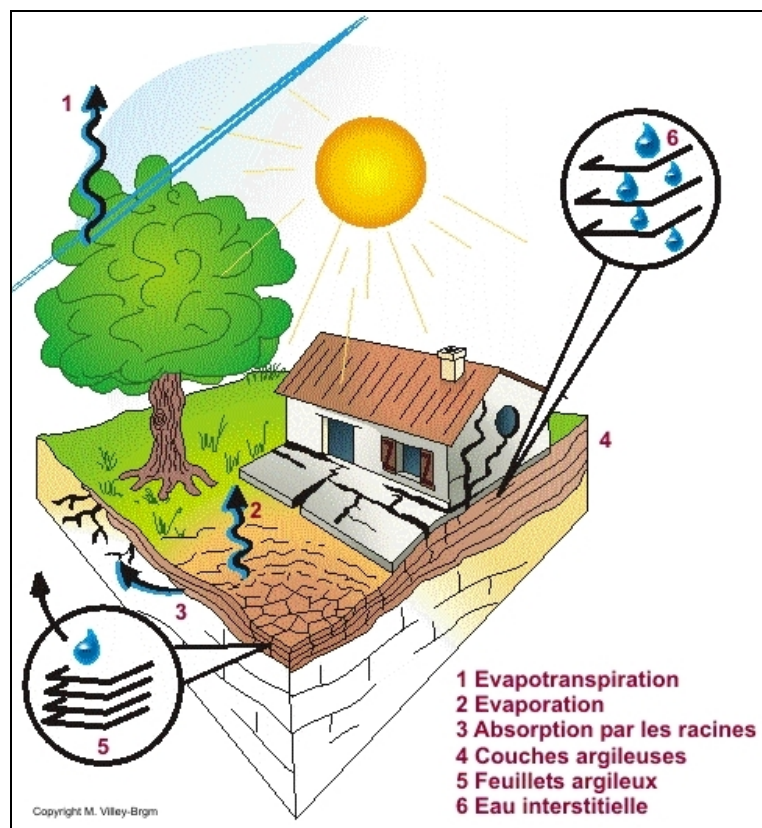


Illustration 1 : Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche

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 prédominant 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, puis harmonisées à l'échelle du département, comporte un inventaire des formations affleurantes à sub-affleurantes, à composante argilo-marneuse, puis leur cartographie.

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

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

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

La géométrie de la formation argileuse influe aussi 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.

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

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 voire une fois et demie sa hauteur, mais ceci est variable selon les espèces arborées.

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

Ainsi, on considère qu'un peuplier ou un saule adulte peut absorber jusqu'à 300 litres d'eau par jour en été (Habib, 1992). En France, les arbres considérés comme les plus

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

2.1.2. Facteurs de déclenchement

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, notamment au niveau du raccordement avec le bâti, constituent une source fréquente de sinistres. Une étude statistique récente (Vincent *et al.*, 2006), conduite par le 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 en charge de l'environnement et est désormais appliquée dans le cadre d'un programme qui concernera à terme l'ensemble du territoire métropolitain (Vincent *et al.*, 2008), ce qui permettra d'obtenir des résultats homogènes au niveau national. Les départements voisins ont tous déjà fait l'objet d'une telle étude ; il en est ainsi de la Haute-Saône

(Le Roy *et al.*, 2009), du Doubs (Donsimoni, 2009), des Vosges (Géron *et al.*, 2009) et du Haut-Rhin (Krencker et Cruz-Mermy, 2009).

2.2.1. Cartographie des formations argileuses ou marneuses

La cartographie des formations argileuses et marneuses du département a été réalisée à partir des cartes géologiques éditées par le BRGM à l'échelle 1/50 000 et qui avaient fait l'objet d'un travail d'harmonisation préalable afin d'établir une carte géologique départementale harmonisée. Ont également été prises en compte des coupes de forage de la Banque des données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM, complétées et actualisées par quelques données ponctuelles issues des rapports d'expertise de sinistres ou d'études géotechniques locales.

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 laissent supposer des comportements semblables vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Cela a permis d'aboutir à la carte départementale synthétique des formations argileuses au sens large. 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 (Carte 1).

2.2.2. Caractérisation lithologique, minéralogique et géotechnique des formations

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

L'analyse des notices des cartes géologiques, complétée par une revue bibliographique et des analyses spécifiques, 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 de résultats d'analyses réalisées par plusieurs bureaux d'études dans différents cadres (projets de construction ou d'aménagement, études post-sinistres...), ainsi que par le Service d'études et de contrôle des infrastructures de la Direction des services techniques et des transports du Conseil Général du Territoire de Belfort.

Pour des formations géologiques qui s'étendent au delà du département et pour lesquelles les données sont rares, nous avons repris les caractéristiques recueillies lors de l'établissement de la carte d'aléa 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 départementale de l'aléa.

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

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

2.2.4. Carte de susceptibilité

En définitive, la carte départementale de susceptibilité au retrait-gonflement a été établie à partir de la carte synthétique 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.

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 imputés à la sécheresse a été effectué auprès de l'ensemble des communes du département. D'autre part, des recherches ont été menées auprès de la Caisse Centrale de Réassurance, de compagnies d'assurances et de bureaux d'études, qui ont accepté que leurs archives soient examinées à cet effet. Ainsi, ce sont seulement 9 sites de sinistres qui ont été localisés

précisément sur cartes topographiques de l'IGN à l'échelle 1/25 000 et ainsi géoréférencés en coordonnées Lambert 2 étendu. Ils sont répartis sur trois communes dont les deux (Buc et Rougemont-le-Château) qui ont fait l'objet d'une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle (cf. Journal Officiel du 6 février 2006).

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. Cette surface a été calculée à partir de la couche « bâti » de la BDTopo de l'IGN, mise à disposition par la DDT du Territoire de Belfort dans le cadre de cette étude. Le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux affectant essentiellement les structures légères correspondant aux habitations individuelles, il a été choisi d'exclure de ce calcul de surface les bâtiments industriels, agricoles et commerciaux, sportifs, administratifs ou de transport, ainsi que les châteaux et divers monuments. Au final, les seuls bâtiments pris en compte dans le calcul sont ceux correspondant à la catégorie « autre » et « religieux », et à la nature « autre » et « église » de la BDTopo.

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. Etant donnée la faible représentativité de ces densités de sinistre liée au faible nombre de sinistres recensés sur ce département, la note de sinistralité prise en compte résulte à la fois de cette densité de sinistres et de la note de sinistralité obtenue dans les départements limitrophes.

2.2.7. Carte d'aléa

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

3. Présentation du département du Territoire de Belfort

3.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

3.1.1. Généralités

Le département du Territoire de Belfort (90) est situé dans l'Est de la France (Illustration 2). Du point de vue administratif, il appartient à la région Franche-Comté, dont il représente 3,75 % de la superficie. Il est limitrophe des départements du Doubs, de la Haute-Saône, des Vosges et du Haut-Rhin, ainsi que du canton suisse du Jura.

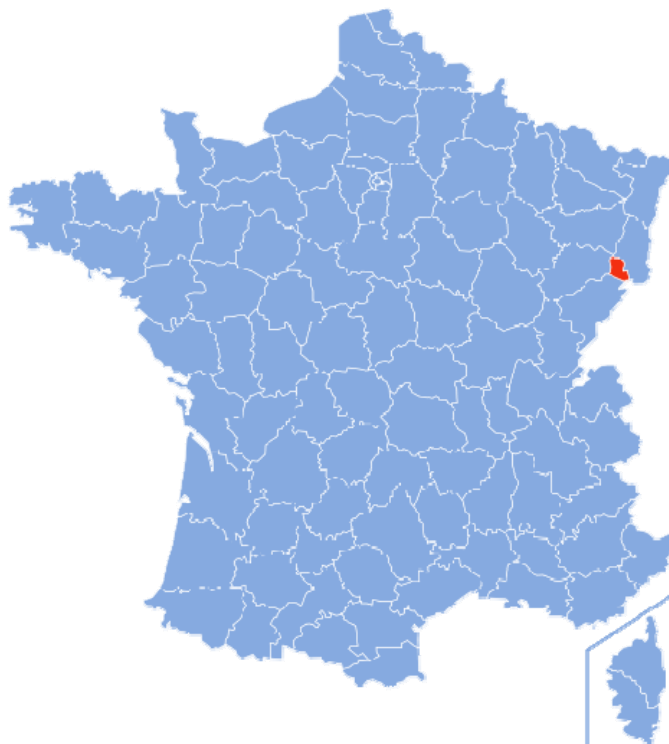


Illustration 2 : Localisation du département du Territoire de Belfort

(Image extraite du site internet <http://fr.wikipedia.org>)

Avec une superficie de seulement 609 km² (donnée : Dictionnaire des communes du 15 avril 1997) – alors que la superficie moyenne d'un département français est de 5 800 km² – le Territoire de Belfort est l'un des plus petits départements français après Paris et les départements de la *Petite couronne* (Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis et Val-de-Marne). Il mesure 44 km du nord au sud et 22 km d'est en ouest. Nous prendrons en compte pour la suite de l'étude les données surfaciques fournies par la BD Carto© de l'IGN, de novembre 2006, calculées en coordonnées cartésiennes ; dans ce contexte, la surface du département est évaluée à 611 km².

Le Territoire de Belfort est doté d'un seul arrondissement : l'arrondissement de Belfort, Belfort étant la préfecture (Illustration 3). En 2006, ce département comptait 144 600 habitants (soit une densité de 237 habitants au km²) répartis sur 102 communes.



Illustration 3 : Le département du Territoire de Belfort et ses principales villes
(image extraite du site Internet www.1france.fr)

3.1.2. Régions naturelles, relief et hydrographie

Le Territoire de Belfort s'étend sur une dépression large d'une trentaine de kilomètres (la Trouée de Belfort) située entre le massif des Vosges (Ballon d'Alsace) et celui du Jura (chaîne du Lomont), qui fut de tous temps un lieu de passage entre la vallée du Rhin (Alsace, pays germaniques) et le bassin du Rhône (Franche-Comté, Bourgogne), ce qui lui a valu le nom de Porte de Bourgogne. Le Territoire de Belfort constitue l'extrémité septentrionale du bassin versant méditerranéen en France.

Relief

La carte du relief (Illustration 4), ci-dessous, montre une plaine d'altitude moyenne de 400 m, bordée au nord par le massif des Vosges dont les sommets culminent à environ 1 000 m en moyenne :

- Ballon d'Alsace : 1 248 m (repère C sur la carte) ;
- Planche des Belles-Filles : 1 148 m (repère D) ;
- Baerenkopf : 1 074 m (repère E) ;
- Sudel : 914 m ;
- Le Fayé : 915 m.

La ville de Belfort (repère B) est à 370 m d'altitude. Elle est dominée par le mont Salbert (647 m) qui termine, côté ouest, une chaîne de collines ne dépassant guère 500 m d'altitude : Mont Rudolphe, Fort de Roppe, Bois-la-Dame (repère G), Bois du Châtelet. L'extrême pointe sud est un plateau (repère F), qui atteint 621 m à la frontière suisse sur le territoire de la commune de Villars-le-Sec. La Bourbeuse (repère 3), dont le lit est suivi par le canal du Rhône au Rhin (repère 2), pénètre dans le département du Doubs à une altitude inférieure à 330 m.

Le Ballon d'Alsace est le sommet le plus au sud du massif des Vosges, mais il est loin d'en être le plus haut puisqu'il n'est que le 26^e par ordre de hauteur décroissante.

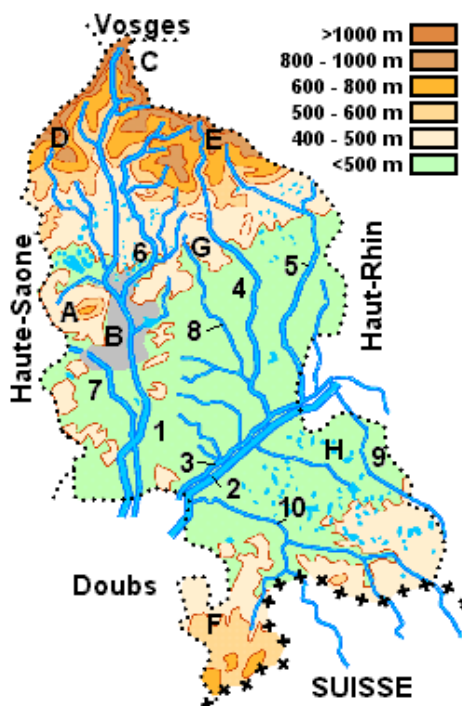


Illustration 4 : Relief et hydrographie du département du Territoire de Belfort

(image extraite de http://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9ographie_du_Territoire_de_Belfort, consulté au 11/02/10)

Hydrographie

Deux facteurs principaux déterminent le cheminement de l'eau dans le Territoire :

- la présence des Vosges, barrière naturelle aux nuages qui viennent de l'ouest ;
- le sol imperméable de la plus grande partie du département

La limite départementale entre le Territoire de Belfort et le Haut-Rhin suit approximativement la ligne de partage des eaux entre le bassin du Rhin et celui du Rhône.

• Les cours d'eau

Le massif des Vosges recueille des précipitations importantes (environ 2 m d'eau par an au Ballon d'Alsace) qui donnent naissance aux principaux cours d'eau du département s'écoulant du nord vers le sud.

La Savoureuse (repère 1) prend sa source à 1 200 m au sommet du Ballon d'Alsace. Elle est rejointe à Valdoie par la Rosemontoise (repère 6). La Madeleine (repère 4) descend du Baerenkopf et s'associe avec l'Autruche (repère 8) puis la Saint-Nicolas (repère 5) pour former la Bourbeuse (repère 3).

Toutes ces rivières ont un débit qui peut varier dans d'importantes proportions au gré de la fonte des neiges et des fortes pluies et des périodes de sécheresse. Les crues de la Savoureuse et de la Rosemontoise ont incité le département à construire des barrages de régulation, pour l'instant hors service. À ces torrents vosgiens, il faut ajouter l'Allaine (repère 10) et ses affluents la Coeuvalte et la Vendeline, tous trois descendant de Suisse et la Suarcine (repère 9). Après avoir recueilli la Bourbeuse, l'Allaine change de nom pour s'appeler l'Allan. Plus loin dans sa course, elle reçoit la Savoureuse et se jette dans le Doubs vers Voujeaucourt. La Douce (repère 7) présente un caractère rare dans le nord de la Franche-Comté puisqu'elle disparaît en partie dans le sol calcaire de Bavilliers (dans le Trou-la-dame) pour réapparaître quelques centaines de mètres plus loin.

• Les étangs

Le caractère imperméable du sol dans plusieurs parties du département favorise la formation des zones humides. Ces dernières sont constituées des 1 200 hectares d'étangs auxquels s'ajoutent les marais et tourbières. Elles abritent une faune et une flore particulières liées à la situation du Territoire de Belfort, large dépression entre deux massifs montagneux. Plus de deux cents espèces d'oiseaux ont été observées dans le seul Sundgau belfortain, au sud-est du département, dont de nombreux migrateurs faisant étape. Les plus grands étangs sont ceux du Malsaucy (66 ha) et de la Véronne ainsi que l'étang des Forges (40 ha), tout près de Belfort. Ils ont été aménagés au départ pour servir de réservoirs d'énergie pour l'industrie. Le Territoire est, en plusieurs secteurs, constellé de petits étangs, regroupés dans deux zones :

- au sud, autour de Boron, Vellescot, Suarce...(repère H)
- au nord, dans le pays sous-vosgien (repère G) où le sol est constitué de grès permien rouge.

Ils sont souvent utilisés pour la pisciculture, la pêche de loisir et comme terrain de week-end. Creuser un étang est une façon de valoriser un terrain improductif sur le plan de l'agriculture ou de la sylviculture.

3.2. CONTEXTE CLIMATIQUE

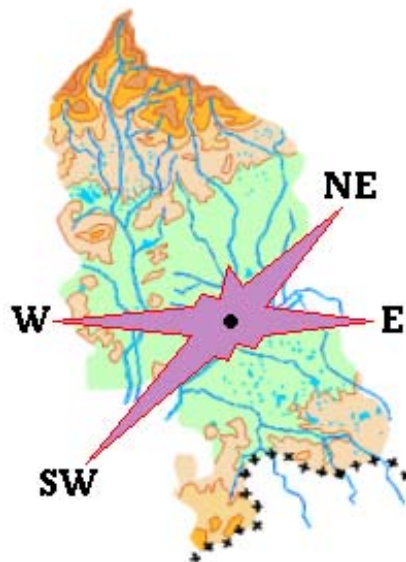
3.2.1. Les vents

Le climat du Territoire de Belfort est du type semi-continentale. Il est toutefois fortement influencé par la forme de couloir, entre Vosges et Jura, que possède la Porte de Bourgogne qui canalise les vents d'ouest comme ceux venant de l'est.

La carte ci-dessous (Illustration 5) montre les directions de l'origine des vents dominants dans la Trouée de Belfort. On voit nettement l'influence des massifs montagneux, Vosges (au nord) et Jura (au sud), qui forment les murs d'un couloir reliant la vallée du Rhin et la plaine d'Alsace au bassin de la Saône.

Deux sortes de vents déterminent le climat dans la Trouée de Belfort :

- les vents d'ouest/sud-ouest : tempérés et humides, ils apportent la pluie, les orages ou la neige selon la saison ;
- la bise : elle vient de l'est ou du nord-est. Froide en hiver, relativement chaude en été, sèche en toutes saisons. C'est une des composantes du mistral. Il arrive qu'elle souffle pendant des longs jours sans faiblir, refroidissant les maisons les mieux isolées en s'infiltrant partout.



*Illustration 5 : Direction d'origine des vents dominants dans le Territoire de Belfort
(image extraite de http://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_du_territoire_de_belfort, consulté au 11/02/10)*

3.2.2. Les précipitations

Le massif du Ballon d'Alsace s'oppose aux vents d'ouest chargés d'humidité et amplifie le niveau des précipitations dans le nord du département. Hauteur de pluie par an : Belfort : 1 060 mm, Ballon d'Alsace : 2 400 mm.

Sur le diagramme ci-dessous (Illustration 6), les barres verticales représentent la moyenne des précipitations à Belfort relevées par Météo-France de 1971 à 2000. On constate deux minima : au printemps et en été. L'hiver correspond à un maximum de précipitations : pluie ou neige. Mais ces valeurs statistiques gomment les variations qui se produisent d'une année sur l'autre. La courbe en vert correspond à la hauteur d'eau reçue à Bourg-sous-Châtelet pour chaque mois de l'année 2005. Les pluies d'été sont le plus souvent apportées par des averses orageuses qui déversent en une seule journée une quantité d'eau parfois importante : 60 mm d'eau à Joncherey le 7 août 1978.

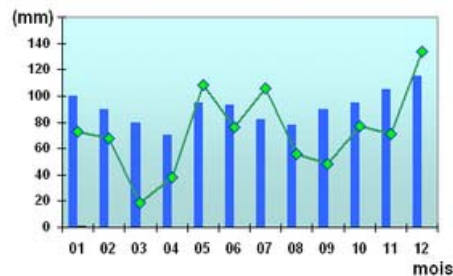


Illustration 6 : Moyenne mensuelle des précipitations à Belfort

(image extraite de http://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_du_territoire_de_belfort, consulté au 11/02/10)

3.2.3. Les températures

Sur le diagramme ci-dessous (Illustration 7), les valeurs indiquées sur les deux courbes ne sont pas des records mais des moyennes de températures extrêmes. Par exemple, le 10 février 1956 on relevait $-21,4^{\circ}\text{C}$ alors que la température minimum moyenne est de l'ordre de -1°C .

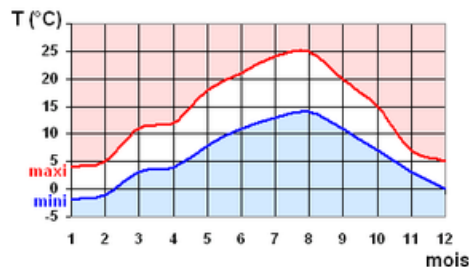


Illustration 7 : Moyenne mensuelle des températures minimales et maximales à Belfort relevée sur la période 1971-2000

(image extraite de http://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_du_territoire_de_belfort, consulté au 11/02/10)

3.2.4. Ensoleillement

Nombre d'heures de soleil par an : 1 790 h/an.

- 20 % d'ensoleillement en décembre ;
- 50 % d'ensoleillement en juillet.

3.3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL

Le département du Territoire de Belfort présente une forte dualité géomorphologique puisqu'il se situe à cheval sur trois domaines géographiques et géologiques distincts (Illustrations 8 et 9) :

- le Nord du département est occupé par le socle du massif hercynien vosgien, formé d'une série volcano-sédimentaire d'âge viséen, traversée par des granites intrusifs (massif granitique des Ballons qui culmine à plus de 1 000 m d'altitude) et de roches associées d'âge tardi-viséen. En bordure, le Permien affleure dans le bassin de Giromagny ;
- l'Est du département se compose du domaine marginal du fossé rhénan (fossé de Dannemarie) ayant une surface ondulée à soubassement généralement stampien et recouvert de graviers pliocènes et quaternaires et de loess. Son altitude oscille entre 300 et 500 m ;
- le reste du territoire (au sud et à l'ouest) est occupé par une zone de transition entre le Jura plissé et le fossé rhénan. Cette zone est formée de calcaires, de marnes et est affectée de cassures. Son altitude varie entre 500 et 600 m.

Les formations géologiques présentes sur le territoire du département du Territoire de Belfort s'étagent depuis le Dévonien jusqu'à la période récente à actuelle.

La partie montagneuse (Vosges du Sud au nord du département), à l'exception des formations superficielles, est exclusivement formée par des formations paléozoïques. Elle comprend essentiellement les assises volcaniques et volcano-sédimentaires du Viséen. Au nord, apparaît l'extrémité orientale du massif granitique des Ballons. Au sud, les Vosges sont relayées par les collines du bassin permien de Giromagny, puis des massifs du Salbert et du Bois de la Thure où affleurent des terrains dévono-dinantiens.

Les plaines de l'est du département (domaine marginal du fossé rhénan, fossé de Dannemarie), sont principalement constituées par des formations pliocènes à quaternaires (des alluvions anciennes d'origine vosgiennes, des limons et par les cailloutis de Sundgau) à soubassement généralement Stampien.

Les collines pré-jurassiennes au sud et au sud-est du département sont essentiellement constituées de calcaire et de marne allant du Keuper au Jurassique supérieur. Ces calcaires et ces marnes sont affectés par des failles.

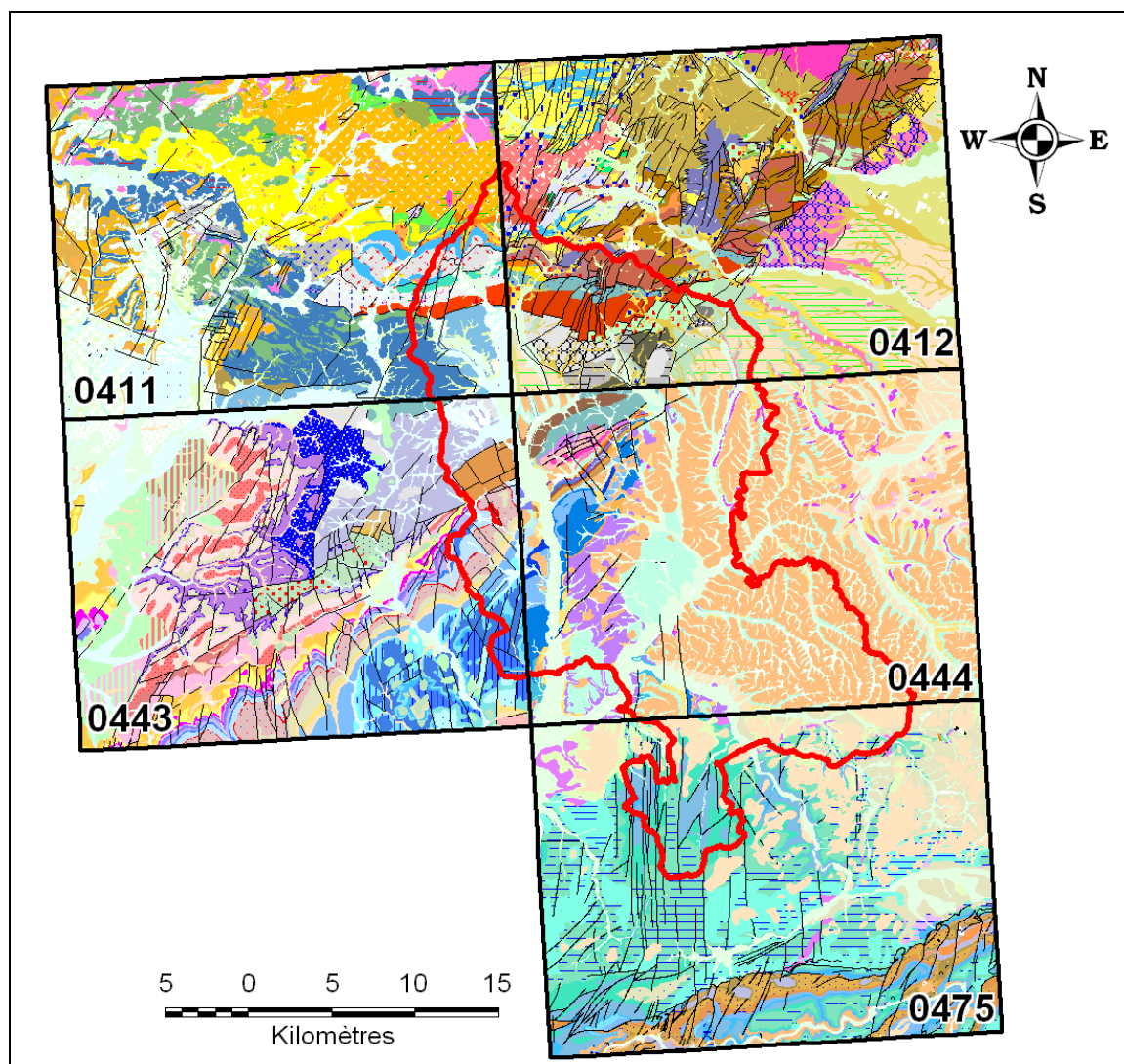


Illustration 8 : Cartes géologiques à 1/50 000 recoupant le département du Territoire de Belfort (suivant le tableau d'assemblage des cartes géologiques à 1/50 000)

On distingue nettement, au nord, le massif des Vosges et le bassin de Giromagny, à l'est, le fossé rhénan (teinte orange clair) et au sud et à l'ouest, une zone de transition entre le Jura plissé et le fossé rhénan (teinte bleue)

3.3.1. Les formations paléozoïques

- **Du Dévonien au Carbonifère** : Ce sont des séries volcano-sédimentaires (Schistes d'Etueffont, Schistes du Salbert, kératophyres et diabases), d'orientation générale SW-NE. Ces formations affleurent au nord du département, en contact faillé avec les terrains du Viséen supérieur recouverts par les dépôts non plissés du Permien.

Les Schistes d'Etueffont comportent des passées gréseuses et conglomératiques et des intercalations de kératophyres et de diabases en général très altérées. Les Schistes du Salbert comportent des faciès sédimentaires variés (grès et pélites ou argiles).

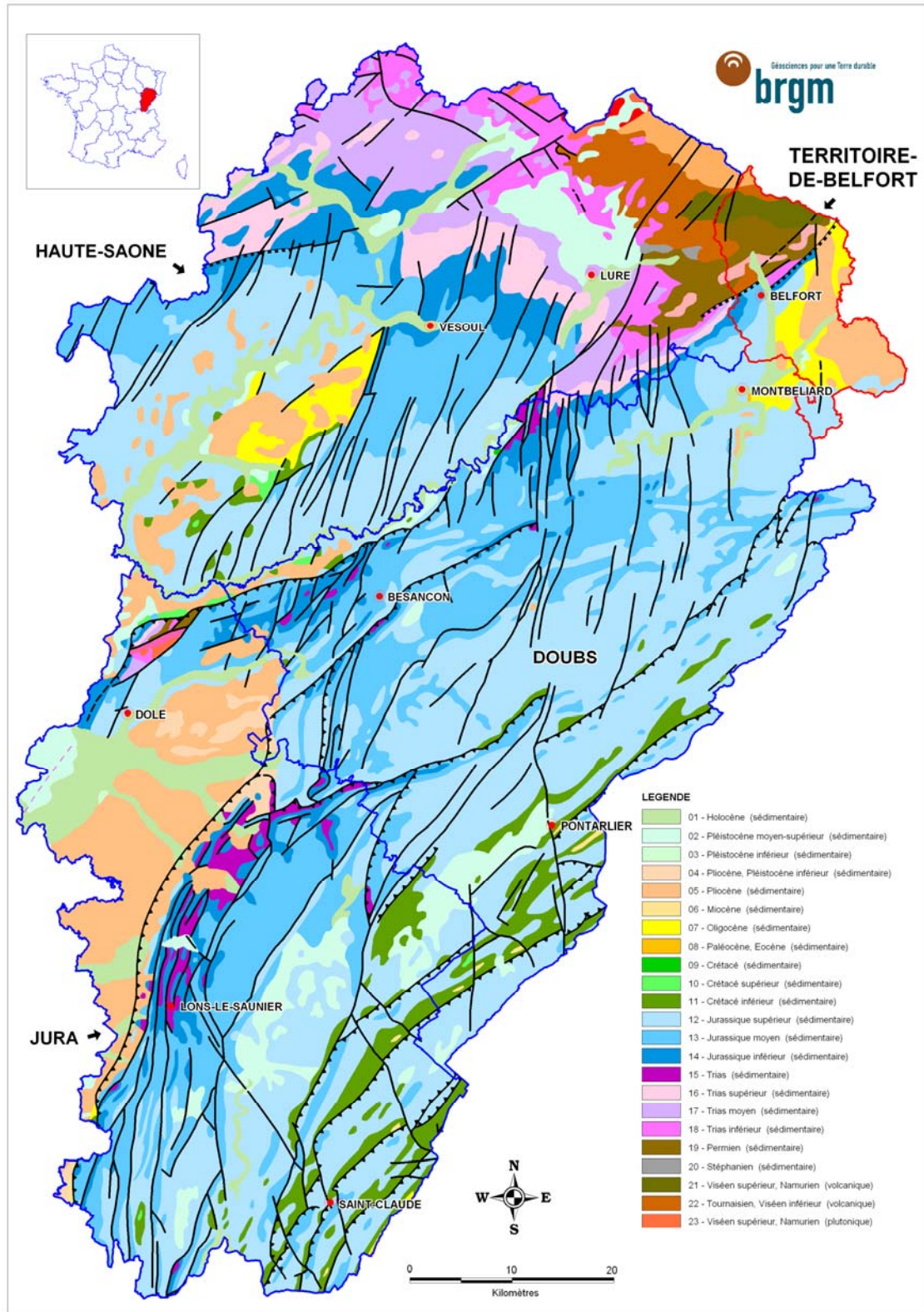


Illustration 9 : Le département du Territoire de Belfort dans son contexte géologique régional franc-comtois (extrait de la carte géologique de la France à 1/1 000 000, BRGM, 2003)

- **Massif des Ballons (Viséen) :** Le massif des Ballons s'étend sur environ 20 km d'est en ouest et sur 6 km du nord au sud. Seule sa partie orientale est présente au nord du département.

La masse principale est formée par un granite porphyroïde à amphibole et biotite. Au sud de ce massif, affleure une bande de granite à augite et biotite, peu quartzique (faciès de bordure) et une mozonite quartzifère à biotite et clinopyroxène. Ces deux dernières formations sont intrudées de filons de microgranites à cordiérite et tourmaline.

- **Série de Plancher-Bas et de Malvaux (Viséen) :** La série de Plancher-Bas et de Malvaux affleure au nord-ouest du département et au sud du massif des Ballons. Il s'agit d'une série volcano-sédimentaire plus ou moins affectée par le thermométamorphisme lors de la mise en place des granites des Ballons.

La série de Malvaux représente une sédimentation marine et renferme des roches volcaniques provenant d'épanchements sous-marins dont le magmatisme a les caractères minéralogiques et chimiques d'une association spilite-kératophyre.

La série de Plancher-Bas, comme celle de Malvaux, est formée d'une association spilite-kératophyre.

- **Série de Giromagny (Viséen supérieur) :** Cette série affleure entre la série de Plancher-Bas et de Malvaux et les schistes dévoniens.

Du bas vers le haut, elle se compose des épisodes suivants:

- épisode volcanique labradoritique ;
- épisode volcanique et volcano-sédimentaire comprenant des brèches à éléments trachy-labradoritiques, des brèches à éléments trachytiques et labradoritiques (Brèche du Crémillot) et un niveau gréseux ;
- épisode volcano-sédimentaire « inférieur » composé d'un niveau de grauwackes, rudite à arénites, de pélites et de formations du strato-volcan du Molkenrain ;
- épisode volcanique formé d'andésites porphyriques ;
- épisode volcano-sédimentaire « supérieur » constitué d'un niveau de grauwackes-arénites puis d'un niveau de pélites (dite moyenne), suivi d'un niveau de grauwackes arkosique et enfin un niveau de pélites (dite supérieures) ;
- épisode volcanique rhyodacitique.

- **Stéphanien :** À la fin du Carbonifère, se forme un bassin houiller de nature fluvio-lacustre. La série comprend deux séquences de remblaiement avec des dépôts grossiers, à la base, surmontés par des schistes et siltites à intercalations carbonneuses et passées de cinérites. Ces terrains affleurent peu dans le département.

- **Permien :** Au Permien, les bassins, souvent des fossés d'effondrement, occupent la bordure du massif granitique des Ballons. Fortement subsidents, ils se remplissent de matériel détritique rouge provenant de l'érosion de sols formés sur les reliefs résiduels de la chaîne hercynienne.

Dans le bassin de Giromagny, quelques passées de cinérites sont les témoins de manifestations volcaniques proches. À un premier cycle sédimentaire se terminant par des siltites à passées carbonatées, succède un épisode de sédimentation très grossière provenant, en particulier, de l'érosion d'un socle proche.

3.3.2. Les formations mésozoïques

- **Trias** : Les formations rapportées au Trias sont affleurantes dans le centre du département. Il s'agit de marnes rouges ou irisées, de calcaire gris et de grès (Grès à Voltzia, Grès vosgien et conglomérat principal) du Buntsandstein (Trias inférieur).

Bien que peu affleurants, ces terrains triasiques ont eu une importance considérable dans l'histoire tectonique jurassienne puisqu'ils forment le principal niveau de décollement de la couverture méso-cénozoïque au-dessus du socle sous-jacent.

- **Jurassique** : Au Jurassique, s'installe une sédimentation à dominante carbonatée, constituée d'une alternance de couches calcaires et de couches marneuses. Ces dépôts sont les témoins de la présence d'une plate-forme carbonatée connue sur l'ensemble du Jura.

Ces formations jurassiques forment la majeure partie des collines préjurassiennes (au sud et au sud-est du département). Elles constituent une série de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur allant de l'Hettangien, à la base, au Kimméridgien supérieur. Cette zone préjurassienne est affectée par de nombreuses failles orientées NW-SE (à l'ouest du département) à N-S (au sud du département) et d'autres orientées NE-SW.

3.3.3. Les formations cénozoïques

- **Éocène** : À l'Éocène, le Jura septentrional reste émergé, ainsi la surface est soumise à des altérations dont les restes se rencontrent de manière discontinue dans l'Éocène sidérolithique (calcaire à ciment ocre-rouge et grains sidérolithiques) en périphérie du Fossé rhéan.

- **Oligocène** : Les terrains oligocènes affleurent en bordure du Fossé rhéan. Ce sont des marnes micacées argileuses, des marnes altérées du tertiaire indifférencié du Fossé rhéan et des conglomérats formés par l'érosion des reliefs.

- **Pliocène** : Sur la carte du département du Territoire de Belfort, le Pliocène est représenté par la formation des Cailloutis de Sundgau (au sud-est du département).

Cette nappe d'alluvions anciennes à éléments siliceux d'origine alpine et vosgienne forme un élément important dans la morphologie de la région.

- **Les formations quaternaires** : L'ensemble des terrains décrit précédemment sont en partie recouverts par les sédiments glaciaires et péri-glaciaires quaternaires des périodes du Riss et du Würm. Ces dépôts sont parfois épais (plusieurs mètres) et s'étendent sur des superficies importantes : ils recouvrent l'essentiel du territoire.

On observe principalement des alluvions anciennes d'origine vosgienne, des limons qui recouvrent le soubassement généralement Stampien du domaine marginal du Fossé rhéan (Fossé de Dannemarie).

3.4. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

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

Les réservoirs aquifères affleurant ou peu profonds en Franche Comté sont essentiellement de nature calcaire et karstique. Globalement, les aquifères calcaires ont pour substratum les marnes et argiles du Lias. Par ailleurs, au sein de la série Jurassique, essentiellement calcaire, existe un niveau à dominance marneuse, l'Oxfordien inférieur. Par ce fait, on peut définir, en Franche Comté, deux aquifères calcaires et karstiques :

- l'aquifère inférieur (calcaires du Dogger) ;
- l'aquifère supérieur (calcaires du Jurassique supérieur).

Cependant, dans le massif jurassien, compte tenu des structures plissées et faillées, ces deux aquifères sont très souvent en communication et ne peuvent pas être considérées comme totalement indépendants l'un de l'autre.

En dehors des aquifères calcaires, existent dans des zones périphériques de la région, des ensembles d'aquifères de natures différentes et qui se rattachent aux ensembles géologiques bien développés :

- l'aquifère des cailloutis de Sundgau (extrémité sud des formations de remplissage du fossé alsacien) ;
- les aquifères de socle du versant sud des Vosges ;
- l'aquifère des grès du Trias, situé sous les argiles du Lias ;
- les aquifères des niveaux sableux ou graveleux au sein du remplissage du fossé de Bresse.

Dans l'est du territoire de Belfort, les formations profondes tertiaires et Jurassiques du fond du fossé d'Alsace contiennent des ressources intéressantes.

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

4.1. DOCUMENTS ET MÉTHODOLOGIE UTILISÉS

4.1.1. Méthode utilisée

L'objectif est de disposer d'une carte des formations géologiques à dominante argilo-marneuse du département du Territoire de Belfort, 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.

Cette cartographie a été réalisée 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 la carte départementale géologique harmonisée du département du Territoire de Belfort. Les cartes à 1/50 000 peuvent présenter localement des lacunes en ce qui concerne notamment les formations superficielles, et leur fiabilité ponctuelle est souvent limitée. Ces cartes ont été partiellement complétées par la consultation de la Banque des données du sous-sol (BSS) du Service Géologique Régional Franche Comté ainsi que d'études effectuées dans divers cadres, mais toutes les données disponibles n'ont pu être intégrées en raison de leur nombre très élevé. 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.

Le territoire couvert par le département du Territoire de Belfort est entièrement cartographié à l'échelle du 1/50 000. Cinq cartes (Illustrations 10 et 11), publiées entre 1963 (Belfort) et 2000 (Lure), concernent peu ou prou le département.

Nom de la carte	N° de la carte	Date de publication de la carte	Auteurs
GIROMAGNY	411	1974	<i>Guintrand Y., Rossi M., Griveaux B., Thiébaud J., Théobald N. (coord.)</i>
THANN	412	1986	<i>Coulon M., Paicheler J.-C., Guérin H.</i>
LURE	443	2000	<i>Contini D., Creuzot J., Dressler M., Théobald N.</i>
BELFORT	444	1963	<i>Théobald N., Devantoy J.</i>
DELLE	475	1985	<i>Bailly C., Chauve P., Martin P.</i>

Illustration 10 : Liste des 5 cartes géologiques à 1/50 000 qui concernent le département du Territoire de Belfort

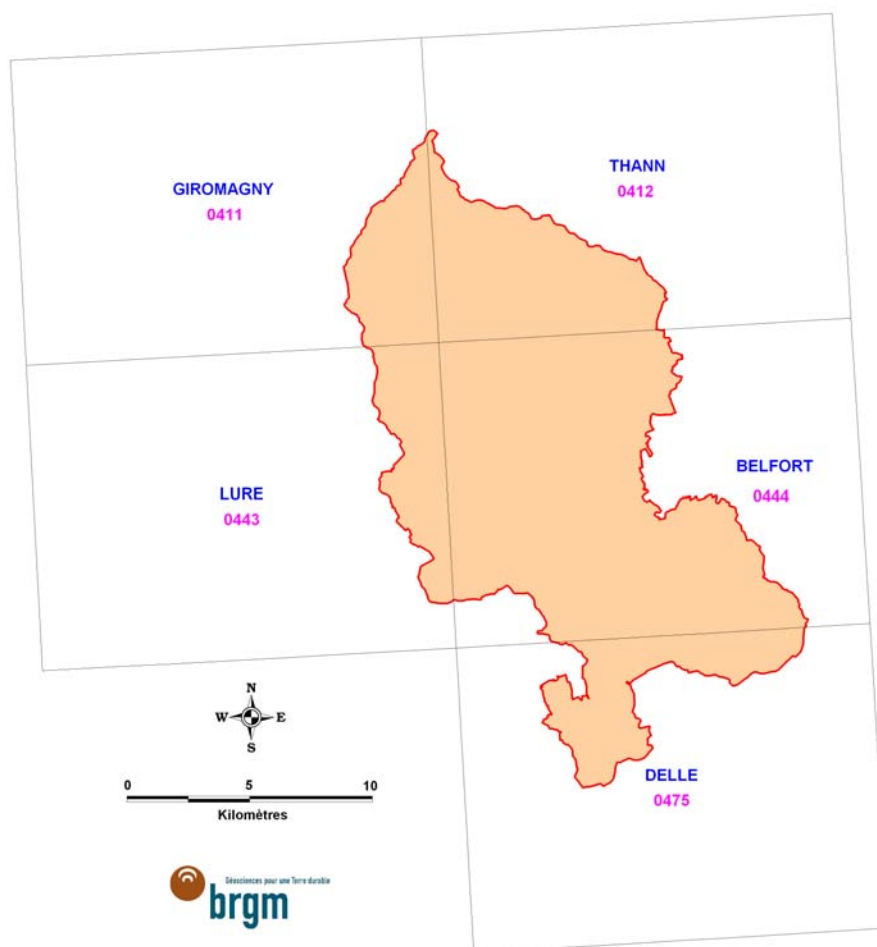


Illustration 11 : Assemblage des 5 cartes géologiques à 1/50 000 qui concernent le département du Territoire de Belfort

À partir de ces cartes géologiques à 1/50 000, harmonisées à l'échelle du département, nous avons identifié les formations argileuses et marneuses ainsi que toute formation pouvant renfermer des intercalations ou des lentilles argileuses ou marneuses significatives. Cette carte a pu être ponctuellement modifiée à partir de l'analyse des notices des cartes géologiques précitées ou de la prise en compte de données ponctuelles recueillies lors de l'étude.

Une carte de ces différentes formations argileuses a été ainsi établie. Elle servira de support à l'élaboration de la carte finale de l'aléa retrait-gonflement.

4.1.2. Établissement de la carte des formations argileuses au sens large

Dans certains cas, les argiles ou marnes constituent la majeure partie de la formation retenue. C'est par exemple le cas des *Marnes micacées et « schistes cartons » 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 Territoire de Belfort sont très hétérogènes. Il peut s'agir 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.

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 Territoire de Belfort 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. Seize formations sont finalement retenues sur cette carte.

4.2. LITHOSTRATIGRAPHIE DES FORMATIONS ARGILEUSES AU SENS LARGE

Ce chapitre dresse l'inventaire des formations géologiques argileuses du département du Territoire de Belfort retenues dans le cadre de cette étude.

Le tableau de l'illustration 12 présente la succession stratigraphique des 16 formations argileuses, au sens large, retenues dans le département du Territoire de Belfort. Ce sont en réalité des regroupements de formations géologiques ayant les mêmes caractéristiques lithologiques (Annexe 2).

Age	Code	Notation	Formation	Surface (km ²)	% Surface départ.	
QUATERNAIRE	1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel)	124.73	20.41	
	2	F	Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)	17.39	2.85	
	3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	7.98	1.31	
	4	LP	Limons des plateaux, loess, lehms (Quaternaire)	154.19	25.23	
CENO-QUAT.	5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	1.63	0.27	
CENOZOIQUE	6	g1a-b	Série grise (Rupélien)	1.28	0.21	
JURASSIQUE	SUP.	7	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimméridgien)	33.47	5.48
		8	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien - Oxfordien)	10.89	1.78
	MOY.	9	j2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	7.88	1.29
	INF.	10	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	6.03	0.99
		11	l1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)	0.05	0.01
TRIAS	12	t7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)	0.17	0.03	
	13	t5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	0.50	0.08	
	14	t4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)	0.49	0.08	
	15	t3	Grès et marnes (Muschelkalk)	1.04	0.17	
PERMIEN	16	r	Silts et pélites rouges (Permien)	10.27	1.68	
Total Formations argileuses				377.99	61.86	
Formations à priori non argileuses				233.05	38.14	
Total département				611.04	100.00	

Illustration 12 : Liste des formations argileuses retenues dans le département du Territoire de Belfort

Leur extension géographique est représentée sur la carte départementale synthétique des formations argilo-marneuses (Illustration 13) également illustrée en planche hors-texte (Carte 1) à l'échelle 1/125 000.

Une brève description 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 du 1/50 000. Il s'avère que dans la majorité des cas, les formations cénozoïques et mésozoïques, affleurant dans le département du Territoire de Belfort, présentent une grande similitude lithologique avec les départements voisins de la Haute-Saône et du Jura. Afin de souligner cette homogénéité et continuité de faciès, nous avons volontairement effectué des regroupements les plus conformes à ceux retenus dans le cadre de la cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles réalisées sur ces deux autres départements en 2009 et repris les appellations qui avaient été utilisées. De même, pour ces formations, certaines descriptions sont identiques car ces trois départements présentent des feuilles géologiques communes.

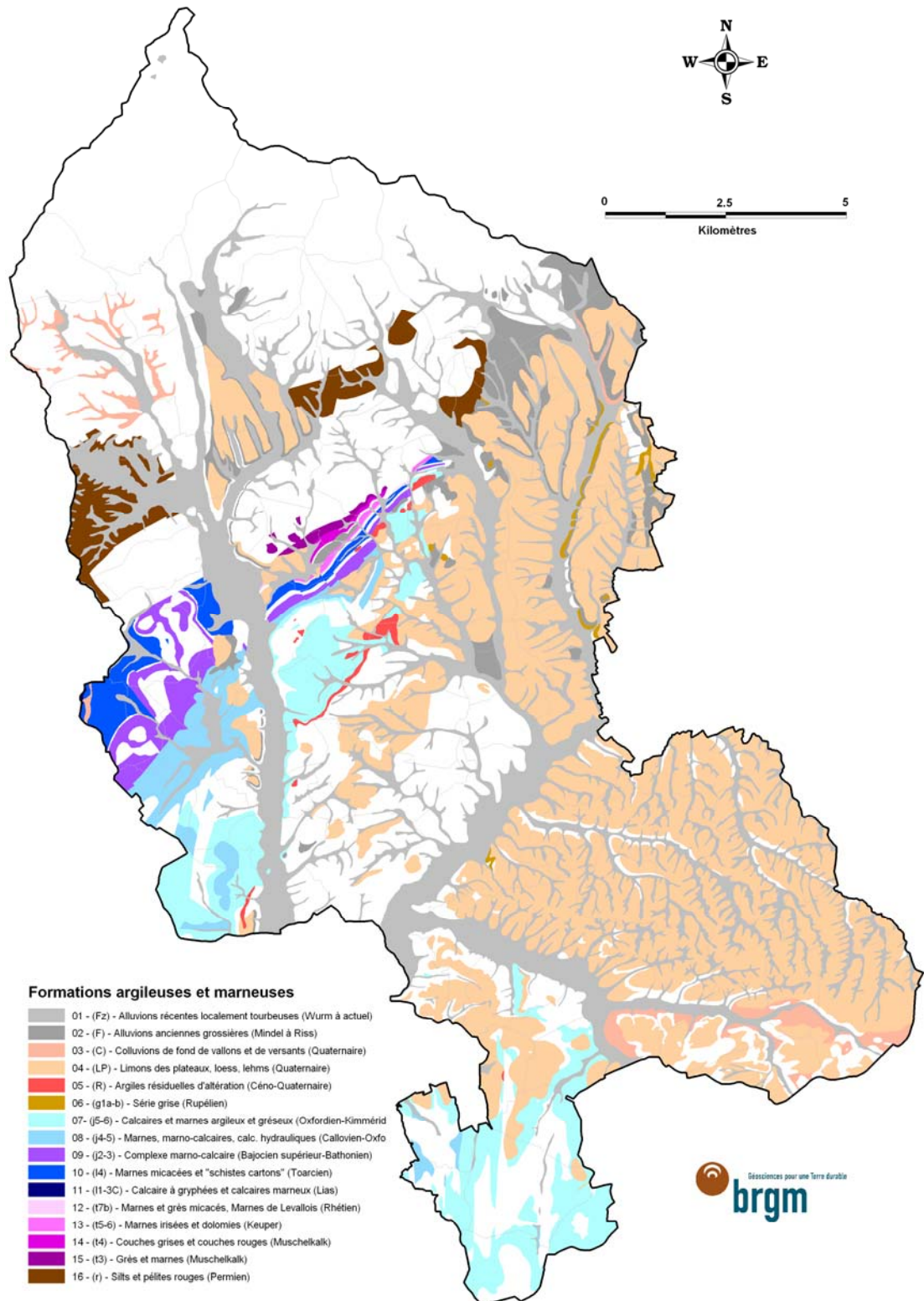


Illustration 13 : Carte départementale synthétique des formations argileuses du Territoire de Belfort

4.2.1. Formations du Quaternaire

(1) – Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel) (Fz)

- Surface d'affleurement : 124,73 km² (Illustration 14)
- Pourcentage de la surface départementale : 20,41 %

Les alluvions récentes soulignent le réseau hydrographique.

Ce sont des alluvions siliceuses d'apport vosgien dans la vallée de la Savoureuse, notamment à l'amont de Belfort où les alluvions actuelles semblent recouvrir des dépôts plus anciens liés aux complexes fluvio-glaciaires issus des moraines de Giromagny. Le substratum y apparaît en certains points du lit de la Savoureuse ; les alluvions n'y dépassent pas 3 à 4 m. Mais en d'autres points, semblent exister des chenaux surcreusés atteignant jusqu'à 7 à 8 m.

Dans la vallée de l'Allaine, à Fesches-le-Châtel, le substratum oligocène a été rencontré à la profondeur de 5,50 m. Les alluvions sont surtout calcaires et renferment peu d'éléments siliceux. Les alluvions y sont recouvertes de limons (1 à 2 m).

Des niveaux tourbeux localisés essentiellement dans les zones humides ont été intégrés à ces formations alluviales, compte tenu de leur très forte compressibilité pouvant induire des désordres importants au bâti, même s'il ne s'agit pas de retrait-gonflement au sens propre.

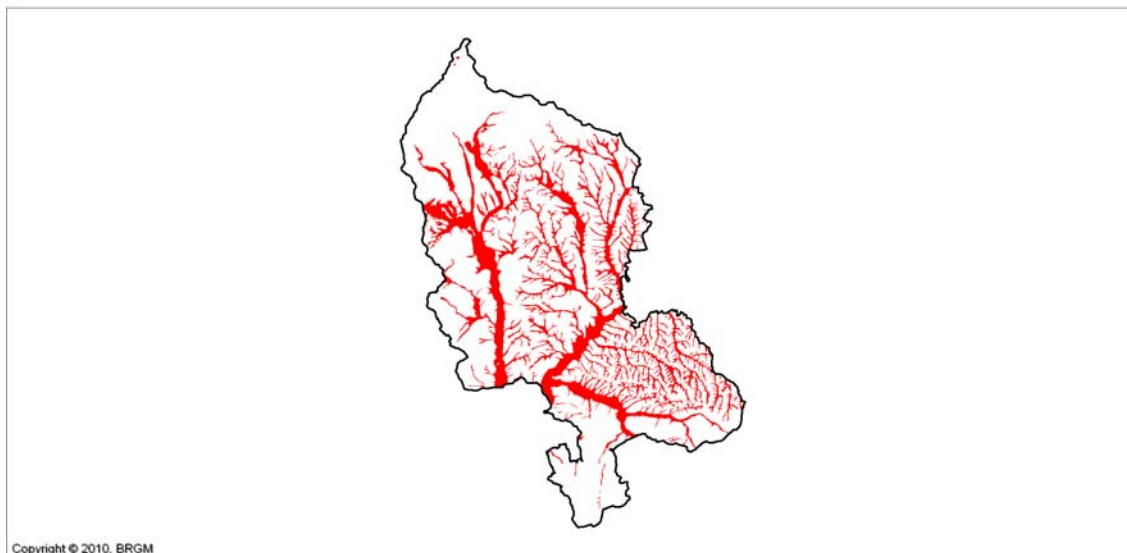


Illustration 14 : Répartition départementale des Alluvions récentes localement tourbeuses (Fz)

(2) – Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss) (F)

- Surface d'affleurement : 17,39 km² (Illustration 15)
- Pourcentage de la surface départementale : 2,85 %

Affleurant dans le nord du département (Illustration 15), principalement en amont des cours d'eau la Madeleine et Saint-Nicolas, ces alluvions anciennes peuvent atteindre une dizaine de mètres et se révèlent souvent grossières. À Anjoutey, celles du ruisseau de la Madeleine comprennent des éléments de socle altérés à non altérés et des galets de grès rouge provenant du Permien. Entre Leval et Petite-Fontaine, celles du ruisseau de Saint-Nicolas sont essentiellement constituées d'éléments de la série de Thann, avec une prédominance des ignimbrites rhyolitiques. Les éléments grossiers peuvent être emballés par endroits dans des limons ou des lehms pouvant se révéler localement très argileux.

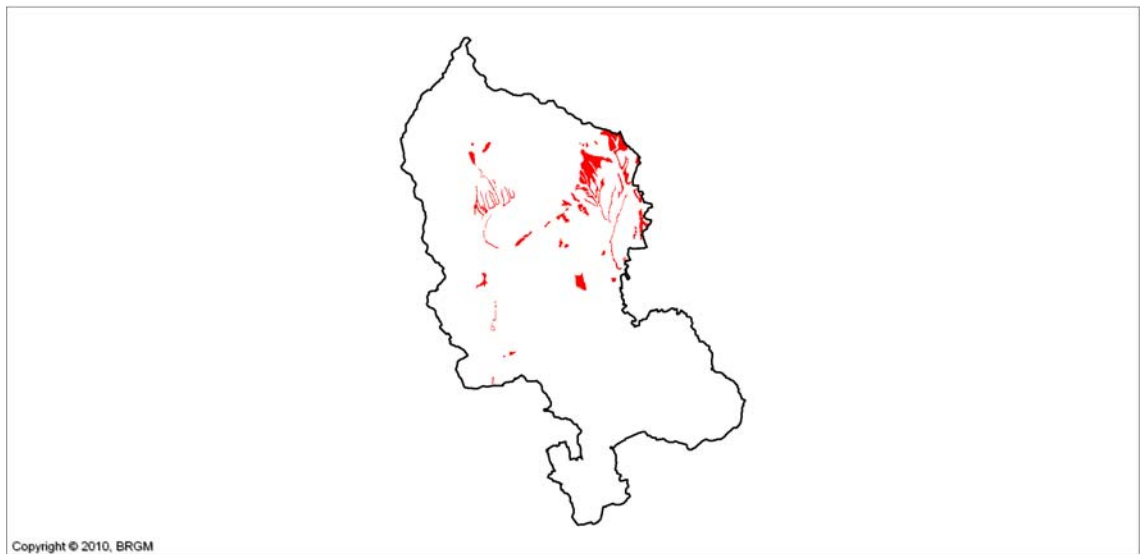


Illustration 15 : Répartition départementale des Alluvions anciennes (F)

(3) – Colluvions de fond de vallons et de versants (C)

- Surface d'affleurement : 7,98 km² (Illustration 16)
- Pourcentage de la surface départementale : 1,31 %

Les vallées latérales sont engorgées de matériaux très hétérométriques provenant, les uns du remaniement des dépôts glaciaires, les autres des apports de versant mis en place par gravité ou solifluxion quand il s'agit de dépôts grossiers (vallées à morphologie accusée du domaine recouvert par les glaces). Dans les vallons à fond plat, situés en dehors du domaine atteint par les glaces, les matériaux plus fins ont été mis en place par voie colluviale. Ils proviennent en partie du remaniement des limons d'altération.

Présent au nord et au sud du département, cet ensemble colluvial (Illustration 16), intrinsèquement hétérogène, regroupe à la fois des éléments grossiers (cailloutis, sables, silts) et des éléments fins (argiles solifluées en particulier). Il s'agit de formations de versants remaniant les divers niveaux sous-jacents en les masquant et en les rendant non identifiables. En fond de vallée, elles passent, généralement sans discontinuité aux alluvions fluviales. Mêmes grossières, ces colluvions restent souvent emballées dans une matrice très argileuse. Lorsqu'elles sont franchement argileuses, elles peuvent atteindre 5 à 6 m d'épaisseur.

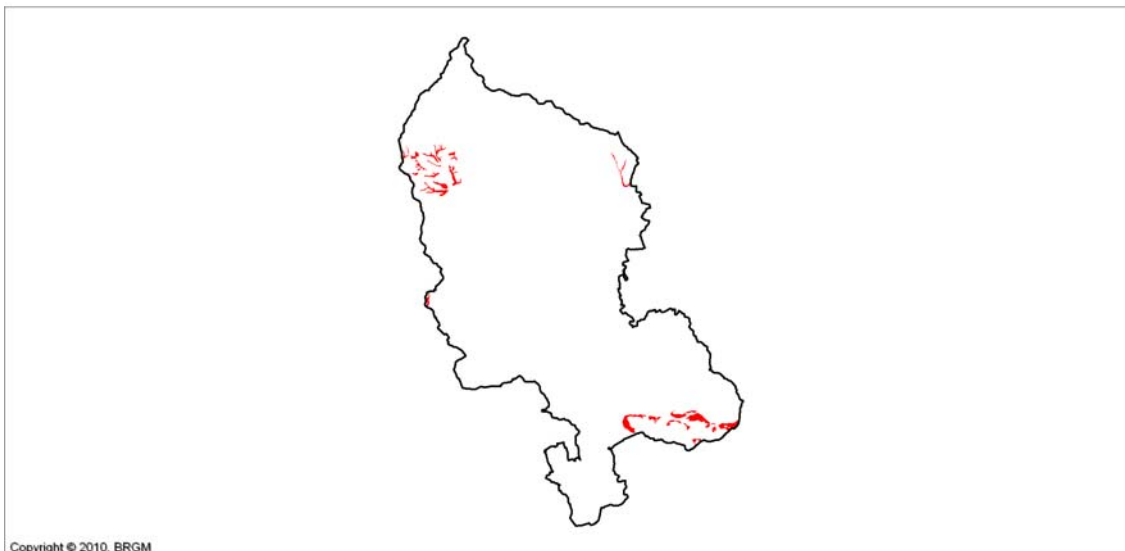


Illustration 16 : Répartition départementale des Colluvions de fond de vallons et de versants (C)

(4) – Limons des plateaux, loess, lehms (LP)

- Surface d'affleurement : 154,19 km² (Illustration 17)
- Pourcentage de la surface départementale : 25,23 %

Cette formation est essentiellement constituée par les loëss anciens, situés sur les collines loëssiques, qui font la jonction entre la Plaine d'Alsace et le Sundgau. Ils peuvent atteindre 15 m d'épaisseur. Ce sont des dépôts éoliens d'origine périglaciaire, mais ils sont enrichis en argiles par illuviation et décalcification (loëss-lehms). La composante argileuse des loëss-lehm peut alors atteindre 25 % (Shaaf-Raeth, 1979). Cet enrichissement en argiles est d'autant plus marqué que le matériau est remanié et colluvionné.

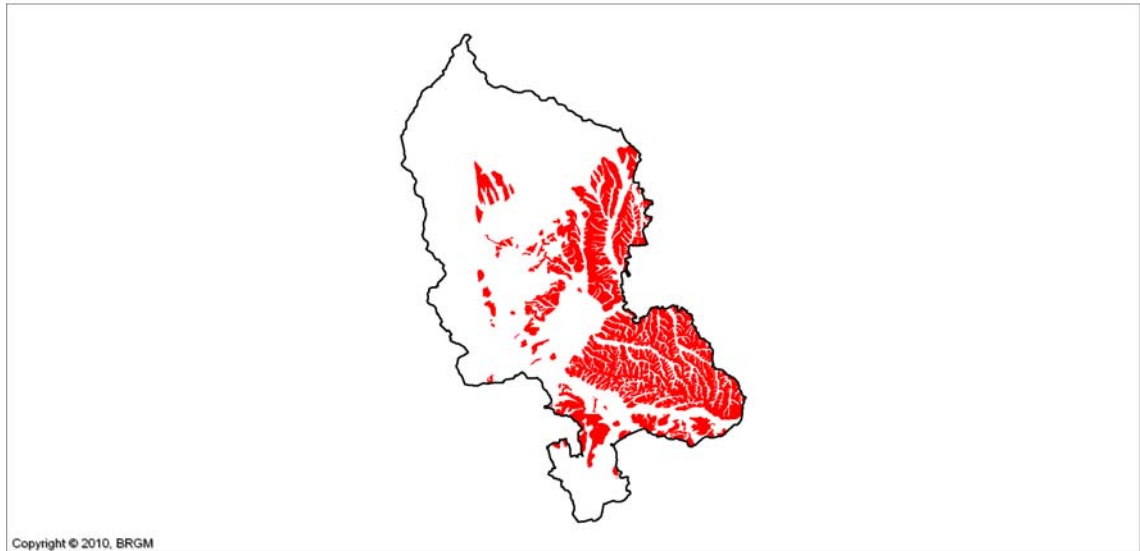


Illustration 17 : Répartition départementale des Limons des plateaux, loess, lehms (LP)

4.2.2. Formations du Céno-Quaternaire

(5) – Argiles résiduelles d'altération (R)

- Surface d'affleurement : 1,63 km² (Illustration 18)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,27 %

Il s'agit d'argiles rouges à concrétions pisolithiques ferrugineuses de 1 et 50 mm de diamètre, concentrées dans des poches et fentes karstiques (certaines d'entre elles, traversées par le pipe-line Sud-Européen, ont plus de 2 m de profondeur) ou étalées en nappe à la surface des calcaires du Jurassique supérieur ou bien remaniées dans des brèches calcaires. Ces formations altéritiques dérivent de paléosols ferralitiques d'âge éocène. L'altération sidérolithique de nature climatique et pédogénétique a provoqué une rubéfaction intense et un enrichissement en fer ainsi qu'une néogenèse phylliteuse. Le minerai de fer a été autrefois exploité à Châtenois-les-Forges, Roppe, Pérouse, etc.

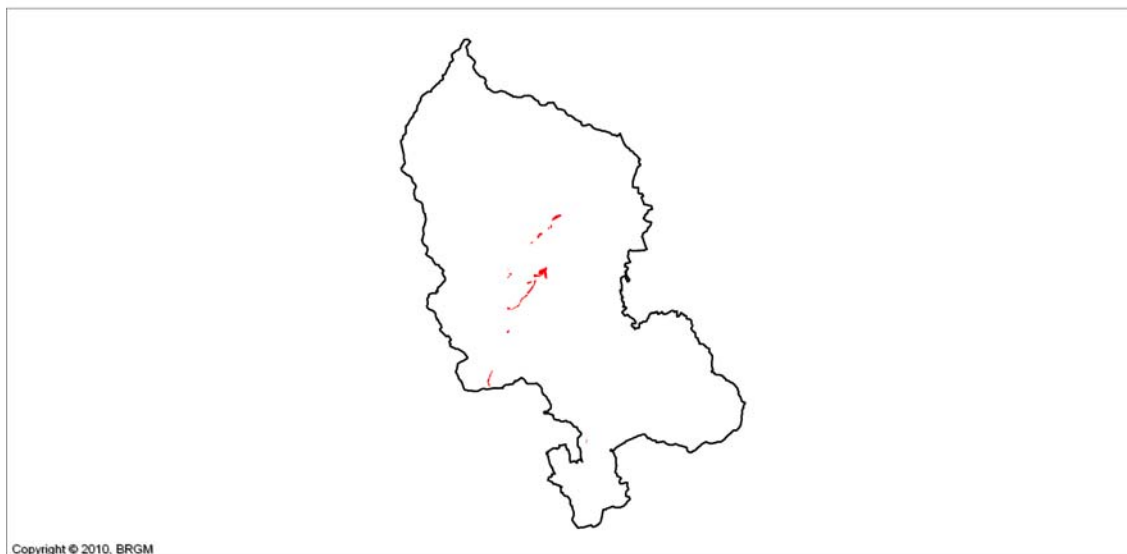


Illustration 18 : Répartition départementale des Argiles résiduelles d'altération (R)

4.2.3. Formation du Cénozoïque

(6) – Série grise du Rupélien (g1a-b)

- Surface d'affleurement : 1,28 km² (Illustration 19)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,21 %

La Série grise forme le soubassement de la plaine au sud d'une ligne approximative Sentheim – Aspach-le-Haut. Elle affleure sur les versants exposés au sud et au sud-ouest dans cette région de hautes terrasses. Au nord de la ligne Sentheim – Aspach-le-Haut, elle a été complètement érodée.

De lithologie assez constante du nord au sud de l'Alsace, la Série grise comprend quatre termes ; de haut en bas : Marnes à Cyrènes, Couches à melettes, Schistes à Amphisyle, Marnes à foraminifères. La Série grise se caractérise par ses teintes grises uniformes et l'absence de dépôts évaporitiques. Les cristaux de gypse observés en affleurement dans la Série grise sont des néoformations récentes liées à l'oxydation de la pyrite au contact d'eaux de percolation chargées en bicarbonate de calcium. Elle se caractérise également par le développement des smectites dans la fraction argileuse (Sittler, 1965). Les deux termes inférieurs ont été l'objet d'une étude détaillée dans le Bas-Rhin (Doebel et al., 1976), intéressante pour l'ensemble du Fossé, étant donné la grande homogénéité des faciès. En affleurement, ils n'ont été observés que dans une fouille temporaire à Soppe-le-Bas (Théobald, inédit), mais leur continuité est prouvée par leur présence dans tous les sondages situés dans la zone où la Série grise n'a pas été entièrement érodée. L'affleurement de référence dans la région est l'ancienne carrière d'argile de Froide-Fontaine (feuille Belfort, 444), célèbre pour sa faune ichthyologique.



Illustration 19 : Répartition départementale de la Série grise du Rupélien (g1a-b)

4.2.4. Formations du Crétacé inférieur

(7) – Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien – Kimméridgien (j5-6)

- Surface d'affleurement : 33,47 km² (Illustration 20)
- Pourcentage de la surface départementale : 5,48 %

Affleurant assez largement au sud et dans le centre-ouest du département, cet ensemble carbonaté correspond essentiellement au Séquanien (Oxfordien terminal à Kimméridgien inférieur) et est épais de 70 à 100 m.

Le faciès « séquanien » fait suite aux couches récifales du Rauracien. Les affleurements sont souvent masqués par la végétation, leur nature friable et argileuse en faisant une bonne terre céréalière. Par ailleurs, les calcaires lités du Séquanien se distinguent des autres calcaires par leurs faciès micritiques à grains très fins et leur teinte très caractéristique : beige clair (café au lait), à taches nuageuses brunes couleur tabac.

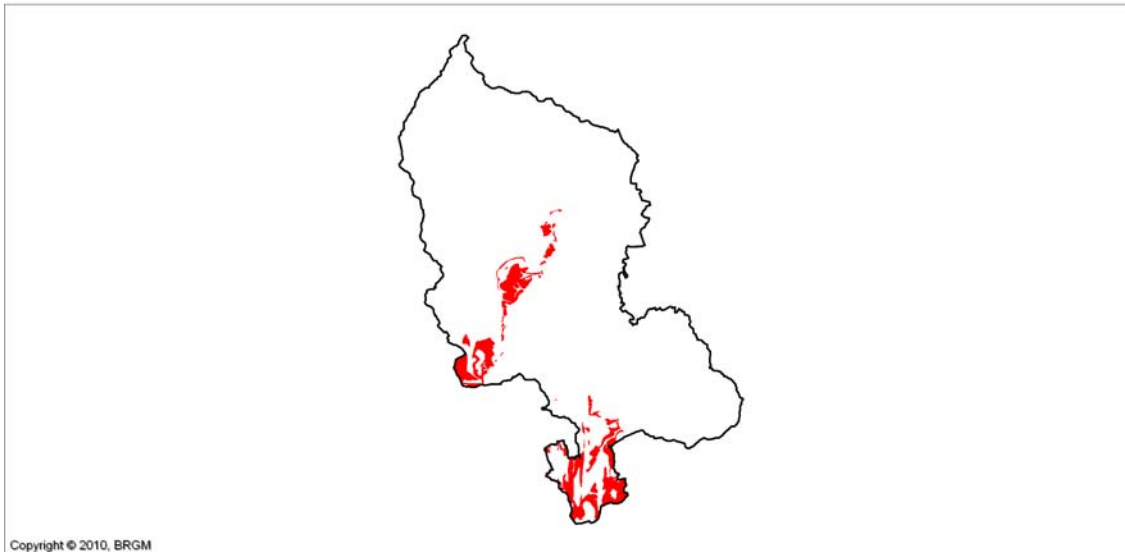


Illustration 20 : Répartition départementale des Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien – Kimméridgien (j5-6)

Dans l'ensemble, deux subdivisions peuvent être faites :

- une partie inférieure homogène avec des calcaires et calcaires marneux lités qui passent progressivement vers le haut aux Marnes à Astartes ; cet ensemble à dominante argileuse comprend des calcaires marneux, crayeux, en plaquettes avec alternances de marno-calcaires noduleux et de marnes jaunâtres, divers faciès calcaires (micritiques, grumeleux, parfois à oncolithes ou oolithiques), des marnes grises, dures et gréseuses, feuilletées en profondeur, parfois terreuses ou sableuses, renfermant des lits ou feuilletés de calcaires oolithiques ou grumeleux et des plaquettes marno-calcaires sableuses. Les plaquettes sont couvertes à certains niveaux de nombreuses astartes et présentent parfois des passées bicolores à débris de lamellibranches et restes d'oursins. Au sommet, les Marnes à Astartes (20 à 30 m) constituent un ensemble essentiellement marneux, renfermant des intercalations de calcaires fins, des plaquettes de calcaires oolithiques bleu sombre ou roussâtres, des calcaires gréseux. Les plaquettes sont souvent constituées par une lumachelle à Astartes. Au sud du département, la série est marquée par la présence d'un horizon calcaire de 1 à 2 m, composé de momies (oncolithes algaires) ;
- une partie supérieure polygénique avec des calcaires oolithiques, pisolithiques, coralligènes, noduleux ou lumachelliques et des niveaux compacts sublithographiques. Les couches calcaires qui constituent la partie supérieure du Séquanien sont régulières, de teinte beige crémeuse à points ocre caractéristiques, et forment des dalles séparées d'interlits marneux minces. Le niveau inférieur comporte des passées graveleuses, oolithiques et pisolithiques à momies, ainsi que des conglomérats calcaires et des pseudo-brèches récifales.

(8) – Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien – Oxfordien (j4-5)

- Surface d'affleurement : 10,89 km² (Illustration 21)
- Pourcentage de la surface départementale : 1,78 %

Affleurant au sud et dans le centre-ouest du département, l'essentiel de cette formation marno-calcaire correspond aux faciès dits de l'« Argovien ». L'épaisseur de cet ensemble est assez variable : en général comprise entre 40 et 160 m, avec une valeur moyenne d'environ 75 m.

Le sommet, épais en moyenne de 25 m, correspond aux Couches du Geisberg. Il s'agit de calcaires marneux bicolores ou gris, à cassure conchoïdale, disposés en bancs réguliers de 20 à 40 cm, séparés par des lits de calcaires marneux gris beige se débitant en fines plaquettes. Localement, un banc de calcaire gris lumachellique identique au banc lumachellique de base du Rauracien est situé dans le tiers supérieur de cette assise. Les fossiles restent peu nombreux dans ces niveaux.

Viennent ensuite les Couches d'Effingen, épaisses en moyenne de 30 m. Elles sont représentées par des marnes gris bleuté à concrétions blanches, jaune brunâtre à l'altération, en bancs de 1 à 2 m séparés par des bancs isolés de 20 à 30 cm de calcaires marneux gris-noir, parfois bleutés. Normalement, les bancs calcaires sont peu nombreux, minces et disposés entre de fortes épaisseurs de marnes ; mais parfois, très localement d'ailleurs, l'ensemble est plus calcaire. Ces couches sont riches en fossiles, généralement pyritisées vers la base et calcaires au sommet.

L'Argovien inférieur présente une épaisseur moyenne de 20 m. Il se présente soit sous le faciès de Birmensdorf, alternance de marnes et de calcaires marneux gris sombre, grumeleux, à spongiaires souvent silicifiés, soit sous le faciès des « calcaires hydrauliques », qui sont des marno-calcaires à grain fin, sublithographiques, gris clair souvent bleutés et blanchissant à l'air, durs à l'état frais, à cassure franche et conchoïdale, rapidement délités après exposition à l'air, séparés par des niveaux marneux gris-bleu à oursins, peu épais. Ces derniers reposent sur des « calcaires siliceux », représentés par une barre calcaire formée de bancs bien réglés séparés par des lits marneux ou délités et surmontée par des marnes. En dessous des calcaires siliceux, peuvent également être rencontrées les *Couches de passage*, constituées d'alternances de calcaires argileux et de marnes.

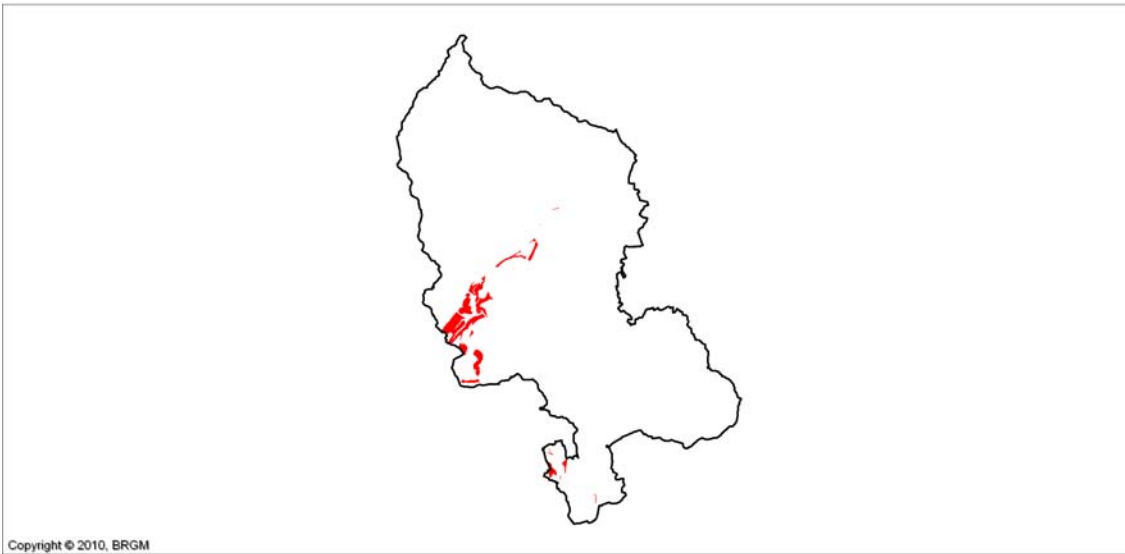


Illustration 21 : Répartition départementale des Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien – Oxfordien (j4-5)

(9) – Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur – Bathonien (j2-3)

- Surface d'affleurement : 7,88 km² (Illustration 22)
- Pourcentage de la surface départementale : 1,29 %

Affleurant dans le centre-ouest du département, cet ensemble carbonaté s'étend du Bajocien supérieur au Bathonien supérieur.

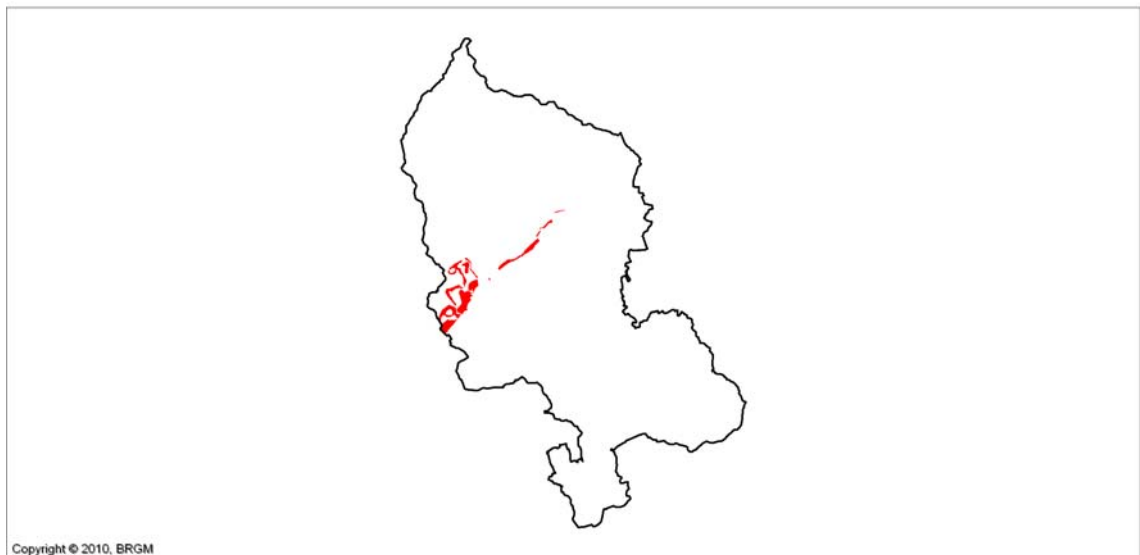


Illustration 22 : Répartition départementale du Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur-Bathonien (j2-3)

Le Bathonien regroupe différents faciès, plus ou moins carbonatés :

- La partie terminale du Bathonien est formée par des calcaires en plaquettes, cryptocristallins, riches en lamellibranches et renfermant quelques lits marneux. Il se poursuit par 35 à 40 m de calcaire compact sublithographique à passages graveleux ou noduleux, rarement oolithique ou à débris de coquilles, à cassure esquilleuse, de teinte claire, gris-rosé à jaunâtre avec taches de couleur rouille ou rosée, se présentant en bancs d'épaisseur variable (0,10 à 1 m). La stratification est parfois entrecroisée dans les niveaux graveleux. Les faciès non argileux ont, dans la mesure du possible, été isolés. On rencontre également, sur la feuille Lure (443), les Marnes à rhynchonelles de Belfort, représentées par une vingtaine de mètres de marnes et de calcaires argileux, parfois sableux, riches en lamellibranches et brachiopodes.
- Le Bathonien inférieur regroupe les Marnes de Bavilliers, marnes blanchâtres alternant avec de petits bancs calcaires, dont l'épaisseur varie entre 1 et 5 m, et les Calcaires de Mailley, calcaires fins, micritiques, de 15 à 25 m de puissance, se terminant par une surface durcie, perforée et rubéfiée, couverte d'huîtres.

Le Bajocien, quant à lui, correspond à deux principaux faciès calcaires ou marneux :

- Le Bajocien supérieur, encore appelé *Grande oolithe*, est représenté par 30 m de calcaires oolithiques tendres de teinte claire, se présentant en bancs d'épaisseur variable avec niveaux marneux, à stratifications souvent entrecroisées, se débitant en moellons ou en dalles. Au sommet existe souvent une surface perforée.
- Les *Marnes à Liostrea acuminata* ou *Marnes vésuliennes*, du Bajocien supérieur, présentent une épaisseur de 20 à 25 m, en formant une zone déprimée ou des talus en pente douce. La partie inférieure est formée de calcaires argileux et de marnes grises qui renferment *Liostrea acuminata* et *Parkinsonia subarietis*, alors que la partie supérieure (4,50 m à 5 m) est formée de calcaires argileux, noduleux, à nombreuses oncoïdes à nubéculaires avec *Pholadomya sp.*, *Liostrea acuminata*...

(10) – Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien (I4)

- Surface d'affleurement : 6,03 km² (Illustration 23)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,99 %

Affleurant également dans le centre-ouest du département, cet ensemble essentiellement marneux est représentatif du Toarcien. Sa puissance est de l'ordre de 100 à 120 m. Parfois cartographiquement regroupé avec l'Aalénien marneux, le Toarcien supérieur forme une épaisse série marneuse de 40 à 70 m où l'on peut distinguer un niveau de quelques mètres de minerai de fer dont l'épaisseur augmente du sud au nord, quelques mètres de marnes grumeleuses jaunâtres renfermant des niveaux de grosses miches calcaires, des marnes plastiques bleues à bleu-vert, pyriteuses, micacées et sableuses, très épaisses (15 m), et enfin des marnes bleues schistoïdes, très détritiques et micacées au sommet, sur 10 à 15 m d'épaisseur.

Les *Marnes micacées à nodules et marnes bleues* du Toarcien moyen et supérieur sont épaisses et affleurent rarement, car elles sont souvent masquées par des éboulis calcaires à la partie supérieure et par des éléments soliflués à leur base. Elles débutent par un banc de grosses miches calcaires, surmonté d'environ 2 m de marnes grises (rouille en surface) et de marnes à nodules de calcaire blanchâtre, puis d'une trentaine de mètres de marnes bleues plastiques débutant par des niveaux condensés ferrugineux et se terminant par un niveau de calcaires marneux roux. Ce sont des marnes qui s'altèrent facilement et qui, du fait de leur plasticité, donnent naissance à des loupes de glissement. Au sommet, une cinquantaine de mètres de marnes gris-bleu, micacées et sableuses à la partie supérieure, plus résistantes que les précédentes, donnent des talus assez raides. Cet ensemble est relativement puissant, puisque son épaisseur est comprise entre 80 et 100 m.

En ce qui concerne le Toarcien inférieur, les *Schistes à Posidonomya bronni et Harpoceras falciferum*, dits « schistes bitumineux », ont une puissance comprise entre 15 et 20 m. Ils présentent au sommet un banc discontinu de gros nodules marno-calcaires, dits « en miches de pain », et près de la base deux bancs de calcaires marneux à odeur fétide, riches en « bone beds », dits « bancs à poissons », surmontant des marnes bitumineuses. Au point de vue morphologique, le contact Toarcien – Domérien est souvent souligné par un ressaut du terrain. On y trouve également des « schistes cartons », marnes schistoïdes gris foncé renfermant de la matière organique. Ce sont en fait des marnes finement laminées formées d'une alternance de couches argileuses foncées riches en matière organique et de

couches plus grossières silteuses, carbonatées. Ces « schistes cartons » sont à l'origine de nombreux glissements de terrain.

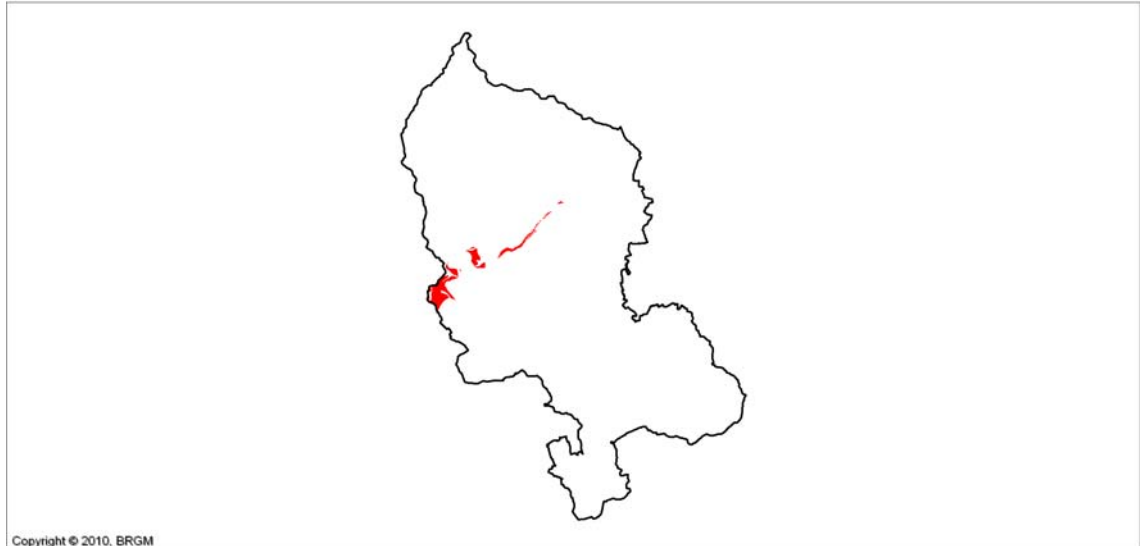


Illustration 23 : Répartition départementale des Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien (I4)

(11) – Calcaire à gryphées et calcaires marneux du Lias (I1-3C)

- Surface d'affleurement : 0,05 km² (Illustration 24)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,01 %

Affleurant très localement en limite occidentale du département, cette formation regroupe différents faciès calcaires dont l'âge est compris entre l'Hettangien et le Domérien (Pliensbachien).

Regroupant le Carixien et le Lotharingien supérieur, les *Marnes et calcaires à Productylioceras* (ammonites) constituent un complexe marno-calcaire puissant de 10 à 15 m, formant un ressaut morphologique assez nettement visible dans le paysage, résistant à l'érosion et donnant lieu à un replat structurel à faible développement. Ils comprennent de haut en bas des calcaires gris (*Calcaires à bélemnites* du Carixien, composés de 8 m de calcaires compacts gris-bleu, à cassure conchoïdale, se présentant en pavés assez réguliers formant des lits discontinus, noyés dans des marnes gris-bleu, souvent riches en belemnites), des marnes renfermant des bancs calcaires irréguliers et des calcaires gris à taches ocre (*Calcaire ocreux du Lotharingien supérieur* sur 1,5 à 2 m) renfermant des nodules phosphatés sur 1 à 2 m.

Le *Calcaire à gryphées* (huîtres), daté du Sinémurien, correspond à un calcaire gris-bleu en bancs de 0,10 à 0,50 m d'épaisseur, séparés par des lits marneux à *Gryphaea arcuata* et de grands *Arietites* (ammonites), sur une douzaine de mètres d'épaisseur. Ces calcaires à gryphées montrent des bancs noduleux, à cassure bleu-noir à noire.

L'ensemble peut être légèrement réduit, et devient alors plus détritique, parfois ferrugineux.

Les faciès de l'Hettangien varient quant à eux rapidement : l'étage est représenté tantôt par un calcaire bleu, riche en lamellibranches, tantôt par des marnes schistoïdes noirâtres, bitumineuses. Le faciès marneux peut se localiser au sommet ou envahir tout l'étage.



Illustration 24 : Répartition départementale des Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias) (11-3C)

4.2.5. Formations du Trias

(12) – Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois du Rhétien (t7b)

- Surface d'affleurement : 0,17 km² (Illustration 25)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,03 %

Affleurant par petits lambeaux dans le centre du département, cet ensemble regroupe des faciès marneux et des grès. Il est en général représenté de haut en bas par 1 à 2 m de marnes brun chocolat à rouges (dites *Marnes de Levallois*, ou *Argiles de Levallois*), puis par 7 à 10 m de grès massifs altérés jaunâtres, conglomératiques et micacés, quelquefois ferrugineux en partie supérieure, et enfin 7 à 13 m de marnes schistoïdes micacées, noirâtres, renfermant des bancs de grès. Les grès rhétiens constituent un excellent réservoir d'eau donnant naissance à des sources à débit faible certes, mais régulier et fournissant une eau de bonne qualité.

Les *Marnes de Levallois* correspondent à des lits ou joints schisteux noirs, altérables à l'air sous la forme de paillettes luisantes, et qui peuvent prendre latéralement une importance prédominante par rapport au faciès gréseux, soit au sommet, soit à la

base de l'étage, où elles se présentent alors en bancs de marnes schistoïdes où peuvent être inclus des passées ou filets gréseux.

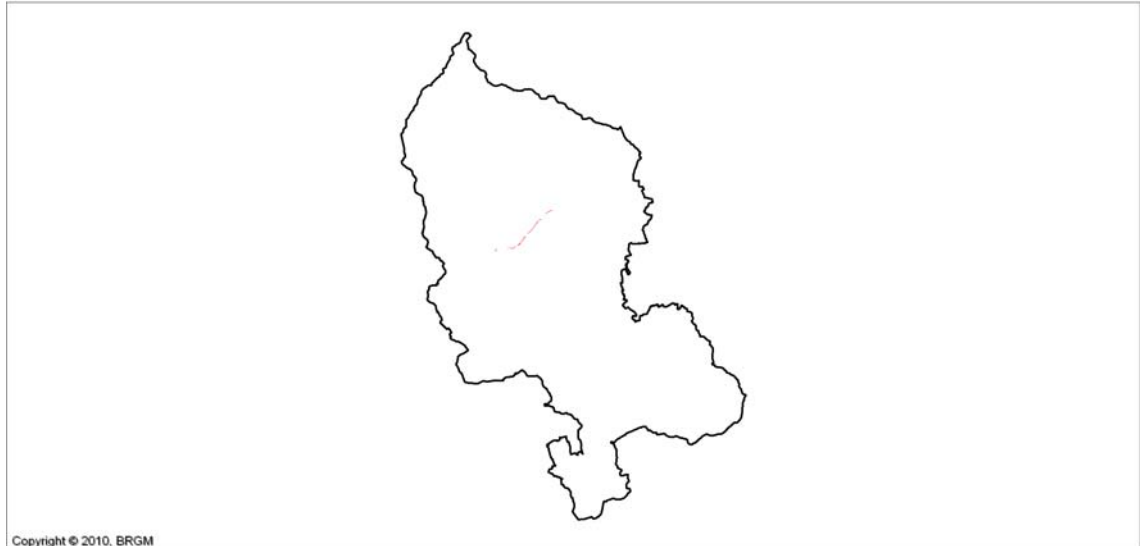


Illustration 25 : Répartition départementale des Marnes et grès micacés, Marnes de Vallois du Rhétien (t7b)

(13) – Marnes irisées et dolomies du Keuper (t5-6)

- Surface d'affleurement : 0,50 km² (Illustration 26)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,08 %

Affleurant par petits lambeaux dans le centre du département, cette formation rassemble des faciès représentatifs du Keuper, connus sous l'appellation de Marnes irisées :

- Les *Marnes irisées inférieures*, datant du Keuper inférieur à moyen, correspondent à 50 à 100 m de marnes renfermant localement des gisements de sel gemme et de gypse, autrefois exploités. Ce puissant ensemble, assez imperméable, est constitué de marnes et schistes largement prédominants, finement lités et sans fossiles, de teinte rougeâtre au sommet, puis alternativement brun-rouge brique à lilas, vert, vert olive, gris clair à gris sombre. Elles sont associées à des bancs minces, des plaquettes et des nodules dolomitiques, ainsi qu'à des cargneules, rognons plus ou moins siliceux et à des concrétions plus ou moins limoniteuses. On y trouve également, interstratifiés en particulier dans la partie supérieure, des amas, couches et lentilles plus ou moins épais, discontinus et ramifiés, d'évaporites, anhydrite et gypse.
- Les *Marnes irisées moyennes* correspondent à un ensemble représentatif du Keuper moyen, et constitué de dolomies, de marnes bariolées et de grès à roseaux. Les dolomies, épaisses de 10 à 18 m, sont grenues, jaune paille à rose, à petites taches brunes. Elles se présentent en bancs réguliers, épais de 15 à 30 cm, se débitant en moellons, avec cassure conchoïdale. Les marnes bariolées moyennes, épaisses de 8 à 15 m, sont constituées de marnes schisteuses aux tons

variés du rouge au noir, et de schistes foncés chargés de pyrite ou de gypse. Enfin, les grès à Roseaux, épais de 3 à 19 m, sont des grès gris verdâtre, argileux, à grain fin, tendres, alternant avec des pélites, des marnes et des lignites. Leur développement est très irrégulier et leur existence est difficile à mettre en évidence.

- Les *Marnes irisées supérieures* correspondent à une formation épaisse de 30 m, en général constituée de 18 à 20 m de marnes vertes au sommet, avec quelques petits bancs de dolomie, puis d'une quinzaine de mètres à la base de marnes rouges avec horizons grumeleux et gypsifères, parfois absentes au nord-ouest.

Le Lettenkohle (Keuper inférieur) correspond à un ensemble appelé *Calcaire coquillier principal*, sous la forme de 60 à 65 m de marno-calcaires à dominantes calcaires et dolomitiques où il est possible de distinguer, de haut en bas, des dolomies avec marnes bariolées interstratifiées, noires ou grises se terminant par un banc dolomitique clair, à grain fin, à cassure conchoïdale (dit *Dolomie-limite*), des couches à Cératites formées de bancs calcaires ou dolomitiques, épais de 0,10 à 0,30 m alternant avec des marnes grises, et des couches à entroques (environ 10 m de calcaires souvent dolomitiques en gros bancs). Le Lettenkohle donne lieu à des circulations karstiques parfois importantes. La disposition normale des couches est parfois perturbée par des affaissements locaux résultant de la dissolution des sels inclus dans les marnes bariolées sous-jacentes. Dans la mesure du possible, les couches purement calcaires et dolomitiques du *Calcaire coquillier principal* n'ont pas été retenues comme argileuses :

- l'horizon supérieur, correspondant à la Dolomie-limite, de très faible épaisseur (0,5 à 2 m maximum), est constitué par un banc de calcaire dolomitique jaune, jaune paille à jaune-brun, en dalles diaclasées, celluleuses ; son toucher est souvent finement gréseux et elle prend une légère patine rouille à l'affleurement. On y trouve de nombreuses géodes de calcite et, plus rarement, de petits nodules de pyrite hématitisée. La surface de ces dalles est en général couverte de débris roulés d'écaillés et ossements de poissons et reptiles, alors que les lamellibranches et brachiopodes sont rares et très mal conservés ;
- l'horizon moyen, appelé Schistes ou Marnes bariolées de la Lettenkohle comprend, sur 2 à 4 m tout au plus, un ensemble de petits lits de pélite dolomitique, fissiles, à débit parallélépipédique, gréseux ou schisteux, gris-vert à blanchâtre à l'affleurement, et bleuâtre en profondeur, parfois avec des vermiculures pyriteuses et comportant un épisode local de schistes bariolés brun-rouge et gris-vert. Ces pélites peuvent passer à des grès fins micacés, blancs à roussâtres, parfois riches en débris végétaux charbonneux, ou à des argiles feuilletées bleues, avec «terriers» contournés à remplissage de pyrite hématitisée ;
- l'horizon de base, ou dolomie inférieure, est difficilement discernable car il semble qu'il y ait continuité avec le massif dolomitique principal sous-jacent. Il comporte un ensemble de petits bancs réguliers de calcaire dolomitique jaune, bleuâtre ou blanchâtre, gélif, poreux et caverneux, parfois rubané de schistes gris sombre, avec débris de Lamellibranches. Cet horizon a dans la mesure du possible été isolé et considéré comme non argileux.

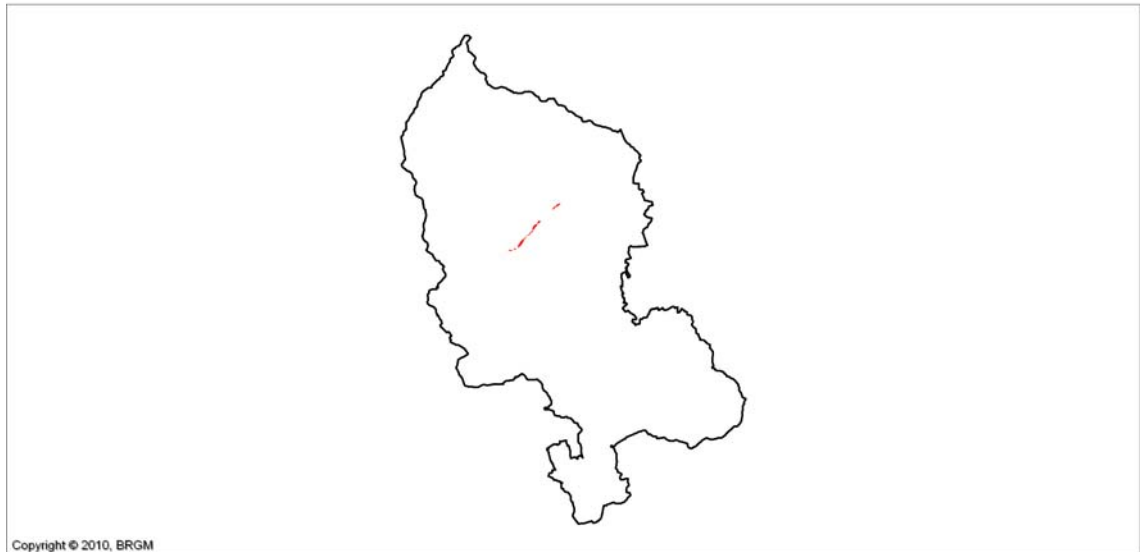


Illustration 26 : Répartition départementale des Marnes irisées et dolomies du Keuper (t5-6)

(14) – Couches grises et couches rouges du Muschelkalk (t4)

- Surface d'affleurement : 0,49 km² (Illustration 27)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,08 %

Affleurant modestement dans le centre du département, cet ensemble, anciennement désigné par le terme de Muschelkalk marneux, en raison de la faible dureté et de la propension au fluage de ses principaux constituants, correspond au groupe de l'anhydrite, dans lequel trois séquences successives peuvent être distinguées.

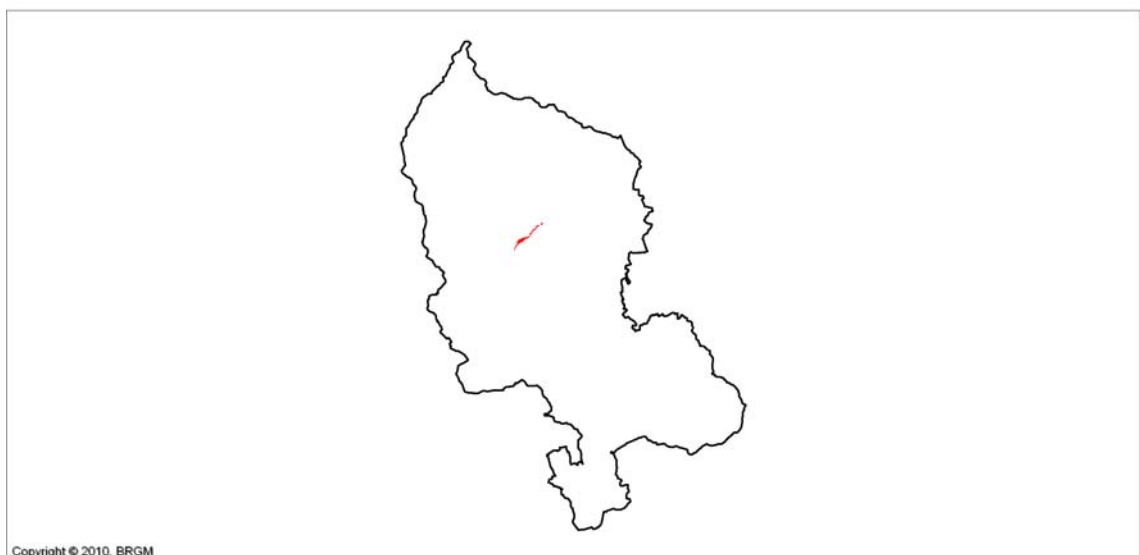


Illustration 27 : Répartition départementale des Couches grises et couches rouges du Muschelkalk (t4)

La partie supérieure correspond aux *Couches blanches*, constituées de calcaire dolomitique crayeux, blanchâtre à jaune crème, de teinte très claire, tendre, poreux, à passages caverneux, et gypseux en profondeur. Sur une épaisseur de 5 à 7 m, elles constituent avec les horizons sus-jacents un réservoir aquifère d'autant plus minéralisé qu'il est capté plus profondément. Situées à la base de la corniche dolomitique ou des calcaires du Muschelkalk supérieur, les affleurements sont presque toujours masqués et ne peuvent s'observer qu'occasionnellement. Peu argileux, ces faciès ont été exclus des formations argileuses lorsqu'ils étaient cartographiquement distincts des autres séquences.

Ensuite viennent les *Couches grises*, représentées par des marnes schisteuses plus ou moins dolomitiques, de teinte grise à gris-verdâtre dominante, imperméables, se délitant aisément à l'air et comprenant des lits, plaquettes et bancs de dolomie et de gypse, ainsi que des niveaux à silixites grises et des brèches argileuses à ciment carbonaté identiques à celles du Keuper inférieur. En surface, cette formation est affectée de fréquents et importants phénomènes de solifluxion et de cryoturbation, ce qui la rend difficilement observable. Elle est puissante de 6 à 15 m et présente d'abondantes couches de gypse, interstratifiées avec les marnes.

(15) – Grès et marnes du Muschelkalk (t3)

- Surface d'affleurement : 1,04 km² (Illustration 28)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,17 %

Affleurant dans le centre du département, cet ensemble, daté du Muschelkalk moyen et inférieur, surmonte les grès du Buntsandstein supérieur (grès bigarrés : *Grès à Voltzia*, *Couches intermédiaires...*). Il est épais d'une dizaine de mètres et se caractérise par la présence de marnes gréseuses, micacées et ondulées, surmontant des grès fins en bancs bien lités, souvent dolomités, jaune à brun-roux ou gris verdâtre, piquetés de taches noires d'oxyde de manganèse, d'aspect poreux, parfois anciennement exploités comme moellons.

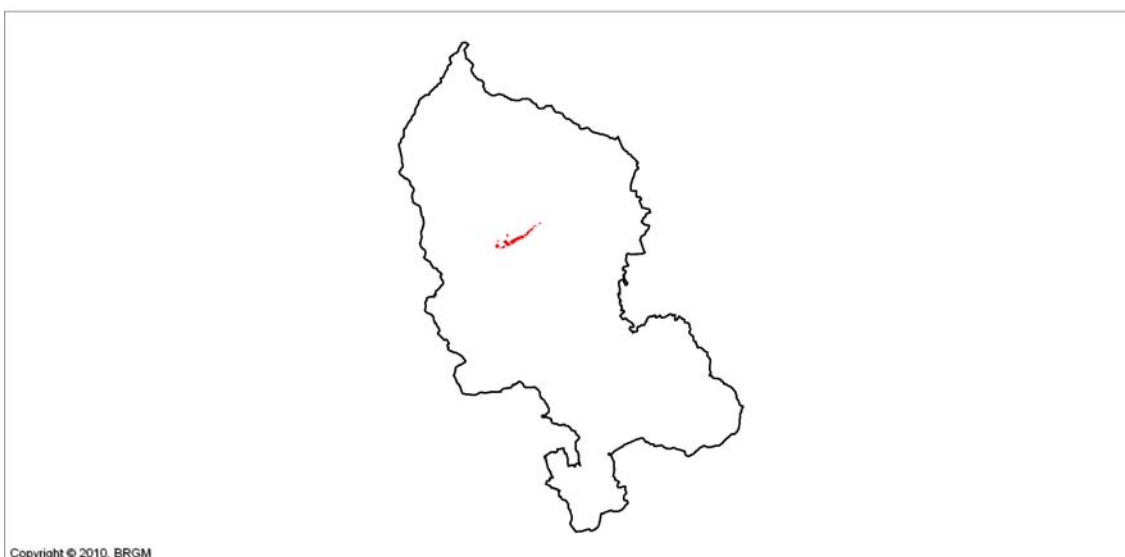


Illustration 28 : Répartition départementale des Grès et marnes du Muschelkalk (t3)

Les grès fins, épais d'une quinzaine de mètres, se structurent en petits bancs et sont séparés par des lits plus silteux et plus argileux. Ils renferment des fossiles marins (lamellibranches, gastéropodes peu abondants, mais formant parfois de véritables lumachelles). C'est un faciès franchement marin indiquant que la transgression amorcée à l'époque des grès argileux s'est accentuée. Ils alternent parfois avec des schistes argileux, sableux, également micacés, de teinte rouge dominante.

Les *Marnes ondulées de Saulnot*, parfois accompagnées de *Dolomie à Myophoria orbicularis* (bivalves) de l'Anisien inférieur, se présentent sous la forme de marnes et calcaires dolomitiques finement laminés de couleur gris clair. Cette formation est rarement visible à l'affleurement, mais peut atteindre entre une dizaine et une vingtaine de mètres d'épaisseur.

4.2.6. Formation du Paléozoïque

(16) – Silts et pélites rouges du Permien (r)

- Surface d'affleurement : 10,27 km² (Illustration 29)
- Pourcentage de la surface départementale : 1,68 %

Affleurant assez largement dans la partie nord du département, cette formation présente une puissance comprise entre 150 et 450 m. Cette unité très argileuse constitue les pentes de nombreux reliefs, en donnant une morphologie fortement éoussée. Constituée de silts et de pélites de couleur rouge très marquée, elle contient quelques bancs de grès interstratifiés et des traces de carbonates.

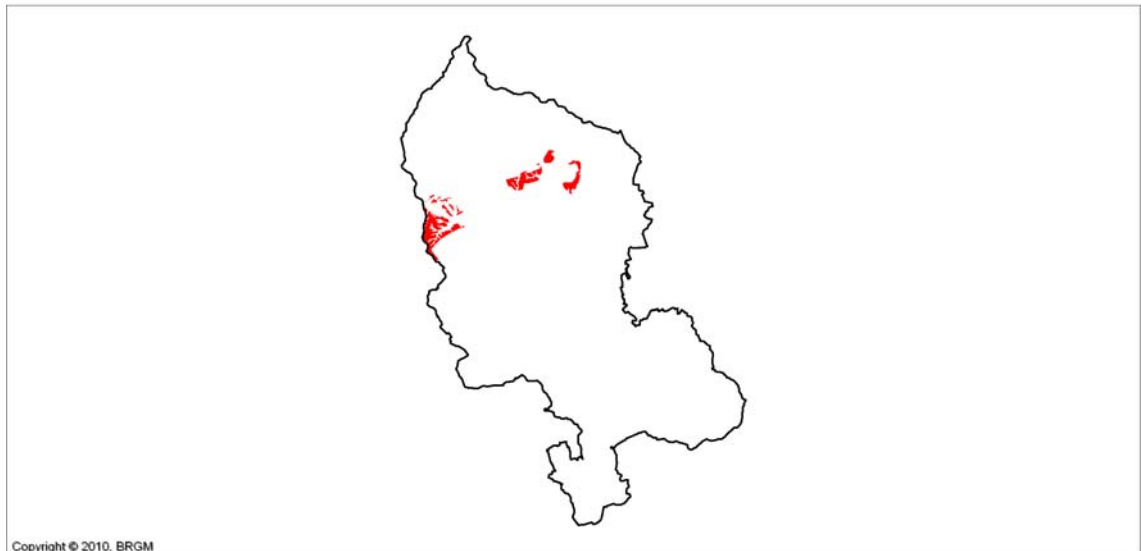


Illustration 29 : Répartition départementale des Silts et pélites rouges du Permien (r)

4.3. REMARQUES SUR LES FORMATIONS NON ARGILEUSES

Parmi les formations qui sont considérées comme non argileuses, certaines peuvent néanmoins contenir des lentilles ou des poches argileuses ou marneuses d'extension limitée. Elles n'ont pas été prises en compte à l'échelle de la cartographie départementale. Néanmoins, ces lentilles ou poches argileuses peuvent être localement à l'origine de sinistres, mais cela ne justifie pas qu'il faille considérer l'ensemble de la formation comme sujette au phénomène de retrait-gonflement.

5. Caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique des formations retenues

5.1. CRITÈRES DE HIÉRARCHISATION

5.1.1. Critères retenus

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

En effet, d'autres critères de susceptibilité, 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 16 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 16 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 ligne de compte, puisque les formations argileuses peu épaisses présentent un potentiel de retrait ou de gonflement moindre que les formations puissantes.

Par convention, la note maximale est attribuée à une argile ou une marne épaisse et continue et la note minimale à une formation hétérogène, présentant des termes argileux non prédominants et discontinus, par exemple sous forme de poches ou de lentilles. Cette caractérisation lithologique des formations est établie sur la base de l'expertise du géologue régional et ne peut être totalement dépourvue d'une certaine subjectivité dans son appréciation. Sa valeur relative en vue d'une hiérarchisation des formations argileuses est cependant difficilement contestable. Le barème d'attribution des notes lithologiques est le suivant (Illustration 30) :

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

Illustration 30 : Notes attribuées aux formations argileuses en fonction des caractéristiques lithologiques

5.2.2. Caractérisation lithologique

Sur la base de ces critères, le tableau de l'illustration 31 permet de synthétiser les différentes notes lithologiques attribuées aux 16 formations potentiellement sujettes au retrait-gonflement, à partir :

- des descriptions issues des notices des cartes géologiques à 1/50 000 ;
- de la connaissance du géologue régional des faciès lithologiques du département ;
- des coupes lithologiques, issues de la Banque des données du Sous-Sol (BSS) et de rapports d'études géotechniques, qui apportent des informations ponctuelles sur la partie superficielle des formations géologiques du département.

Code	Notation	Formation	Note lithologique
1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel)	1
2	F	Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)	2
3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	3
4	LP	Limons des plateaux, loess, lehms (Quaternaire)	2
5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	3
6	g1a-b	Série grise (Rupélien)	4
7	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimméridgien)	1
8	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien - Oxfordien)	2
9	j2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	2
10	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	4
11	l1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)	2
12	t7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)	2
13	t5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	3
14	t4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)	3
15	t3	Grès et marnes (Muschelkalk)	2
16	r	Silts et pélites rouges (Permien)	3

Illustration 31 : Notes lithologiques des 16 formations argileuses retenues

5.3. CRITÈRE MINÉRALOGIQUE

5.3.1. Définition du critère minéralogique et barème

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

Les bornes retenues pour la classification minéralogique, basée sur le pourcentage de minéraux gonflants (smectites, vermiculites et interstratifiés) contenus dans la phase argileuse du matériau, sont respectivement 25 %, 50 % et 80 %. Une note minéralogique a été attribuée à chacune de ces formations en utilisant le barème suivant (Illustration 32).

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

Illustration 32 : Notes attribuées aux formations argileuses en fonction du pourcentage de minéraux gonflants

5.3.2. Caractérisation minéralogique

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

Les éléments tirés de la bibliographie sur ce thème sont inégalement répartis selon les formations considérées. La plupart des données recueillies pour le Territoire de Belfort proviennent des notices des cartes géologiques à 1/50 000.

Ces données ont été complétées par des analyses minéralogiques de la fraction argileuse par diffractométrie des rayons X, effectuées sur plusieurs échantillons recueillis par le BRGM dans le cadre des études similaires menées dans les

départements voisins du Doubs (25), de la Haute-Saône (70), des Vosges (88) et du Haut-Rhin (68), ainsi que des départements de la haute-Marne (52) et du Jura (39).

Concernant les formations superficielles, les données minéralogiques sont plus rares. Ces formations sont par définition très hétérogènes et ont pour origine principale la formation sous-jacente, dont elles reprennent ainsi les caractéristiques. Il faudrait, pour les caractériser pleinement, multiplier les analyses, en de nombreux points et à différentes profondeurs, ce qui exigerait un budget dépassant largement le cadre de ce projet.

Les données exploitées sur les différentes formations sont résumées ci-après (Illustration 33), sachant que le nombre d'échantillons analysés n'est pas toujours clairement exprimé dans la bibliographie scientifique consultée. L'illustration 34 résume les notes minéralogiques attribuées aux 16 formations à composante plus ou moins argileuse.

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques
1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel)	2	Doubs : Analyse BRGM, éch. 18 : illite (15 %), kaolinite (20 %), vermiculite (30 %), interstratifiés illite/smectite R1 (10 %), interstratifiés illite/smectite R0 (25 %).
2	F	Alluvions anciennes	2	Doubs : Analyse BRGM, éch. 6 : illite (15 %), kaolinite (35 %), vermiculite (20 %), interstratifiés illite/smectite R1 (30 %).
3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	2	Doubs : Analyse BRGM, éch. 16 : illite (45 %), kaolinite (20 %), vermiculite (10 %), interstratifiés illite/smectite R1 (25 %).
4	LP	Limens des plateaux, loess, lehms (Quaternaire)	3	Doubs : Analyse BRGM, éch. 8 : illite (15 %), kaolinite (30 %), vermiculite (40 %), interstratifiés illite/smectite R1 (15 %). Haut-Rhin : Analyses, moyenne sur 63 éch. : illite (20 %), kaolinite (23 %), chlorite (2 %), minéraux argileux gonflants (55 %).

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques
5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	2	<p>Doubs : Analyses BRGM : éch. 2 : illite (30 %), kaolinite (30 %), vermiculite (15 %), interstratifiés illite/smectite R1 (25 %). éch. 3 : illite (15 %), kaolinite (25 %), vermiculite (20 %), interstratifiés illite/smectite R1 (40 %). éch. 4 : illite (20 %), kaolinite (35 %), interstratifiés illite/smectite R1 (35 %), interstratifiés illite/smectite R0 (10 %). éch. 7 : chlorite (5 %), illite (15 %), kaolinite (30 %), vermiculite (40 %), interstratifiés illite/smectite R1 (15 %).</p> <p>Haute-Saône : Analyse BRGM : vermiculite + interstratifié smectite/illite (8 %), illite et/ou micas (40 %), kaolinite (52 %).</p>
6	g1a-b	Série grise (Rupélien)	2	<p>Doubs : Analyse BRGM éch. 13 : illite (25 %), kaolinite (15 %), vermiculite (30 %), interstratifiés illite/smectite R1 (15 %), interstratifiés illite/smectite R0 (15 %).</p> <p>Haute-Saône : Feuille 470 : - Concernant la phase silto-argileuse du Complexe saumon du Dijonnais : montmorillonite et kaolinite. Analyse BRGM : vermiculite (32 %), illite et/ou micas (16 %), kaolinite + chlorite (52 %).</p> <p>Haut-Rhin : Analyses, moyenne sur 112 éch. : illite (13 %), kaolinite (47 %), chlorite (12 %), minéraux argileux gonflants (27 %).</p>
7	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimméridgien)n	1	<p>Haute-Saône : Feuille 439 : - Concernant les niveaux marnes des Faciès calcaires dits «séquanien» : illite et kaolinite. - Concernant les niveaux marnes des Calcaires jaunâtres dolomitiques ou glauconieux : kaolinite, illite, interstratifiés. - Concernant les niveaux marnes des Calcaires et marnes à <i>Exogyra Virgula</i> : kaolinite, illite, interstratifiés. Feuille 470 : - Concernant les joints calcaréo-argileux des Calcaires compacts piquetés de la Charmette, dans les Faciès calcaires dits «séquanien» : kaolinite et illite. - Concernant les argiles des Calcaires de Beaumont-sur-Vingeanne, rognonneux, dolomitiques ou glauconieux : illite et kaolinite. - Concernant les niveaux marnes ou calcaréo-argileux des marnes et calcaires lumachelliques du Kimméridgien supérieur : illite et kaolinite.</p> <p>Jura Mouchet (1995) : Analyse de deux échantillons : proportions similaires de mica/illite et de kaolinite, peu d'interstratifiés.</p>

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques
8	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien - Oxfordien)	2	<p>Haute-Saône : Feuille 439 : - Concernant la phase non calcaire de l'ensemble calcaréo-marneux dit « Argovien », essentiellement argileuse : illite, kaolinite, interstratifiés. - Concernant les argiles du Complexe calcaire récifal dit « Rauracien » : illite et interstratifiés.</p> <p>Feuille 470 : - Concernant les argiles de l'ensemble calcaréo-argileux dit « Argovien » : illite et interstratifiés illite-vermiculite. Les termes les plus élevés renferment en plus de la kaolinite. - Concernant les passées calcaréo-argileuses des Calcaires silteux à Polypiers et Cidaris du Complexe calcaire récifal dit « Rauracien » : illite et interstratifiés illite-vermiculite à la base, se chargeant en kaolinite vers le haut. Vers le Nord-Ouest, ces passées calcaréo-argileuses semblent essentiellement constituées d'illite.</p> <p>Jura : Pellenard et Deconinck (2006) : - Oxfordien moyen (Crotenay) : au sommet : interstratifiés irréguliers illite/smectites (~80 %), illite (~20 %). vers la base : illite (~45 %), interstratifiés réguliers illite/smectites (~30 %), kaolinite (~15 %) et chlorite (~5 %). - Oxfordien moyen (Creux du Giron) : interstratifiés réguliers illite/smectites (~30 %), illite (~30 %), interstratifiés irréguliers illite-smectites (~20 %), interstratifiés chlorite/smectites (~15 %), kaolinite (~5 %), chlorite (traces). - Callovien supérieur (Crotenay) : Interstratifiés réguliers illite/smectites (~50 %), illite (40 %), kaolinite (~5 %), chlorite et interstratifiés à base de chlorite (~5 %).</p>
9	j2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	1	<p>Haute-Marne : Analyse : 18 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite).</p>
10	I4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	2	<p>Doubs : Analyses BRGM éch. 1 : illite (35 %), kaolinite (25 %), vermiculite (5 %), interstratifiés illite/smectite R1 (20 %), interstratifiés illite/smectite R0 (15 %). éch. 9 : illite (35 %), kaolinite (35 %), vermiculite (15 %), interstratifiés illite/smectite R1 (15 %). éch. 17 : illite (25 %), kaolinite (35 %), vermiculite (15 %), interstratifiés illite/smectite R1 (25 %).</p> <p>Jura : Feuille 555 : - 17-8 : Illite (40 %), kaolinite (35 %), montmorillonite (traces). Broquet (2004) : Phase argileuse composée d'illite dominante, avec kaolinite et smectites en faible proportions.</p> <p>Haute-Marne / Vosges : Analyses : 20 à 25 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite), sur 2 analyses.</p>

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques
11	I1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)	2	<p>Doubs : Analyse BRGM, éch. 14 : illite (50 %), kaolinite (10 %), vermiculite (20 %), interstratifiés illite/smectite R1 (20 %).</p> <p>Jura : Feuille 555 : - I5-6 : illite (35 %), kaolinite (32 %), montmorillonite (traces).</p> <p>Haute-Saône : Analyse RFF : - 1 analyse dans les marnes et argiles grises du Lotharingien : · quartz (85 %), anorthoclase (feldspath, 3 %), montmorillonite (6 %), illite (3 %), clinocllore (chlorite, 3 %). Analyse BRGM : interstratifié smectite/chlorite + interstratifié illite/smectite (19 %), illite et/ou micas (52 %), kaolinite (29 %).</p> <p>Haute-Marne / Vosges : Analyses : 5 à 30 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite), sur 2 analyses.</p>
12	t7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)	1	<p>Haute-Saône : Analyse BRGM : vermiculite (14 %), illite et/ou micas (14 %), kaolinite + chlorite (72 %).</p> <p>Haute-Marne : Analyses : 20 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite).</p>
13	t5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	3	<p>Doubs : Analyse BRGM, éch. 15 : chlorite (5 %), illite (60 %), vermiculite (20 %), interstratifiés illite/smectite R1 (15 %).</p> <p>Haute-Saône : Analyses RFF : - 2 analyses dans les marnes bariolées du Keuper : · fraction argileuse (59 %) composée de corrensité (interstratifiés réguliers chlorite vermiculite ou smectite, 66 %), d'illite (28 %) et de chlorite (6 %). · fraction argileuse (80 %) composée de corrensité (interstratifiés réguliers chlorite vermiculite ou smectite, 64 %), d'illite (29 %) et de chlorite (7 %).</p> <p>- 11 analyses dans les marnes irisées inférieures du Keuper : · fraction argileuse (59 %) composée de corrensité (75 %), d'illite (20 %) et de chlorite (5 %). · fraction argileuse (65 %) composée de corrensité (57 %), d'illite (36 %), de chlorite (7 %). · quartz (20 %), calcite (26 %), montmorillonite (34 %), illite (13 %), kaolinite (7 %). · quartz (18 %), calcite (29 %), montmorillonite (41 %), illite (15 %), kaolinite (4 %). · fraction argileuse (54 %) composée de corrensité (72 %), d'illite (24 %), de chlorite (4 %).</p>

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques
14				<ul style="list-style-type: none"> · fraction argileuse (75 %) composée de corrensite (62 %), d'illite (35 %), de chlorite (3 %). · fraction argileuse (63 %) composée de corrensite (63 %), d'illite (33 %), de chlorite (4 %). · fraction argileuse (65 %) composée de corrensite (59 %), d'illite (35 %), de chlorite (6 %). · fraction argileuse (53 %) composée de corrensite (52 %), d'illite (44 %), de chlorite (4 %). · calcite (11 %), illite (19 %), montmorillonite (70 %) · quartz (30 %), calcite (9 %), anorthoclase (feldspath, 1 %), montmorillonite (49 %), illite (7 %), clinochlore (chlorite, 4 %). <p>Analyse BRGM : interstratifié chlorite/smectite (68 %), illite et/ou micas (19 %), kaolinite (13 %).</p>
	t4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)	3	<p>Haute-Saône : Analyse BRGM (Échantillon prélevé à Quers) : tosudite (interstratifié régulier chlorite/smectite, 71 %), illite et/ou micas (29 %).</p> <p>Haute-Marne : Analyses : 48 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite).</p>
	t3	Grès et marnes (Muschelkalk)	2	<p>Haute-Saône : Analyse RFF : - 1 analyse dans les calcaires coquilliers du Muschelkalk : · quartz (29 %), dolomite (69 %), calcite (1 %), microcline (feldspath, 6 %), clinochlore (chlorite, 1 %), illite (1 %).</p> <p>Analyses BRGM : Échantillon prélevé à Lomont : vermiculite (22 %), illite et/ou micas (60 %), kaolinite (18 %). Échantillon prélevé à Luxeuil-les-Bains : vermiculite (57 %), illite et/ou micas (17 %), kaolinite (26 %). Échantillon prélevé à Luxeuil-les-Bains : vermiculite (50 %), illite et/ou micas (11 %), kaolinite (39 %).</p>
16	r	Silts et pélites rouges (Permien)	1	<p>Haute-Saône : Analyse BRGM (Échantillon prélevé à Courmont) : vermiculite (18 %), illite et/ou micas (55 %), kaolinite (27 %).</p> <p>Feuille 443 : - Concernant le Permien : abondance d'illite.</p>

Illustration 33 : Données et notes minéralogiques des 16 formations argileuses retenues

Code	Notation	Formation	Note minéralogique
1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel)	2
2	F	Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)	2
3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	2
4	LP	Limons des plateaux, loess, lehms (Quaternaire)	3
5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	2
6	g1a-b	Série grise (Rupélien)	2
7	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimméridgien)	1
8	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien - Oxfordien)	2
9	j2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	1
10	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	2
11	l1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)	2
12	t7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)	1
13	t5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	3
14	t4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)	3
15	t3	Grès et marnes (Muschelkalk)	2
16	r	Silts et pélites rouges (Permien)	1

Illustration 34 : Notes minéralogiques des 16 formations argileuses retenues

5.4. CRITÈRE GÉOTECHNIQUE

5.4.1. Définition du critère géotechnique et barème

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

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

Les expertises de sinistres qui ont pu être 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. Les analyses sédimentométriques, qui permettraient de déterminer la fraction argileuse du matériau (inférieure à 2 µm), et les analyses aux rayons X, permettant de distinguer le pourcentage de minéraux gonflants sont plus rarement réalisées ;
- caractériser l'état du sol, et notamment son état de dessiccation en effectuant des mesures de teneurs en eau, généralement à plusieurs profondeurs. En comparant ces valeurs avec les limites d'Atterberg du matériau, il est possible de savoir dans quel état de consistance se trouve le matériau in situ (état solide avec ou sans retrait, plastique ou liquide). D'autres essais peuvent également être mis en œuvre, comme la mesure du rapport de gonflement.

Seuls les résultats des essais correspondant aux caractéristiques intrinsèques du sol sont pris en compte dans 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 études géotechniques après sinistres sont souvent complétées par un ou plusieurs essais pressiométriques (ou parfois au pénétromètre dynamique), dont l'objectif est la vérification de la capacité portante du sol et le dimensionnement ultérieur éventuel de micropieux, si les résultats de l'expertise indiquent qu'une reprise en sous-œuvre des fondations est nécessaire. Ces données ne sont pas utilisées dans le cadre de la présente étude.

Les principaux essais dont les résultats sont généralement 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. Teneur en eau (Wn)

Les profils de teneur en eau en fonction de la profondeur de prélèvement (constitués généralement d'une dizaine de mesures réalisées à différentes profondeurs, jusqu'à 4 à 5 m) donnent des indications intéressantes sur la teneur en eau des couches superficielles au moment de la mesure, et par conséquent de leur éventuel état déficitaire.

D'une manière générale, les courbes de profil hydrique sont assez hétérogènes, en « dents de scie », en raison de l'hétérogénéité des matériaux de surface. Les teneurs en eau sont généralement plus faibles en surface, jusqu'à 3 m de profondeur, ce qui traduit bien un assèchement (réversible) des couches superficielles. Pour de nombreux sinistres cependant, la teneur en eau est supérieure en surface (1 à 2 m de profondeur), ce qui indique qu'il y a eu ré-humidification des couches superficielles.

Les profils de teneur en eau exigent d'être interprétés avec précaution. En tout état de cause, la signification de ces profils hydriques ne peut être que locale, à la fois dans l'espace (des sondages effectués à quelques mètres de distance indiquent souvent des variations importantes) et dans le temps (ils indiquent seulement le degré d'humidification du sol au moment de la mesure et sont donc susceptibles d'évolution). Ce type de mesure présente un grand intérêt lors de l'expertise d'un sinistre, mais n'apporte en définitive que peu d'information dans le cadre d'une étude de la susceptibilité à l'échelle départementale.

5.4.3. Indice de plasticité (Ip)

Il est calculé à partir des limites d'Atterberg 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 (Illustration 35) :

Indice de plasticité	Susceptibilité	Note
$IP < 12$	faible	1
$12 \leq IP < 25$	moyenne	2
$25 \leq IP < 40$	forte	3
$IP \geq 40$	très forte	4

Illustration 35 : Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de l'indice de plasticité de la formation

L'expérience acquise au travers des études déjà réalisées montre cependant que ces coupures sont mal corrélées avec les valeurs de bleu (paragraphe suivant) et que des adaptations sont nécessaires. En particulier, les seuils à 12 et 25 semblent plutôt devoir être décalés vers 15 et 30.

5.4.4. Essais au bleu de méthylène (Vb)

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

Cet essai a été développé par Tran Ngoc Lan (1977) et adopté comme procédure d'essai officielle des Laboratoires des Ponts et Chaussées, puis normalisé (norme AFNOR NF P 18-592). Il consiste à mesurer la capacité d'adsorption en bleu de méthylène, c'est-à-dire la quantité de ce colorant nécessaire pour recouvrir d'une couche mono-élémentaire les surfaces externes et internes de toutes les particules argileuses présentes dans 100 g de sol. On appelle cette quantité, la valeur de bleu, notée Vb et exprimée en grammes de bleu par 100 g de matériau. On considère généralement (Chassagneux *et al.*, 1998) que la sensibilité d'un matériau argileux varie de la manière suivante en fonction de la valeur de bleu notée Vb (Illustration 36) :

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

Illustration 36 : Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la valeur au bleu de méthylène de la formation

5.4.5. 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.

Les coupures suivantes ont été proposées (Mastchenko, 2001) pour caractériser le potentiel de retrait avec ce paramètre (Illustration 37) :

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

Illustration 37 : Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du retrait linéaire de la formation

Aucune valeur de retrait linéaire n'a toutefois pu être collectée dans le cadre de la présente étude.

5.4.6. Coefficient de gonflement (Cg)

L'essai de gonflement à l'œdomètre (ASTM 90) consiste à mesurer une amplitude de gonflement à la suite d'un apport d'eau. Il est par conséquent fortement conditionné par l'état initial de saturation en eau du sol considéré. En effet, pour un même sol, le gonflement relatif sera d'autant plus grand que le sol était initialement plus sec. Cette observation souligne l'intérêt d'associer ces essais avec la réalisation d'un profil hydrique. Ainsi la pression de gonflement ne constitue pas une caractéristique intrinsèque du sol, les valeurs dépendant fortement de l'état de saturation initial du sol considéré. Le potentiel de gonflement peut cependant être caractérisé par le coefficient de gonflement Cg (pente de la droite de déchargement observée dans un essai œdométrique) qui permet d'évaluer le potentiel de gonflement des formations argileuses identifiées (Illustration 38) :

Coefficient de gonflement	Susceptibilité	Note
$C_g < 0,025$	faible	1
$0,025 \leq C_g < 0,035$	moyenne	2
$0,035 \leq C_g < 0,055$	forte	3
$C_g \geq 0,055$	très forte	4

Illustration 38 : Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du coefficient de gonflement de la formation

Aucune valeur de ce paramètre n'a pu être obtenue dans le Territoire de Belfort.

5.4.7. Caractérisation géotechnique

Les données présentées proviennent de différents bureaux d'études qui nous ont aimablement permis de consulter leurs archives (Fondasol Montbéliard, Hydro'Géotechnique, ICSEO, Compétences Géotechniques) ;

Nous remercions donc ces organismes pour leur précieuse collaboration.

Sur l'ensemble du département, les données recueillies et attribuées à des formations argileuses se répartissent ainsi :

- Indice de plasticité :

237 données ont pu être attribuées à des formations identifiées comme étant argileuses. Elles ont été complétées par 1 635 valeurs d'indice de plasticité recueillies dans les départements limitrophes dans le cadre d'études similaires (Doubs (25), Haute-Saône (70), Vosges (88) et Haut-Rhin (68)).

- Valeur de bleu :

30 données ont pu être attribuées à des formations identifiées comme étant argileuses. Elles ont été complétées par 1 065 valeurs au bleu recueillies dans les départements limitrophes dans le cadre d'études similaires (Doubs (25), Haute-Saône (70), Vosges (88) et Haut-Rhin (68)).

En définitive, les données dont nous avons pu disposer permettent de caractériser la totalité des formations identifiées comme argileuses dans le département. Les valeurs géotechniques recueillies pour les formations argileuses retenues ont été synthétisées dans le tableau de l'illustration 39.

Code	Notation	Formation	Note géotechnique	Données recueillies dans le Territoire de Belfort						Données recueillies dans les départements voisins (25, 70, 88, 68)						
				Vb (g/100g)			Ip			Vb (g/100g)			Ip			
				Nb. Éch.	Moy	Max	Nb. Éch.	Min	Moy	Max	Nb. Éch.	Moy	Max	Nb. Éch.	Moy	Max
1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel)	2	9	3.16	11.40	119	5.00	19.13	60.00	220	2.70	238	26.38		
2	F	Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)	2	0							146	2.41	109	21.84		
3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	2	0							85	3.04	120	27.71		
4	LP	Limons des plateaux, loess, lehms (Quaternaire)	2	8	2.90	4.80	33	6.50	22.50	42.00	20	3.34	227	20.33		
5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	2	0			23	15.00	24.17	38.00	168	2.82	262	23.37		
6	g1a-b	Série grise (Rupélien)	2	0							7	4.27	15	31.40		
7	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimmérien)	2	8	1.59	2.50	9	15.00	20.18	31.00	0		21	24.10		
8	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien - Oxfordien)	2	4	2.38	3.74	35	6.00	22.07	42.30	57	3.71	100	23.52		
9	j2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	1	0			13	16.00	23.96	51.60	0		5	17.00		
10	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	2	0			4	19.00	19.25	20.00	28	3.48	35	21.52		
11	l1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)	2	0							7	2.98	47	26.69		
12	l7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)	2	0							63	3.47	79	24.76		
13	l5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	2	0							196	4.11	320	22.59		
14	l4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)	2	0							11	3.06	4	24.75		
15	l3	Grès et marnes (Muschelkalk)	2	0							28	2.58	45	23.34		
16	r	Silts et pélites rouges (Permien)	1	1	1.82	1.82	1	19.00	19.00	19.00	29	2.44	8	15.50		
Total échantillons				30				237				1065				1635

Illustration 39 : Synthèse des données géotechniques recueillies dans le cadre de cette étude et notes géotechniques

6. Élaboration de la carte de susceptibilité

6.1. DÉTERMINATION DU DEGRÉ DE SUSCEPTIBILITÉ

Au total, chaque formation a donc 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. La moyenne ainsi obtenue est potentiellement comprise entre 1 et 4. Les classes de susceptibilité déterminées à partir de la valeur moyenne ainsi calculée sont les suivantes (Illustration 40) :

Note moyenne	Degré de susceptibilité
valeur \leq 2	faible
2 < valeur \leq 3	moyen
valeur > 3	fort

Illustration 40 : Barème d'attribution d'un niveau de susceptibilité d'une formation argileuse

Moyennant ce traitement, les notes de susceptibilité attribuées aux 16 formations retenues comme argileuses sont les suivantes (Illustration 41) :

Code	Notation	Formation	Note lithologique	Note minéralogique	Note géotechnique	Indice de susceptibilité	Note de susceptibilité	Niveau susceptibilité
1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel)	1	2	2	1.67	1	Faible
2	F	Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)	2	2	2	2.00	1	Faible
3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	3	2	2	2.33	2	Moyen
4	LP	Limons des plateaux, loess, lehms (Quaternaire)	2	3	2	2.33	2	Moyen
5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	3	2	2	2.33	2	Moyen
6	g1a-b	Série grise (Rupélien)	4	2	2	2.67	2	Moyen
7	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimméridgien)	1	1	2	1.33	1	Faible
8	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien - Oxfordien)	2	2	2	2.00	1	Faible
9	j2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	2	1	1	1.33	1	Faible
10	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	4	2	2	2.67	2	Moyen
11	l1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)	2	2	2	2.00	1	Faible
12	t7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)	2	1	2	1.67	1	Faible
13	t5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	3	3	2	2.67	2	Moyen
14	t4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)	3	3	2	2.67	2	Moyen
15	t3	Grès et marnes (Muschelkalk)	2	2	2	2.00	1	Faible
16	r	Silts et pélites rouges (Permien)	3	1	1	1.67	1	Faible

Illustration 41 : Susceptibilité des 16 formations argileuses retenues

6.2. SYNTHÈSE

Aucune formation argileuse n'apparaît comme fortement susceptible dans le département du Territoire de Belfort, alors que 7 formations sont jugées moyennement susceptibles, et 9 faiblement susceptibles. Au final, 28,17 % du département sont

classés en susceptibilité moyenne au phénomène de retrait-gonflement, et 33,70 % en susceptibilité faible. 38,14 % de la surface départementale sont donc considérés comme à *a priori* non argileux, et donc non susceptibles (Illustration 42).

Code	Notation	Formation	Surface (km ²)	% Surface départ.	Niveau de susceptibilité
3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	7.98	1.31	Moyen
4	LP	Limons des plateaux, loess, lehms (Quaternaire)	154.19	25.23	Moyen
5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	1.63	0.27	Moyen
6	g1a-b	Série grise (Rupélien)	1.28	0.21	Moyen
10	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	6.03	0.99	Moyen
13	t5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	0.50	0.08	Moyen
14	t4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)	0.49	0.08	Moyen
Total des formations de susceptibilité moyenne			172.10	28.17	
1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel)	124.73	20.41	Faible
2	F	Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)	17.39	2.85	Faible
7	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimméridgien)	33.47	5.48	Faible
8	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien - Oxfordien)	10.89	1.78	Faible
9	j2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	7.88	1.29	Faible
11	l1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)	0.05	0.01	Faible
12	t7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)	0.17	0.03	Faible
15	t3	Grès et marnes (Muschelkalk)	1.04	0.17	Faible
16	r	Silts et pélites rouges (Permien)	10.27	1.68	Faible
Total des formations de susceptibilité faible			205.89	33.70	
Total Formations argileuses			377.99	61.86	
Formations à priori non argileuses			233.05	38.14	
Total département			611.04	100.00	

Illustration 42 : Superficie des formations par niveau de susceptibilité

6.3. CARTE DE SUSCEPTIBILITÉ

L'illustration 43 représente la carte départementale de susceptibilité au phénomène de retrait-gonflement, réalisée d'après les résultats présentés dans le tableau de l'illustration 41. La carte départementale de susceptibilité a été établie à partir de la carte interprétée des formations potentiellement sujettes au phénomène de retrait-gonflement en attribuant à chacune des formations géologiques la classe de susceptibilité définie ci-dessus. Cette carte est également présentée en planche hors-texte à l'échelle 1/125 000 (Carte 2). Les formations sont représentées par deux couleurs (jaune et orange) selon leur degré de susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Les zones blanches de la carte correspondent aux formations à *a priori* non argileuses. Cependant, on ne peut exclure qu'elles soient recouvertes localement de poches ou placages argileux non représentés sur la carte géologique.

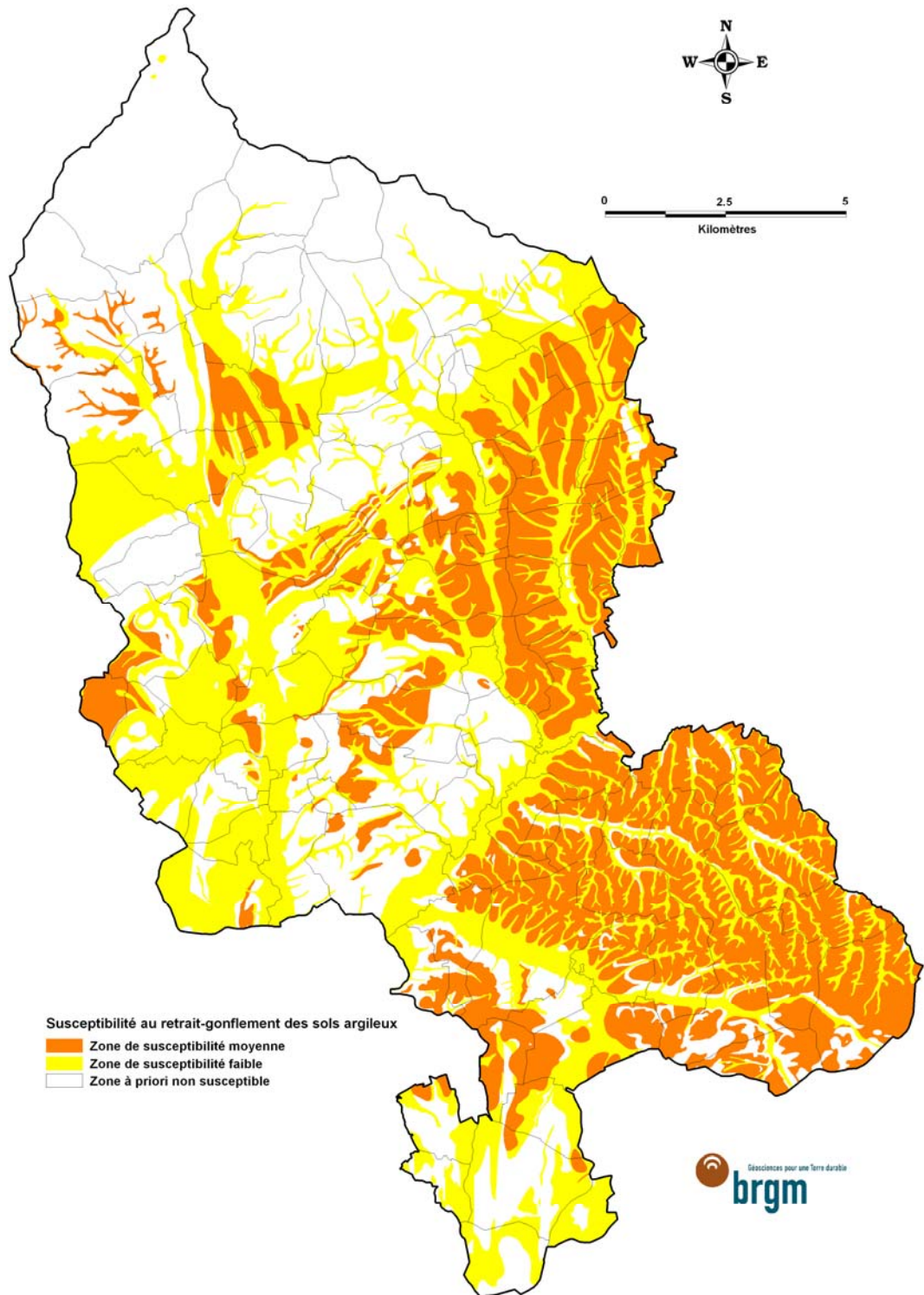


Illustration 43 : Carte de susceptibilité au retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Territoire de Belfort

7. Analyse de la sinistralité

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

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

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

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

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

Depuis décembre 2000, l'analyse du contexte climatique est confiée à Météo France et effectuée sur la base d'un suivi de l'état hydrique des sols. Celui-ci est calculé dans une centaine de 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 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.

7.2. IDENTIFICATION DES COMMUNES SINISTRÉES

7.2.1. Localisation des communes sinistrées

Au 1^{er} janvier 2010, 2 des 102 communes du département 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, soit un taux de sinistralité de 1,96 %. La période reconnue correspond exclusivement à l'été 2003 (juillet à septembre), le nombre d'occurrences (nombre d'arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle, en distinguant à la fois par commune et par période) s'élevant actuellement à 2 dans le département. En effet, à ce jour (début février 2010), un seul arrêté interministériel reconnaissant l'état de catastrophe naturelle sécheresse a été pris dans le département du Territoire de Belfort. L'illustration 44 présente le nombre et le nom des communes concernées par cet arrêté.

Arrêté interministériel	Publication au Journal Officiel	Nombre de communes reconnues	Communes reconnues
19 janvier 2006	6 février 2006	2	- Buc - Rougemont-le-Château

Illustration 44 : Arrêté interministériel de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse (source : www.prim.net, consulté au 29/01/10)

D'après les données disponibles sur le site internet « prim.net » du ministère de l'environnement, ce nombre d'occurrences reconnues place le département à la 84^{ème} position des départements français les plus touchés, très loin derrière certains du Sud-Ouest (1 418 occurrences reconnues en Haute-Garonne, 1 257 dans le Gers, 1 072 en Dordogne, par exemple). Il faut toutefois noter que le nombre de commune de ce département est bien inférieur à la moyenne. Comme pour les autres départements du sud-ouest, l'arrêté y a été pris pour l'été 2003. En effet, le centre-est de la France, en particulier la Bourgogne et la Franche-Comté, avait été largement épargné jusque là par le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux, mais la sécheresse de l'été 2003 s'est traduite par une occurrence significative de sinistres liés aux tassements différentiels.

La carte de l'illustration 45 permet de localiser les 2 communes qui ont fait l'objet d'un arrêté de reconnaissance à ce jour, ainsi que le nombre respectif de sinistres localisés par commune dans le cadre de la présente étude. Cette carte montre une sinistralité très peu marquée (avec une répartition hétérogène).

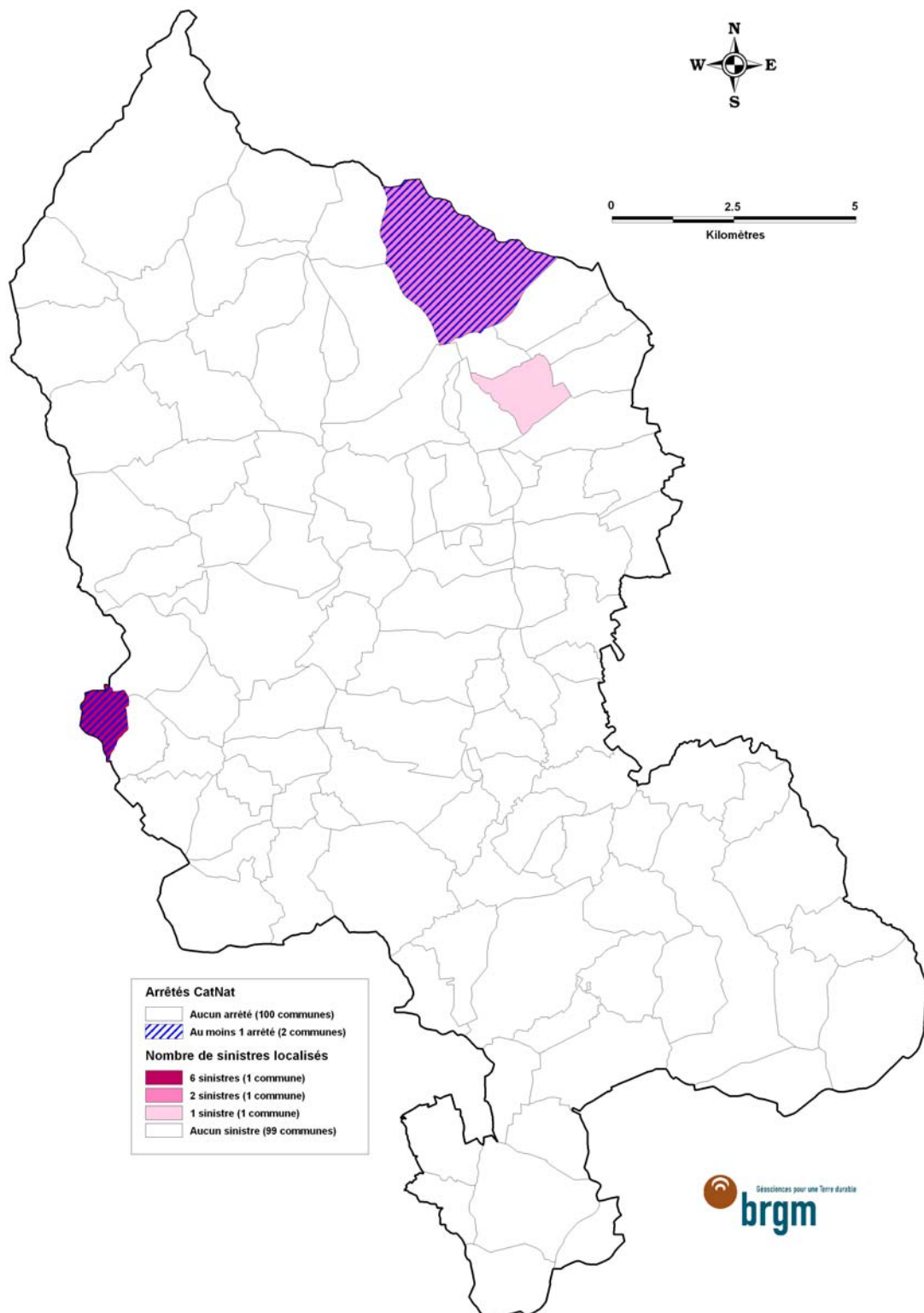


Illustration 45 : Communes concernées par des arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse et nombre de sinistres recensés et localisés

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

Les 2 communes reconnues en état de catastrophe naturelle pour les tassements différentiels liés à la sécheresse l'ont été uniquement pour la période correspondant à l'été 2003. Ceci est important au regard de la mise en application du système de modulation de franchise mis en place en septembre 2000 et qui prévoit une augmentation de la franchise à chaque nouvel arrêté (compté désormais sur les 5 dernières années, suite à l'arrêté du 4 août 2003, et non plus depuis 1995 comme initialement), à défaut d'élaboration de documents de prévention de type Plans de Prévention des Risques naturels (PPR). On peut également noter que les 9 sinistres localisés ont pu être datés, soit 100 % des cas. Cela permet de constater que si les sinistres recensés lors de l'étude sont presque tous apparus durant l'été 2003 (8 sinistres), 1 sinistre nous a été signalé comme étant plus récent (1 en 2004 sur la commune de Félon), bien qu'aucun arrêté n'ait été pris à ce jour pour cette période.

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 de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ne soient pas vraiment corrélées. En effet, après une période de dessiccation intense et profonde des sols, le retour à un état hydrique normal est lent et il subsiste souvent en profondeur des zones de sol argileux anormalement desséchées qui restent sensibles à des variations saisonnières, même de faible amplitude. En d'autres termes, un déficit hydrique intense est nécessaire pour amorcer les premiers mouvements différentiels du sol mais ensuite, la structure du sol et du bâti ayant été fragilisée, de faibles amplitudes hydriques suffisent à provoquer la réouverture ou l'aggravation des premières fissures. C'est pourquoi certains propriétaires réagissent avec retard et déclarent des sinistres à une période où les précipitations sont revenues à un niveau normal. Ceci pourrait également expliquer une partie des sinistres signalés comme postérieurs à l'été 2003.

7.3. COLLECTE DES DONNÉES DE SINISTRES

Le recensement des sinistres a été réalisé à partir de sources d'informations complémentaires, à savoir la consultation de l'ensemble des communes du département, le recueil des données auprès de la Caisse centrale de réassurance (CCR), de bureaux d'études géotechniques, ainsi que de certaines mutuelles d'assurances.

L'enquête effectuée auprès de l'ensemble des communes du département s'est faite par envoi d'un courrier, en collaboration avec la Direction départementale des territoires du Territoire de Belfort (DDT, anciennement DDEA), aux maires des 102 communes. Un courrier de relance a ensuite été envoyé à toutes les communes n'ayant pas répondu, et une relance téléphonique ciblée sur les communes reconnues en état de catastrophe naturelle a été effectuée. Le taux de réponse final atteint plus de 47 %, ce qui semble raisonnable compte tenu de l'ampleur limitée des conséquences du retrait-gonflement des sols argileux dans ce département.

En définitive, ce sont seulement 9 sites de sinistres, répartis dans 3 communes, qui ont été recensés et localisés. La localisation des sinistres a été effectuée précisément à partir des adresses indiquées en consultant le site internet www.cadastre.gouv.fr. Une fois l'habitation repérée sur plan cadastral, celle-ci est ensuite pointée et géoréférencée sur fonds topographiques de l'IGN à 1/25 000 en utilisant le logiciel MapInfo.

Le nombre de sinistres par commune est variable, mais la majorité des communes restent peu sinistrées : 1 commune sinistrée (Félon) sur 3 ne compte qu'un seul sinistre recensé ; 1 commune (Rougemont-le-Château) sur 3 compte 2 sinistres ; la troisième commune (Buc) en compte 6.

89 % des sinistres (soit 8 sur 9) sont effectivement localisés dans les 2 communes reconnues en état de catastrophe naturelle pour l'été 2003, alors que les 11 % restants (soit 1 sinistre) se localise dans 1 commune qui n'a encore jamais été reconnue en état de catastrophe naturelle « sécheresse ».

La liste des sinistres avec leurs coordonnées en projection Lambert II étendu est présentée sur l'illustration 46. Pour des raisons de confidentialité, les noms et adresses des sinistrés ne figurent pas dans ce tableau.

Numéro	Commune	Numéro INSEE	X_L2E	Y_L2E	Formation géologique concernée
1	BUC	90020	934 347	2 300 083	10 - (I4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
2	BUC	90020	934 351	2 300 007	10 - (I4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
3	BUC	90020	934 277	2 300 116	10 - (I4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
4	BUC	90020	934 838	2 300 403	10 - (I4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
5	BUC	90020	934 291	2 300 012	10 - (I4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
6	BUC	90020	934 163	2 300 025	10 - (I4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
7	FELON	90044	948 099	2 310 884	02 - (F) - Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)
8	ROUGEMONT-LE-CHÂTEAU	90089	947 110	2 314 292	01 - (Fz) - Alluvions récentes localement tourbeuses (Wurm à actuel)
9	ROUGEMONT-LE-CHÂTEAU	90089	947 261	2 314 269	02 - (F) - Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)

Illustration 46 : Sinistres recensés et localisés

Le territoire de Belfort est ainsi concerné par un très faible nombre de sinistres, ce qui est en partie dû à la taille du territoire et au fait que l'est de la France n'a pas connu les sécheresses antérieures à 2003. De plus, cela s'explique certainement aussi par le fait que les formations argileuses présentent une susceptibilité peu importante comparativement à d'autres départements beaucoup plus sinistrés.

L'examen des données recueillies indique que la totalité des sinistres recensés et localisés sont répartis sur les formations argilo-marneuses retenues comme étant sujettes au phénomène de retrait-gonflement, mais il est vrai que ces dernières occupent près de 62 % de la surface du département (Illustrations 47 et 48). Il n'est pas exclu cependant que dans l'avenir des sinistres apparaissent sur des niveaux d'altération non cartographiés. Cela illustrera, dans cette éventualité, le fait que la représentation cartographique des formations argileuses, en l'état actuel des connaissances, n'est pas parfaite dans le détail, même si elle reflète assez fidèlement la réalité à l'échelle départementale.

Rappelons en effet que certaines formations considérées comme *a priori* non argileuses peuvent contenir localement des lentilles ou des placages d'argiles non

cartographiés. Ceci concerne notamment des colluvions superficielles ou des altérites d'horizons calcaires. Par ailleurs, il peut arriver que des sinistres attribués au retrait-gonflement des argiles soient dus en réalité à d'autres phénomènes (séismes, tassement de remblais ou de sols compressibles, fluages sur des colluvions instables, défauts de construction, choc thermique sur les enduits de façade, etc.). On peut d'ailleurs noter à ce sujet que le Territoire de Belfort est concerné par le risque sismique. Deux séismes ont d'ailleurs été ressentis le 22 février 2003 (épicentre Saint-Dié [Vosges], magnitude 5,3) et le 23 février 2004 (épicentre Besançon [Doubs], magnitude 5,1), donc à des périodes proches de la sécheresse de l'été 2003. Enfin, il n'est pas exclu que certains contours de formations géologiques puissent être localement inexacts.

Code	Notation	Formation	Surface (km ²)	% Surface départ.	Nombre de sinistres
1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel)	124.73	20.41	1
2	F	Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)	17.39	2.85	2
3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	7.98	1.31	0
4	LP	Limons des plateaux, loess, lehms (Quaternaire)	154.19	25.23	0
5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	1.63	0.27	0
6	g1a-b	Série grise (Rupélien)	1.28	0.21	0
7	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimméridgien)	33.47	5.48	0
8	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien - Oxfordien)	10.89	1.78	0
9	j2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	7.88	1.29	0
10	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	6.03	0.99	6
11	l1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)	0.05	0.01	0
12	t7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)	0.17	0.03	0
13	t5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	0.50	0.08	0
14	t4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)	0.49	0.08	0
15	t3	Grès et marnes (Muschelkalk)	1.04	0.17	0
16	r	Silts et pélites rouges (Permien)	10.27	1.68	0
Total Formations argileuses			377.99	61.86	9
Formations à priori non argileuses			233.05	38.14	0
Total département			611.04	100.00	

Illustration 47 : Répartition géologique des 9 sinistres localisés

Parmi les formations retenues comme argileuses au sens large, une se distingue par un nombre de sinistres supérieur à 5 : les *Marnes micacées* et « *schistes cartons* » du Toarcien, avec 6 sinistres.

Parmi les 16 formations argilo-marneuses retenues, 13 ne comptent aucun sinistre recensé à ce jour (voir Illustration 47). Il faut cependant noter que cette absence de sinistre peut en partie s'expliquer par des surfaces d'affleurement relativement réduites (en effet, 12 formations sur 13 affleurent sur moins de 30 km², ce qui induit un faible nombre de constructions exposées) ou par le faible taux de réponse obtenu de la part des communes.

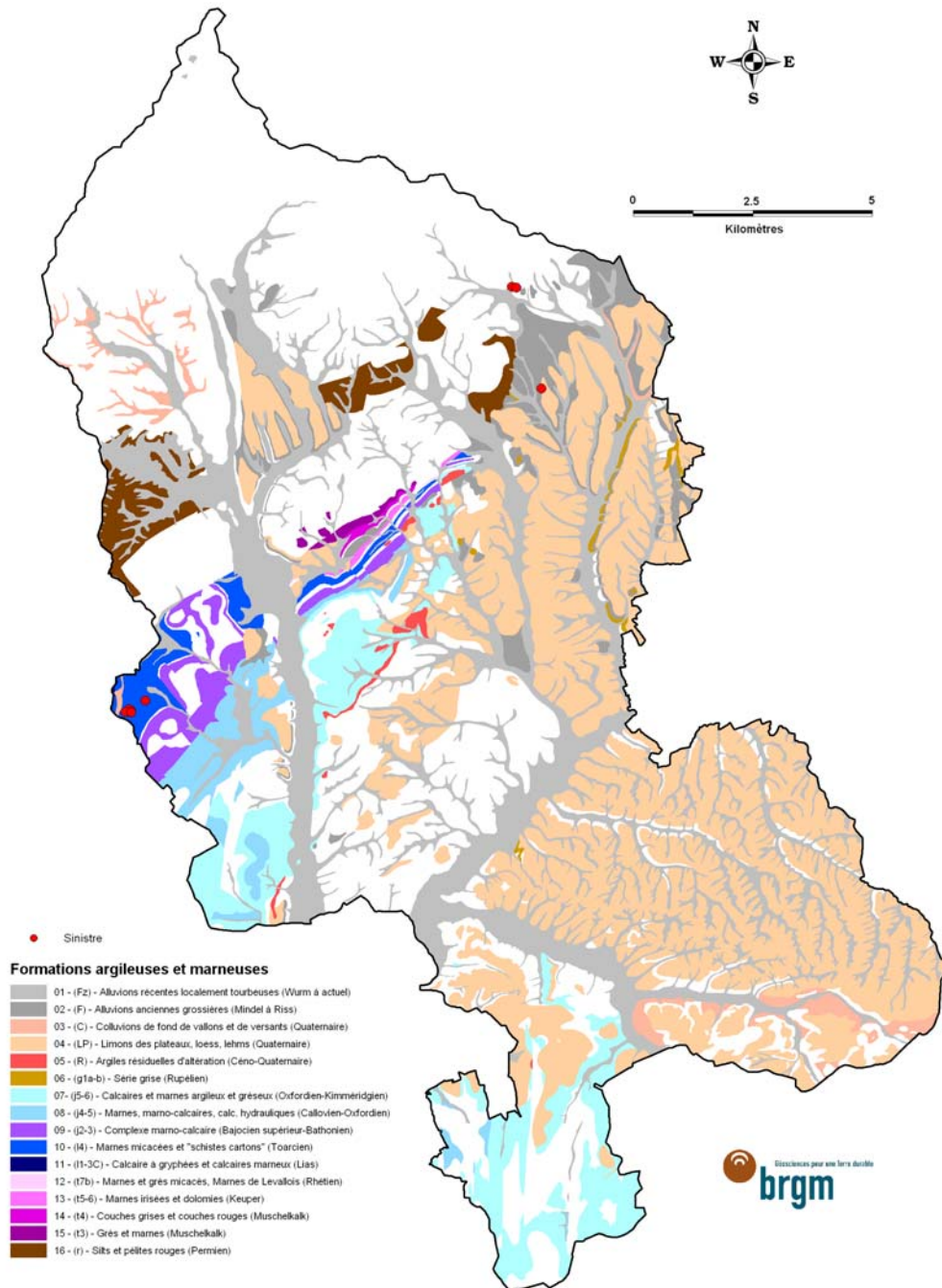


Illustration 48 : Répartition géologique des 9 sinistres localisés

7.4. FRÉQUENCE D'OCCURRENCE RAPPORTÉE A LA SURFACE BÂTIE

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.

7.4.1. Détermination de la densité d'urbanisation par formation

Les contours des zones bâties du département ont été obtenus à partir des données de la couche « bâti » de la BDTopo de l'IGN, mise à disposition par la DDT du Territoire de Belfort dans le cadre de cette étude. Le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux affectant essentiellement les structures légères correspondant aux habitations individuelles, nous avons exclu de ce calcul de surface les bâtiments industriels, agricoles et commerciaux, sportifs, administratifs ou de transport, ainsi que les châteaux et divers monuments. Au final, les seuls bâtiments pris en compte dans le calcul sont ceux correspondant à la catégorie « autre » et « religieux » et à la nature « autre » et « église » de la BDTopo.

La surface totale des zones bâties du département a été ainsi estimée à 12,21 km², soit 2 % de la superficie départementale (Illustration 49).

La superposition de la carte synthétique des formations argileuses avec celle des zones urbanisées permet d'estimer la surface totale occupée par les zones bâties dans les formations retenues comme argileuses à 4,99 km², soit 1,32 % de leur surface totale d'affleurement. Les surfaces bâties et le nombre de sinistres recensés sont indiqués pour chaque formation dans le tableau de l'illustration 50.

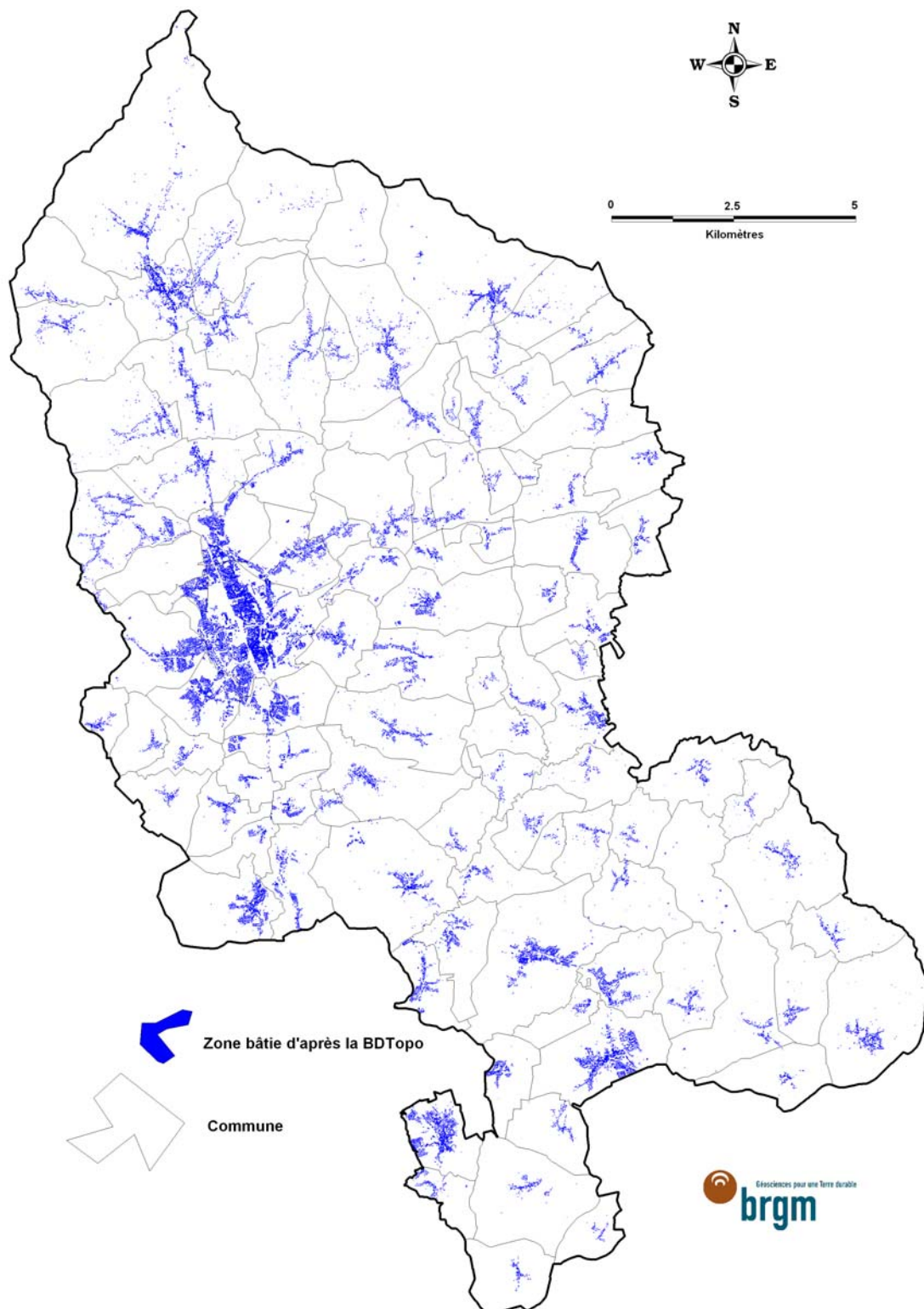


Illustration 49 : Carte des zones bâties sur le département du Territoire de Belfort (source des données BD Topo IGN)

Code	Notation	Formation	Surface (km ²)	% Surface départ.	Nombre de sinistres	Densité de sinistres pour 100 km ² de formation	Surfaces bâties (km ²)	Taux d'urbanisation (%)
1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel)	124.73	20.41	1	0.8	2.36	1.89
2	F	Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)	17.39	2.85	2	11.5	0.25	1.44
3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	7.98	1.31	0	0.0	0.11	1.38
4	LP	Limons des plateaux, loess, lehms (Quaternaire)	154.19	25.23	0	0.0	0.96	0.62
5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	1.63	0.27	0	0.0	0.05	3.07
6	g1a-b	Série grise (Rupélien)	1.28	0.21	0	0.0	0.03	2.34
7	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimméridgien)	33.47	5.48	0	0.0	0.35	1.05
8	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien - Oxfordien)	10.89	1.78	0	0.0	0.29	2.66
9	j2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	7.88	1.29	0	0.0	0.18	2.28
10	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	6.03	0.99	6	99.5	0.19	3.15
11	l1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)	0.05	0.01	0	0.0	0.00	0.00
12	t7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)	0.17	0.03	0	0.0	0.00	0.00
13	t5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	0.50	0.08	0	0.0	0.00	0.00
14	t4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)	0.49	0.08	0	0.0	0.01	2.04
15	t3	Grès et marnes (Muschelkalk)	1.04	0.17	0	0.0	0.06	5.77
16	r	Silts et pélites rouges (Permien)	10.27	1.68	0	0.0	0.15	1.46
Total Formations argileuses			377.99	61.86	9	2.4	4.99	1.32
Formations à priori non argileuses			233.05	38.14	0	0.0	7.22	3.10
Total département			611.04	100.00	9	1.5	12.21	2.00

Illustration 50 : Nombre de sinistres, surface bâtie et taux d'urbanisation par formation géologique

7.4.2. Détermination du critère densité de sinistres

Les éléments décrits dans la méthodologie, permettent de calculer des densités de sinistres par formation géologique, en prenant en compte la surface bâtie de la 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 (Illustration 50). Les densités de sinistres rapportées à 100 km² de formation argileuse réellement bâtie sont présentées dans le tableau de l'illustration 51.

La densité moyenne ainsi obtenue pour les formations argileuses est de l'ordre de 180 sinistres pour 100 km² d'affleurement réellement bâti, ce qui est relativement faible comparativement aux autres départements qui ont déjà fait l'objet d'une étude de cartographie de l'aléa retrait-gonflement.

Afin de hiérarchiser les formations argileuses selon leur degré de sinistralité, des valeurs seuil de la densité de sinistres pour 100 km² de formation argileuse bâtie ont été choisies suivant la répartition des formations argileuses autour de la sinistralité moyenne (580 sinistres pour 100 km² de surface bâtie). Les coupures utilisées pour l'attribution de notes caractérisant la sinistralité sont les suivantes :

- **note 1** : moins de 180 sinistres pour 100 km² de surface bâtie dans la formation (ce qui correspond aux formations ayant une densité sensiblement inférieure à la moyenne des zones argileuses) ;
- **note 2** : entre 180 et 360 sinistres pour 100 km² de surface bâtie dans la formation (ce qui correspond aux formations ayant une densité de sinistres moyenne à importante) ;
- **note 3** : plus de 360 sinistres pour 100 km² de surface bâtie dans la formation (ce qui correspond aux formations ayant une densité de sinistres importante pour ce département).

Les notes de sinistralité ainsi attribuées sont précisées dans le tableau de l'illustration 51.

Code	Notation	Formation	Surface (km ²)	% Surface départ.	Nombre de sinistres	Densité de sinistres pour 100 km ² de formation	Surfaces bâties (km ²)	Taux d'urbanisation (%)	Densité de sinistres pour 100 km ² de surface bâtie	Note de sinistralité 90
1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel)	124,73	20,41	1	0,8	2,36	1,89	42	1
2	F	Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)	17,39	2,85	2	11,5	0,25	1,44	800	NS
3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	7,98	1,31	0	0,0	0,11	1,38	0	NS
4	LP	Limons des plateaux, loess, lehms (Quaternaire)	154,19	25,23	0	0,0	0,96	0,62	0	1
5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	1,63	0,27	0	0,0	0,05	3,07	0	NS
6	g1a-b	Série grise (Rupélien)	1,28	0,21	0	0,0	0,03	2,34	0	NS
7	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimméridgien)	33,47	5,48	0	0,0	0,35	1,05	0	NS
8	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien - Oxfordien)	10,89	1,78	0	0,0	0,29	2,66	0	NS
9	j2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	7,88	1,29	0	0,0	0,18	2,28	0	NS
10	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	6,03	0,99	6	99,5	0,19	3,15	3158	3
11	l1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)	0,05	0,01	0	0,0	0,00	0,00	0	NS
12	t7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)	0,17	0,03	0	0,0	0,00	0,00	0	NS
13	t5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	0,50	0,08	0	0,0	0,00	0,00	0	NS
14	t4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)	0,49	0,08	0	0,0	0,01	2,04	0	NS
15	t3	Grès et marnes (Muschelkalk)	1,04	0,17	0	0,0	0,06	5,77	0	NS
16	r	Silts et pélites rouges (Permien)	10,27	1,68	0	0,0	0,15	1,46	0	NS
Total Formations argileuses			377,99	61,86	9	2,4	4,99	1,32	180	
Formations à priori non argileuses			233,05	38,14	0	0,0	7,22	3,10		
Total département			611,04	100,00	9	1,5	12,21	2,00		

Illustration 51 : Densité de sinistres et notes de sinistralité

Il est important de noter que pour 13 des 16 formations considérées, le critère de sinistralité ne peut être jugé comme significatif en raison de la trop faible surface bâtie qu'elles présentent et parfois de l'absence de sinistres sur la formation. Pour ces 13 formations d'extension géographique très réduite, la prise en compte d'un seul sinistre pourrait faire immédiatement passer la densité de sinistres d'une valeur faible à moyenne, voire à forte. Ainsi, conformément à la méthodologie nationale, ces formations se voient de fait attribuer une note de sinistralité jugée non significative (autrement dit, aucune note de sinistralité). Les principales formations concernées sont les formations suivantes :

- *Série grise (Rupélien) ;*
- *Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias) ;*
- *Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien) ;*
- *Marnes irisées et dolomies (Keuper) ;*
- *Couches grises et couches rouges (Muschelkalk).*

En effet, aucun sinistre n'y est recensé, mais seulement 0 à 0,35 km² bâti pour ces formations, ce qui correspond au plus à quelques dizaines à quelques centaines de maisons seulement sur l'ensemble du département. En revanche, la sinistralité a été jugée significative pour les *Marnes micacées* et « *schistes cartons* » (*Toarcien*), malgré une surface bâtie également réduite (0,19 km²), en raison de la présence de 6 sinistres, ce qui tend à démontrer l'existence d'une sinistralité relativement importante pour cette formation malgré sa faible urbanisation.

Compte tenu du nombre important de ces formations (80 % d'entre elles) et afin de conserver une homogénéité de traitement des formations argileuses ou marneuses au sein du département du territoire de Belfort, il a été décidé de s'appuyer sur la sinistralité obtenue dans les départements limitrophes. L'illustration 52 présente la synthèse des notes de sinistralité obtenue dans les départements limitrophes et la note retenue pour le département du territoire de Belfort.

Il est à noter que le niveau de sinistralité de ce département reste très faible par rapport à celui obtenu jusqu'à présent dans une cinquantaine de départements les plus sinistrés et déjà couverts par une carte d'aléa retrait-gonflement (mais les comparaisons avec la plupart de ces départements est délicate car l'urbanisation y a été évaluée avec d'autres outils, moins précis). Elle est toutefois comparable à celle obtenue dans certains départements comme la Savoie et la Haute-Savoie.

Code	Notation	Formation	Surface (km²)	% Surface départ.	Nombre de sinistres	Densité de sinistres pour 100 km² de formation	Surfaces bâties (km²)	Taux d'urbanisation (%)	Densité de sinistres pour 100 km² de surface bâtie	Note de sinistralité 90	Note de sinistralité 25	Note de sinistralité 70	Note de sinistralité 68	Note de sinistralité 90 moyenne départements 25-70-68
1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel)	124,73	20,41	1	0,8	2,36	1,89	42	1	1	1	1	1
2	F	Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)	17,39	2,85	2	11,5	0,25	1,44	800	NS	1	1	1	1
3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	7,98	1,31	0	0,0	0,11	1,38	0	NS	3	1		2
4	LP	Limons des plateaux, loess, lehms (Quaternaire)	154,19	25,23	0	0,0	0,96	0,62	0	1	3	2	2	2
5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	1,63	0,27	0	0,0	0,05	3,07	0	NS	3	2		2
6	g1a-b	Série grise (Rupélien)	1,28	0,21	0	0,0	0,03	2,34	0	NS				NS
7	J5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimméridgien)	33,47	5,48	0	0,0	0,35	1,05	0	NS	3	1		2
8	J4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Caltlovien - Oxfordien)	10,89	1,78	0	0,0	0,29	2,66	0	NS	2	2		2
9	J2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	7,88	1,29	0	0,0	0,18	2,28	0	NS	1	2		1
10	I4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	6,03	0,99	6	99,5	0,19	3,15	3158	3	3	3		3
11	I1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)	0,05	0,01	0	0,0	0,00	0,00	0	NS	3	2		2
12	I7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhéïten)	0,17	0,03	0	0,0	0,00	0,00	0	NS	3	2		2
13	I5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	0,50	0,08	0	0,0	0,00	0,00	0	NS	1	1		1
14	t4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)	0,49	0,08	0	0,0	0,01	2,04	0	NS		1		1
15	t3	Grès et marnes (Muschelkalk)	1,04	0,17	0	0,0	0,06	5,77	0	NS		1		1
16	r	Silts et pélites rouges (Permien)	10,27	1,68	0	0,0	0,15	1,46	0	NS		1		1
Total Formations argileuses			377,99	61,86	9	2,4	4,99	1,32	180					
Formations à priori non argileuses			233,05	38,14	0	0,0	7,22	3,10						
Total département			611,04	100,00	9	1,5	12,21	2,00						

Illustration 52 : Densité de sinistres et notes de sinistralité à partir des départements limitrophes

Une formation obtient ainsi une note de sinistralité maximale de 3 ; il s'agit des *Marnes micacées et « schistes cartons » (Toarcien)* (3 158 sinistres pour 100 km² bâtis) qui présente, par ailleurs une susceptibilité moyenne.

Sept formations obtiennent une note de sinistralité de 2 :

- les *Colluvions de fonds de vallons et de versants* ;
- les *Limons des plateaux, loess et lehms* ;
- les *Argiles résiduelles d'altération* ;
- les *Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien – Kimméridgien)* ;
- les *Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien – Oxfordien)* ;
- les *Calcaires à gryphées et calcaires marneux (Lias)* ;
- les *Marnes et grès micacées, Marnes de Levallois (Rhétien)*.

Sept formations obtiennent la note de sinistralité minimale de 1 et une formation, une note de sinistralité non significative.

Il est à noter que pour des raisons de faible superficie d'affleurement et/ou de faible urbanisation, aucune des formations avec une sinistralité moyenne ne présente de sinistres dans le Territoire de Belfort. Dans les départements limitrophes, ces mêmes formations, lorsqu'elles affleurent sur des superficies importantes et/ou qu'elles sont densément bâties, présentent effectivement une sinistralité moyenne..

8. Carte d'aléa

8.1. DÉTERMINATION DU NIVEAU D'ALÉA

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

La susceptibilité des formations argileuses et marneuses identifiées a été caractérisée à partir de la moyenne des notes attribuées pour chacun des critères lithologique, minéralogique et géotechnique, comme indiqué au chapitre 6. L'indice de susceptibilité ainsi obtenu a été décliné en trois classes, qualifiées respectivement par une susceptibilité faible, moyenne et forte, et prend donc la valeur 1, 2 ou 3 (seules les deux premières classes apparaissent dans le département du Territoire de Belfort).

Concernant la sinistralité, le critère utilisé est la densité de sinistres rapportée à 100 km² d'affleurement réellement bâti. La note de sinistralité est établie en comparant ce résultat aux valeurs seuils et vaut selon les cas 1, 2 ou 3, sauf pour une formation de très faible extension géographique où elle a été jugée non-significative.

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, ceci 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 sinistralité et le double de la note de susceptibilité**. La valeur ainsi obtenue est un entier potentiellement compris entre 3 et 9. Les formations sont ensuite hiérarchisées en prenant en compte les coupures suivantes, qui permettent de définir trois niveaux d'aléa (faible, moyen et fort) :

- **aléa faible** : note d'aléa égale à 3, 4 ou 5
- **aléa moyen** : note d'aléa égale à 6 ou 7
- **aléa fort** : note d'aléa égale à 8 ou 9

Dans le département du Territoire de Belfort, aucune formation n'est classée en aléa fort vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement des argiles. En revanche, 5 formations présentent un aléa moyen, résultant d'une susceptibilité moyenne combinée soit avec une sinistralité forte (*Marnes micacées et « schistes cartons » du Toarcien*), soit avec une sinistralité non significative (*Série grise du Rupélien*), soit avec une sinistralité moyenne (*Colluvions de fonds de vallons et de versants, Limons des plateaux, loess et lehms et Argiles résiduelles d'altération*). Ces formations couvrent 28 % de la surface départementale (Illustration 54).

Les 11 autres formations, couvrant 34 % de la surface départementale, sont considérées comme présentant un aléa faible vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Elles résultent d'une susceptibilité faible associée à une sinistralité faible (5 formations) à moyenne (4 formations), ou d'une susceptibilité moyenne combinée à une sinistralité faible (2 formations).

Code	Notation	Formation	Surface (km ²)	Note lithologique	Note minéralogique	Note géotechnique	Indice de susceptibilité	Niveau susceptibilité	Note de susceptibilité	Note de sinistralité départements 25-70-68	Indice d'aléa	Niveau d'aléa
1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel)	124.73	2	2	2	2.00	Faible	1	1	3	Faible
2	F	Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)	17.39	1	2	2	1.67	Faible	1	1	3	Faible
3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	7.98	3	2	2	2.33	Moyen	2	2	6	Moyen
4	LP	Limons des plateaux, loess, lehms (Quaternaire)	154.19	2	3	2	2.33	Moyen	2	2	6	Moyen
5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	1.63	3	2	2	2.33	Moyen	2	2	6	Moyen
6	g1a-b	Série grise (Rupélien)	1.28	4	2	2	2.67	Moyen	2	NS	NS	Moyen
7	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimméridgien)	33.47	1	1	2	1.33	Faible	1	2	4	Faible
8	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien - Oxfordien)	10.89	2	2	2	2.00	Faible	1	2	4	Faible
9	j2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	7.88	1	1	1	1.00	Faible	1	1	3	Faible
10	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	6.03	4	1	2	2.33	Moyen	2	3	7	Moyen
11	l1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)	0.05	2	2	2	2.00	Faible	1	2	4	Faible
12	t7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)	0.17	2	1	2	1.67	Faible	1	2	4	Faible
13	t5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	0.50	3	2	2	2.33	Moyen	2	1	5	Faible
14	l4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)	0.49	3	3	2	2.67	Moyen	2	1	5	Faible
15	l3	Grès et marnes (Muschelkalk)	1.04	1	2	2	1.67	Faible	1	1	3	Faible
16	r	Silts et pélites rouges (Permien)	10.27	3	1	1	1.67	Faible	1	1	3	Faible
Total Formations argileuses			377.99									
Formations à priori non argileuses			233.05									
Total département			611.04									

Illustration 53 : Niveau d'aléa des formations argileuses

Code	Notation	Formation	Surface (km ²)	% Surface départ.	Niveau d'aléa
3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	7,98	1,31	Moyen
4	LP	Limons des plateaux, loess, lehms (Quaternaire)	154,19	25,23	Moyen
5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	1,63	0,27	Moyen
6	g1a-b	Série grise (Rupélien)	1,28	0,21	Moyen
10	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	6,03	0,99	Moyen
Total des formations de susceptibilité moyenne			171,11	28,00	

1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel)	124,73	20,41	Faible
2	F	Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)	17,39	2,85	Faible
7	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimméridgien)	33,47	5,48	Faible
8	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien - Oxfordien)	10,89	1,78	Faible
9	j2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	7,88	1,29	Faible
11	l1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)	0,05	0,01	Faible
12	t7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)	0,17	0,03	Faible
13	t5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	0,50	0,08	Faible
14	t4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)	0,49	0,08	Faible
15	t3	Grès et marnes (Muschelkalk)	1,04	0,17	Faible
16	r	Silts et pélites rouges (Permien)	10,27	1,68	Faible
Total des formations de susceptibilité faible			206,88	33,86	
Total Formations argileuses			377,99	61,86	
Formations à priori non argileuses			233,05	38,14	
Total département			611,04	100,00	

Illustration 54 : Classement des formations en fonction de leur niveau d'aléa

Malgré l'absence de sinistres sur les formations en aléa moyen sur le Territoire de Belfort, la connaissance acquise via les départements voisins justifie ce niveau d'aléa (cf. paragraphe 7.4.2).

8.2. CARTE D'ALÉA

La carte départementale d'aléa a été tracée 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 55 et en carte hors-texte (Carte 3) 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 à la même échelle.

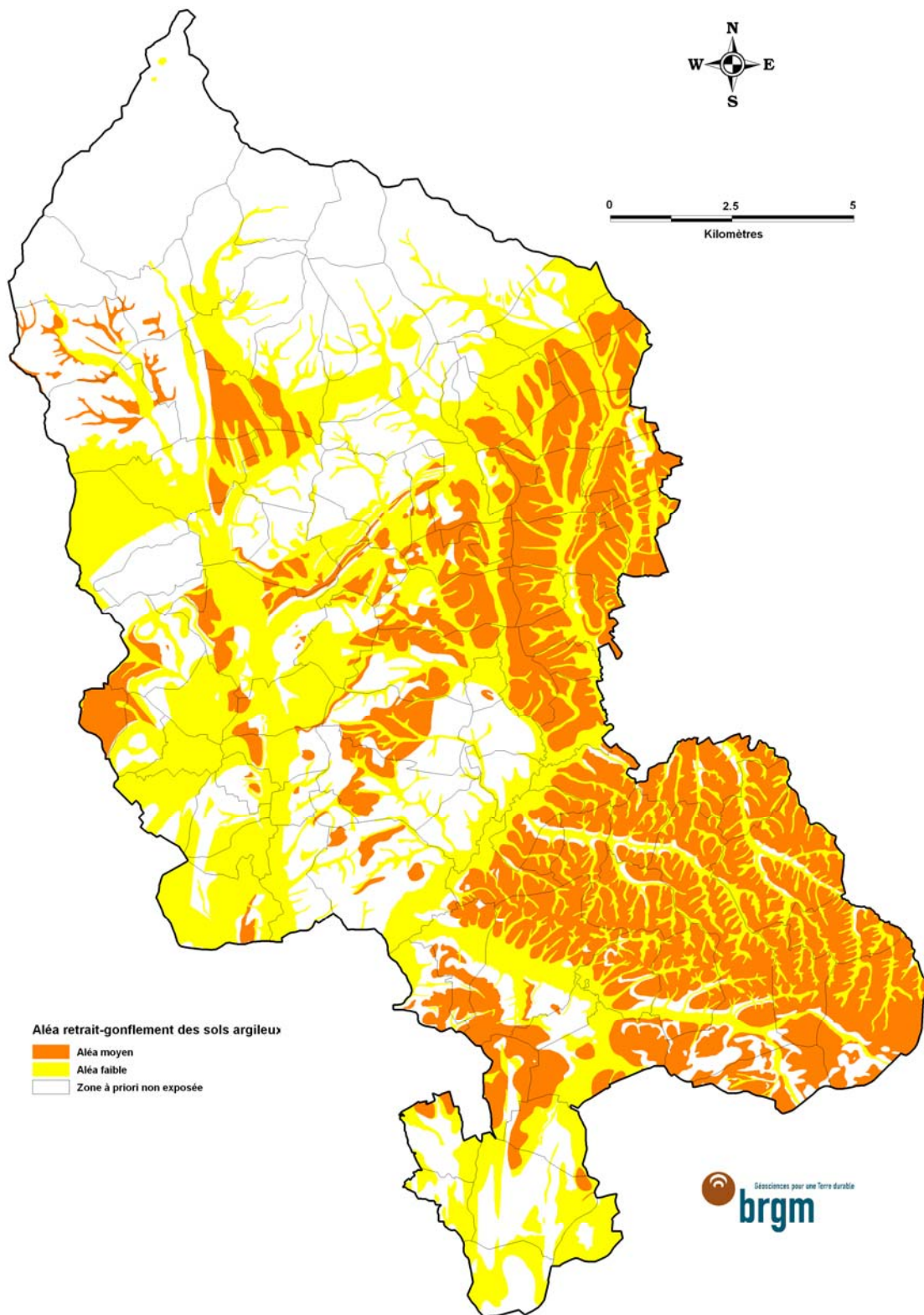


Illustration 55 : Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement du Territoire de Belfort

Les formations retenues sont représentées par deux couleurs (jaune et orange) correspondant à leur niveau d'aléa retrait-gonflement (respectivement faible et moyen).

Les zones blanches de la carte correspondent aux formations *a priori* non argileuses, et donc théoriquement dépourvues de tout aléa. Elles couvrent 38 % de la superficie départementale.

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 dues à l'hétérogénéité de certaines formations essentiellement sableuses ou à l'altération localisée de formations carbonatées. Ces placages ou lentilles argileuses, non cartographiés sur les cartes géologiques (et pour la plupart non cartographiables à l'échelle départementale), sont susceptibles de provoquer localement des sinistres.

Il est à noter que cette carte départementale d'aléa est assez cohérente avec la carte de susceptibilité établie précédemment, sur la seule base d'une caractérisation physique des formations identifiées comme argileuses.

8.3. COHÉRENCE AVEC LES DEPARTEMENTS LIMITROPHES

Les quatre départements limitrophes du Territoire de Belfort, disposent d'ores-et-déjà d'une carte d'aléa publiée. Il s'agit des départements du Doubs (25), de la Haute-Saône (70), du Haut-Rhin (68) et des Vosges (88). L'illustration 56 juxtapose les niveaux d'aléa de quatre départements (le contact avec les Vosges ne s'établissant que par les Limons des plateaux, loëss et lehms également cartographiés en aléa moyen, ce département n'a pas été présenté ici) et l'illustration 57 présente une comparaison de la carte d'aléa retrait-gonflement du Territoire de Belfort avec celle des départements limitrophes.

Les résultats apparaissent comme bien cohérents avec ceux des départements voisins.

Les discontinuités notables qui apparaissent concernent :

- les *Colluvions*, qui sont classées en aléa moyen dans le Doubs et le Territoire de Belfort, alors qu'elles sont en aléa faible en Haute-Saône ; toutefois, les zones de contact de cette formation entre le Territoire de Belfort et la Haute-Saône sont très limitées. Cette différence s'explique notamment par la difficulté d'apprécier le développement des lentilles argileuses dans les formations alluviales ;
- les *Limons des plateaux*, qui sont classées en aléa moyen dans le Doubs, le Haut-Rhin et le Territoire de Belfort, alors qu'elles sont en aléa faible en Haute-Saône ; toutefois, aucun contact n'existe entre le Territoire de Belfort et la Haute-Saône pour cette formation. Cette différence peut s'expliquer par l'origine des matériaux constituant ces dépôts et/ou leurs conditions de dépôt.

La juxtaposition des différentes cartes (Illustration 57) montre également une petite discontinuité avec le Doubs, dans lequel la formation des *Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien – Kimméridgien* n'a pas été conservée parmi les formations

argileuses et marneuses alors qu'elle a été conservée dans la Haute-Saône et le Territoire de Belfort. Cette divergence concerne un faciès de la formation, nommé Calcaires fins à Zellerina astartina et Diceras séparés par des délits marneux (Calcaires de Besançon et de Contejean) sur le Territoire de Belfort. Pour ce type de formation, présentant un terme marneux réduit, il est souvent difficile de trancher entre de l'aléa nul et de l'aléa faible (limite méthodologique).

Code	Notation	Formation	Niveau d'aléa 25	Niveau d'aléa 70	Niveau d'aléa 90	Niveau d'aléa 68
1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Würm à actuel)	Faible	Faible	Faible	Faible
2	F	Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)	Faible	Faible	Faible	Faible
3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	Moyen	Faible	Moyen	
4	LP	Limos des plateaux, loess, lehms (Quaternaire)	Moyen	Faible	Moyen	Moyen
5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	Moyen	Moyen	Moyen	
6	g1a-b	Série grise (Rupélien)			Moyen	Moyen
7	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimméridgien)	Faible		Faible	
8	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien - Oxfordien)	Faible	Faible	Faible	
9	j2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	Faible		Faible	
10	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	Moyen	Moyen	Moyen	
11	l1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)		Faible	Faible	
12	t7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)	Faible	Faible	Faible	
13	t5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	Faible	Faible	Faible	
14	t4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)		Faible	Faible	
15	t3	Grès et marnes (Muschelkalk)		Faible	Faible	
16	r	Silts et pélites rouges (Permien)		Faible	Faible	

Illustration 56 : Comparaison des niveaux d'aléa des quatre départements limitrophes (25, 70, 90, 68)

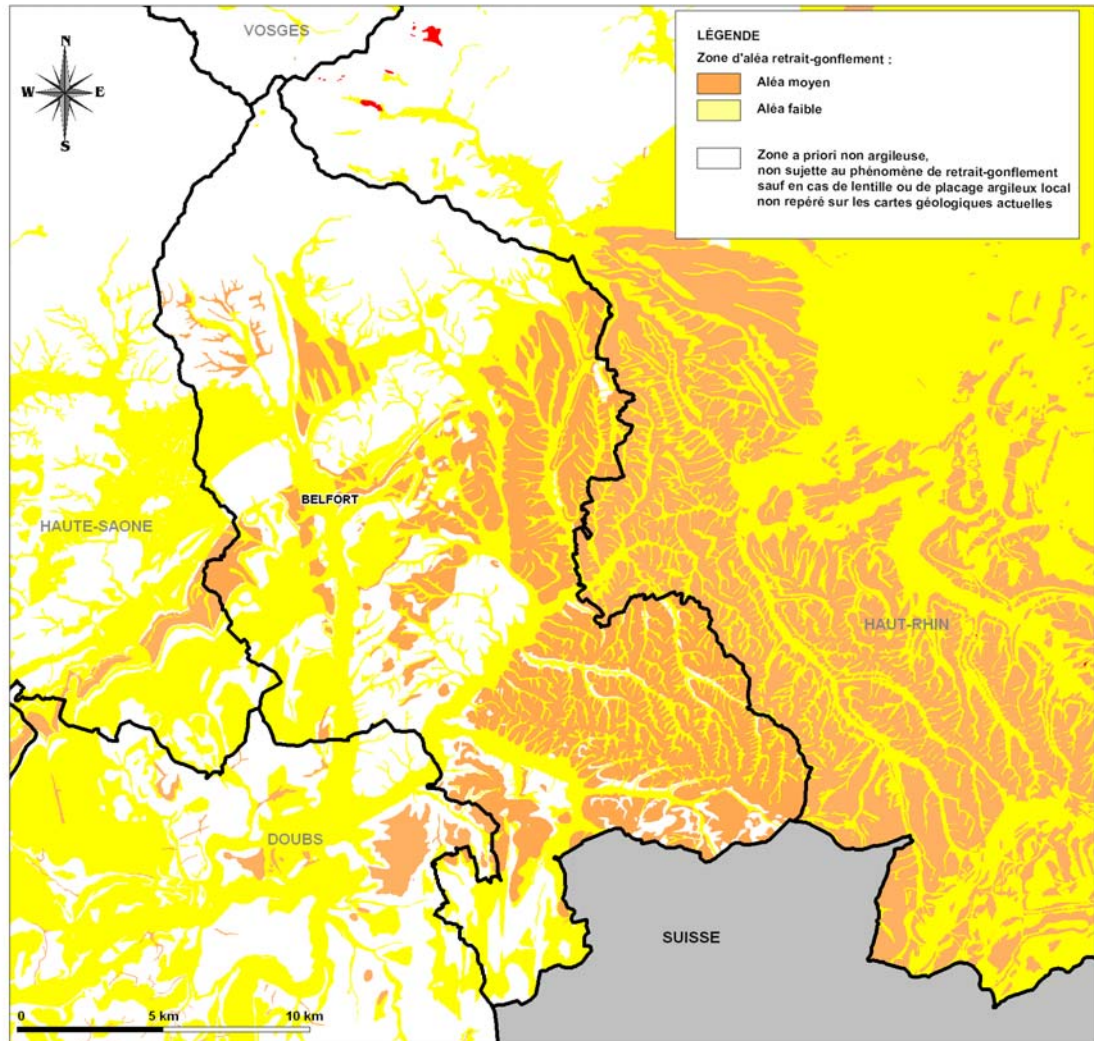


Illustration 57 – Comparaison de la carte d'aléa retrait-gonflement du Territoire de Belfort avec celles des départements limitrophes

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 Territoire de Belfort. 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 la Mer 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 cinquantaine 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 sub-affleurantes, 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 16 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, 9 sinistres répartis dans 3 communes du département ont ainsi été recensés et localisés. Il est à noter que compte tenu de la taille restreinte du département et de cette faible sinistralité, il n'a pas été possible de calculer une note de sinistralité propre au département comme cela est habituellement réalisé dans le cadre de la méthodologie nationale. Celle-ci a donc été extrapolée à partir des formations analogues des départements limitrophes.

En appliquant au département du Territoire de Belfort la méthodologie mise au point au niveau national, aucune formation ici identifiée comme argileuse n'a été classée en aléa fort. Seuls deux niveaux d'aléa (moyen et faible) ont donc été distingués afin de caractériser les formations argileuses ou marneuses vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Sur une superficie départementale totale de 611 km² :

- 28 % ont été classés en aléa moyen ;
- 34 % ont été considérés en aléa faible ;
- 38 % correspondent à des zones *à priori* non concernées par le phénomène.

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 Territoire de Belfort, 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 (Carte 3), 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 au niveau de la parcelle préalablement à toute construction nouvelle dans les secteurs concernés par les formations géologiques à aléa moyen ou faible, notamment en raison de l'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.

10. Bibliographie

Références principales citées dans le texte

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

ASTM D 4546 - 90 (1995) - One-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils, vol. 4.08, pp. 693–699

Barchi P., avec la collab. de **Magalhães S. et Capron A.** (2006) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux sur le département de Meurthe-et-Moselle. Rapport BRGM/RP-54860-FR, 150 p., 22 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t.

Broquet (2004) - Géologie et vins du Jura. Bulletin de Géologie Appliquée. Vol. 7, n° 2, pp. 161-172

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

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

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

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

Doebi F., Müller C., Schuler M., Sittler C. and Weiler H., (1976) - Les Marnes à Foraminifères et les Schistes à Poissons de Bremmelbach (Bas-Rhin). Etudes sédimentologiques et micropaléontologiques. Reconstitution du milieu au début du Rupélien dans le fossé rhénan. Bull. Sci. Géol. 29, pp. 285–320

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

Donsimoni M., avec la collab. de **Bayle E., Le Roy S., Lalleron A.** (2009) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Doubs. BRGM/RP-57338-FR, 150 p., 59 ill., 4 ann., 3 cartes. h.-t., 1 CD-Rom.

Gaudin S. (1997) – Quelques éléments de géologie. Support de cours présenté au BTSA Gestion forestière (Chateaufarine).

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

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

Jauffret D. (2004) – Diagnostic et proposition d'optimisation du réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines en Franche Comté. Rapport BRGM/RP-53553-FR. 18 p., 10 tableaux dans le texte, 2 tabl. et 6 cartes h.-t.

Krencker M., Cruz-Mermy D. (2009) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Haut-Rhin. Rapport BRGM/RP-57374-FR, 109 p., 18 ill., 15 tabl., 4 ann., 3 cartes h.-t.

Lagié B., Nagel J.-L. (2008) – Carte géologique harmonisée du département du Doubs. BRGM/RP-55929FR, 143 p., 6 fig., 2 tabl., 2 pl. h.-t.

Le Roy S., avec la collab. de **Odent B., Bouchut J. et Eglin Y.** (2007) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Côte-d'Or. Rapport BRGM/RP-55427-FR, 133 p., 45 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t.

Le Roy S., Odent B.E. et Vincent M. (2007) – Actualisation de la carte de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de l'Yonne. Rapport BRGM/RP-55546-FR, 37 p., 17 ill., 2 ann., 3 cartes h.-t., 1 CD-Rom.

Le Roy S. avec la collab. de **Plat E., Bouchut J., Odent B.E. et Eglin Y.** (2008) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de Saône-et-Loire. Rapport BRGM/RP-56635-FR, 163 p., 63 ill., 3 ann., 3 cartes h.-t.

Le Roy S. avec la collab. de **Plat E. et Méjean A.** (2009) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Haute-Saône. Rapport BRGM/RP-57196-FR, 138 p., 54 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t., 1 CD-Rom.

Le Roy S. et Méjean A. avec la collab. de **Plat E. et Odent B.E.** (2009) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Jura. Rapport BRGM/RP-57419-FR, 160 p., 56 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t., 1 CD-Rom.

Moiriat D. et Longet A. (2003) – Inventaire départemental des mouvements de terrain de la Haute-Saône. Rapport final. BRGM/RP-52590-FR, 52 pages, 19 fig.

Mouchet (1995) - Le Kimméridgien du Jura central – Microfaciès, minéralogie et interprétation séquentielle. Thèse de la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel, 352 p.

Odent B.E. et Le Roy S., avec la collab. de **Bousquet Y. et Lustgarten A.** (2007) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de la Nièvre. Rapport final – Rapport BRGM/RP-54897-FR. 157 p., 40 ill., 5 ann., 3 pl. h.-t.

Odent B.E., avec la collab. de **Baillet L.** (2005) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de l'Yonne. Rapport final – Rapport BRGM/RP-54100-FR. 177 p., 41 ill., 6 ann., 3 pl. h.-t.

Pellenard et Deconinck (2006) - Mineralogical variability of Callovo-Oxfordian clays from the Paris Basin and the Subalpine Basin. C. R. Geoscience 338, pp. 854– 866

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

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

Sittler (1965) - Le Paléocène des fossés rhénan et rhodanien. Études sédimentologiques et paléoclimatiques. Mém. Serv. Carte Géol. Alsace Lorraine 24, 392 pp.

Sommaruga A. (1997) - Geology of the central Jura and the Molasse Basin: new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. Mém. Soc. neuchâtel. Sci. nat., T. XII, 176 pages, 85 figures, 12 plates, 10 panels.

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

Vernhet Y., Donzeau M. (2004) – Carte géologique harmonisée du département de la Haute-Saône. Rapport BRGM/RP-53505-FR, 208 p., 3 fig., 18 tabl., 2 ann., 2 pl. h.-t.

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 collab. de **Anquetin E. et Krzywda L.** (2008) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Haute-Marne. Rapport BRGM/RP-55957-FR, 112 p., 52 ill., 4 ann., 3 cartes h.t.

Autres références thématiques

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Driscoll R. (1983) – The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain. *Geotechnique*. Vol. XXXIII, pp. 93-105
- Filliat G. (1981) – La pratique des sols et fondations – Éditions du Moniteur. N°/ISBN : 2-86282-162-4
- Flavigny E. (1992) – Discussion de l'article « Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie ». *Rev. Fr. Géotech.*, n° 57, 59, p. 75-78
- Gillot J.S. (1987) – Clay in engineering geology. *In Elsevier (Éd.): Developments in Geological Engineering*, 41, 469 p.
- Havard M. (1996) – Travaux de terrassements et ouvrages en terre. « Le comportement des sols et des ouvrages pendant et après les périodes de sécheresse ». Journées d'Étude de l'École des Ponts, Paris, 11/12/1996
- Holtzapffel T. (1985) – Les minéraux argileux : préparation, analyse diffractométrique et détermination. *Mém. Soc. Géol. Nord*, 12, 136p.
- Kert C. (1999) – Les techniques de prévision et de prévention des risques naturels en France. Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. N° 1540 Assemblée Nationale, n° 312 Sénat, avril 1999
- Lautrin D. (1989) – Utilisation pratiques des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, 160, p. 29-41
- Madsen M.T., Müller-Vonmoos M. (1989). The swelling behaviour of clays. *In Elsevier (Éd.) : Applied Clay Science*, 4, p. 143-156
- Madiou H., Lechani M., Hannachi N. (1997) – Patholex : un système expert pour la pathologie dans la construction. Le cas de la sécheresse. *Sécheresse*, 3, 8, p. 201-206
- Magnan D. (1993) – Caractérisation *in situ* des sols gonflants : l'essai expansol. Thèse de doctorat Univ. Joseph Fourier, Grenoble 1
- Magnan J.P. et Youssefian G. (1989) – Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols. *Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées*, 159, 93-104
- Meisina C., Chassagneux D., Leroi E., Mouroux P. (1998) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux. Proposition de méthodologie. Article et présentation au 8^e Congrès de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement
- Millot G. (1964) – Géologie des argiles. Masson, Paris, 499 p.
- Ministère de l'Environnement, Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques, Délégation aux Risques majeurs (1993) – Sécheresse et Construction. *Guide de Prévention*. Édit. La Documentation Française, Paris
- Mouroux P., Margron P., Pinte J.C. (1988) – La construction économique sur sols gonflants. *Manuel et méthodes* n°14, 125 p., BRGM Éditeur

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

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

Norie A., Vincent M. (2000) – Établissement de Plans de Prévention des Risques Naturels prévisibles : « mouvements différentiels de terrain liés au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux » - Approche méthodologique dans le département des Deux-Sèvres. *Rapport BRGM/RP-50591-FR*, 14 p., 4 fig., 4 ann.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Tessier D. (1990) – Organisation des matériaux argileux en relation avec leur comportement hydrique. *In* Decarreau (Éd.) : Matériaux argileux : structure, propriétés et applications
- Toulemont M. (1996) – Bilan des dommages dus à la sécheresse comme catastrophe naturelle. « Le comportement des sols et des ouvrages pendant et après les périodes de sécheresse ». Journées d'étude de l'École des Ponts, Paris, 11-12 décembre 1996
- Toulemont M., Cojean R., Faccendini J.P. (1994) – Cartographie prévisionnelle des sols sensibles à la sécheresse : un outil d'information préventive. *Mappemonde*, 4, p. 2-4
- Vincent M. (2003) – Retrait-gonflement des sols argileux : méthode cartographique d'évaluation de l'aléa en vue de l'établissement de PPR. – 3^{ème} Conférence SIRNAT - Forum des Journées pour la Prévention des Risques Naturels, Orléans, janvier 2003. Actes du Colloque, 7p., 5 fig.
- Vincent M. (2003) – Le risque de retrait-gonflement des argiles. – Cahiers de l'IAURIF, n°138, octobre 2003, pp.95-101
- Vincent M. (2005) – Cartographie sous SIG de l'aléa retrait-gonflement des argiles à des fins préventives - France – Systèmes d'information géographique et gestion des risques, publication ISTED, janvier 2005, pp.12-15
- Vincent M. (2005) – Prévention du risque sécheresse : cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement des argiles et établissement de plans de prévention des risques. – *Géologues* (revue officielle de l'Union Française des Géologues), 146, septembre 2005, pp.43-47
- Vincent M. (2006) – Retrait-gonflement des sols argileux : un aléa géologique lié aux conditions climatiques – *Géosciences* (la revue du BRGM pour une Terre Durable), n°3, mars 2006, pp. 50 à 55
- Vincent M., Bouchut J., Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. (2006) – Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique. Rapport final de phase 1. Rapport BRGM/RP-54567-FR, 189 p., 127 ill.
- Voltz M., Cabidoche Y.M. (1987) – Sur le retrait macroscopique d'un sol argileux gonflant. Modèle de relation entre le retrait vertical et les variations de teneur en eau. Vérification expérimentale du modèle. *C.R. Acad. Fr.*, Paris, 305, série II, p. 511-516
- Waschkoski (1999) – Expertises géotechniques « sécheresse 1990 » en vue d'une reconnaissance de catastrophe naturelle. *Geo*. p. 38-39

Cartes géologiques

Nom de la carte	N° de la carte	Date de publication de la carte	Auteurs
GIROMAGNY	411	1974	<i>Guintrand Y., Rossi M., Griveaux B., Thiébaud J., Théobald N. (coord.)</i>
THANN	412	1986	<i>Coulon M., Paicheler J.-C., Guérin H.</i>
LURE	443	2000	<i>Contini D., Creuzot J., Dressler M., Théobald N.</i>
BELFORT	444	1963	<i>Théobald N., Devantoy J.</i>
DELLE	475	1985	<i>Bailly C., Chauve P., Martin P.</i>

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 la Mer, sur la prévention des risques majeurs, affichant les risques naturels et technologiques ainsi que les reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle

<http://www.cadastre.gouv.fr>, <http://www.pagesjaunes.fr>, <http://www.mappy.fr>, <http://www.maporama.fr>, <http://www.claritas.fr> : sites internet utilisés pour la localisation des sinistres

http://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal : site internet ayant fourni des données sur la géographie et le climat.

Annexe 1 - Rappels sur le mécanisme de retrait-gonflement des argiles

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

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

À l'échelle microscopique, les minéraux argileux se caractérisent par une structure minéralogique en feuillets. Ceux-ci sont constitués d'un assemblage de silicates (SiO_3) et d'aluminates (Al_2O_3) entre lesquels viennent s'interposer des molécules d'eau. La majorité des minéraux argileux appartient à la famille des phyllosilicates 2:1 (deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique). La structure des assemblages cristallins est variable selon le type d'argile. Certains d'entre eux, telle que la montmorillonite, présentent des liaisons faibles entre feuillets, ce qui permet l'acquisition ou le départ de molécules d'eau. L'hydratation des cations situés à la surface des feuillets provoque leur élargissement, ce qui se traduit par une augmentation du volume du minéral. C'est le phénomène de gonflement intracristallin ou interfoliaire. Le gonflement est lié au phénomène d'adsorption d'eau sur les sites hydrophiles de l'argile. Ce processus est réversible. Un départ d'eau entraîne une diminution du volume du minéral. C'est le phénomène de retrait.

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

À l'échelle macroscopique, ces micro-agrégats de feuillets s'organisent en assemblages plus ou moins anisotropes et cohérents, en fonction de la forme des particules élémentaires qui les composent, et en fonction de la force des liaisons entre particules. Ces dernières sont assurées par des molécules d'eau intercalées. Ce mode d'assemblage, qui définit la texture du « sol argileux » dépend de la nature minéralogique des argiles, du mode de sédimentation et de l'état de consolidation du matériau. En particulier, une argile vasarde ne présentera pas la même texture – et donc pas la même cohésion – qu'une argile surconsolidée, par exemple à la suite d'un enfouissement à grande profondeur. À cette échelle, la variation de teneur en eau dans le sol se traduit également par des variations de volume du matériau. On parle alors de gonflement interparticulaire. Ce phénomène affecte toutes les argiles, mais son amplitude est nettement plus faible que le gonflement interfoliaire (qui n'affecte que certaines argiles).

Les sols argileux se caractérisent donc par une grande influence de la teneur en eau sur leur comportement mécanique. En géotechnique, on identifie d'ailleurs les différents types de sols argileux sur la base de ce critère. Pour cela on détermine les teneurs en eau (dites limites d'Atterberg) à partir desquelles le comportement du

matériau se modifie. Atterberg, puis par la suite Casagrande, ont défini de façon conventionnelle, à partir de la teneur en eau, les limites de divers états de consistance d'un sol donné :

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

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

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

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

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

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

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

Annexe 2 – Regroupement des formations argileuses à partir des formations de la carte géologique harmonisée départementale

CODE_r90	NOTATION_r90	FORMATIONS_r90	CODE_cg190	NOTATION_cg190	DESCR_cg190
1	Fz	Alluvions récentes localement tourbeuses (Wülm à actuel)	3	T	Tourbe
2	F	Alluvions anciennes grossières (Mindel à Riss)	9	Fz	Alluvions récentes sablo-limonneuses et formations colluviales et alluvions peu éboulées des vallées secondaires (Galeis, limons, sables, petits fragments linéaires) (Lage Wülm à Kobenz)
3	C	Colluvions de fond de vallons et de versants (Quaternaire)	17	Fx	Alluvions anciennes d'origine vosgienne (Riss)
4	LP	Limons des plateaux, boss, lehms (Quaternaire)	20	Fw	Galeis, graviers et sables dans une matrice riche en limon et argile (galeis très altérés à non altérés) (Mindel probable)
5	R	Argiles résiduelles d'altération (Céno-Quaternaire)	4	C	Colluvions de fonds de vallons et formations de versants (colluvions très argileuses)
6	g1a-b	Série grise (Rupélien)	6	Sig2	Formation de solifluxion sur marnes oligocènes (marnes oligocènes, boss remaniés, colluvions)
7	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien - Kimmeridgien)	18	LP	Limons des plateaux, boss, lehms
8	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien - Oxfordien)	25	e	Calcaires et marnes lacustres à Planorbis pseudammonius, argiles rouges à granules ferrugineux (Eocène sidérolithique) (Eocène)
9	j2-3	Complexe marno-calcaire (Bajocien supérieur - Bathonien)	22	g1a-b	Marnes micacées argileuses à Eugaleus lauei (Marnes à Milettes) schistes papyracés blanchâtres à Geterhinus parvus (Schistes à Amphylites), marnes bleues à Plectanum carinatum (Marnes à Milettes)
10	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)	24	e7-g1	Marnes altérées du tertiaire indifférencié du Fossé-Rhinan (Eocène supérieur à Oligocène)
11	l1-3C	Calcaire à gryphées et calcaires marneux (Lias)	29	j6M	Marnes avec des intercalations de calcaires fins (Marnes à Astartes) (Kimmeridgien inférieur)
12	t7b	Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)	30	j5c	Calcaires fins à Zellerina astartina et Dioceras séparés par des dolles marneux (Calcaires de Besançon et de Contélan) (Oxfordien supérieur)
13	t5-6	Marnes irisées et dolomies (Keuper)	32	j5C	Calcaires fins et marnes (Calcaires de Clerval) (Facès séquanien - Oxfordien moyen)
14	t4	Couches grises et couches rouges (Muschelkalk)	31	j5CM	Marnes très carbonatées laminées à Thaisasnodes et astartes (Marnes de Besançon) (Oxfordien supérieur)
15	t3	Grès et marnes (Muschelkalk)	34	j5b	Alternance marno-calcaire à ammonites et pyrites et calcaires à siles (Calcaires marneux de Bonnevaux et de la Prairie) (Facès arpinien - Oxfordien moyen)
16	r	Sils et petites rouges (Permien)	35	j4-5	Alternance de calcaires et de marnes à Rengeli (Calcaire marneux de Bucevilles-Gy), argiles bleues à ammonites pyriteuses (Marnes d'Arc-sous-Montenot) (Callovien moyen à Oxfordien inférieur)
			36	j4	Calcaire bioclastiques à li marnoux et coquilles à Diponella marcou (Dalle nacrée), coilles ferrugineuses (Callovien inférieur à moyen)
			37	j3-5	Marnes à Parkinsonia alternant avec de petits bancs calcaires à terobrutales (Marnes de Bavilliers), calcaire micrique à coballes de polyptères (Calcaire de Wailley) (Bathonien inférieur à Callovien)
			38	j3	Marnes à rhynchonelles (Marnes de Belfort) (Bathonien inférieur à supérieur)
			39	j2c	Alternance de calcaires argileux et de marnes (Marnes vésuliennes), calcaire collique et bioclastique (Grande oolite) (Bajocien supérieur)
			41	j2a	Calcaires bioclastiques à entroques à stratifications obliques (Calcaires à entroques de Vesoul) (Bajocien inférieur)
			43	l4b-c	Marnes à bancs de calcaires à Hidoceras bifrons, marnes et siles micacés à Dumortiera (Toarcien moyen à supérieur)
			44	H4S	Marnes schistoides ("Schistes cartons") (Toarcien inférieur)
			45	l4	Marnes grasses à Lyoceras jurense et schistes à Posidonomya bromi (Toarcien)
			46	l3-4	Toarcien et Charmouthien indifférenciés (Charmouthien à Toarcien)
			47	l3	Marnes à amalthées, calcaires marno-sabreux à Pleuroceras (Charmouthien)
			49	l2	Marnes gris-bleu à Asteroceras et Annioceras (Loharringien inférieur)
			48	l2-3	Marnes et calcaires à Gryphaea dilatata, Calcaires à bélemnites (Stémurien supérieur à Carvien)
			51	l7	Marnes rouges (Marnes de Levallois) (Rhétien)
			52	t6M	Marnes irisées (Keuper)
			54	t3b	Groupe de lanhydrite composé de dolomies, de marnes grises (Muschelkalk moyen)
			55	t3a	Marnes et grès coquiller (Muschelkalk inférieur)
			61	l6	Silites argileuses rouge-brunâtre à intercalations de conglomérats et de grès avec quelques passées carbonatées et fins niveaux de cinérites (Permien)

Annexe 3 – Liste et coordonnées des bureaux d'étude ayant fourni des données géotechniques

FONDASOL Montbéliard :

530, avenue René Jacot
25460 ETUPES
Tél. : 03.81.91.77.92
Fax : 03.81.91.77.93

HYDRO'GÉOTECHNIQUE :

RN 6
ZA des Ormeaux
71 150 - FONTAINES
Tél : 03 85 45 88 44
Fax : 03 85 45 88 43

I.C.S.E.O. :

27, rue Œuvre
21 140 SEMUR-EN-AUXOIS
Tél. : 03 80 97 48 80
Fax : 03 80 97 48 89

COMPÉTENCE GÉOTECHNIQUE :

Espace Valentin
1, Chemin des Maurapans
BP 3053
25046 BESANÇON
Tél. : 03 81 80 73 24
Fax : 03 81 85 03 33



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009
45 060 - Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service Risques Naturels et stockage du CO₂
Unité Risques de Mouvements de terrain
117, avenue de Luminy - BP 167
13 276 – Marseille Cedex 09 – France
Tél. : 04 91 17 74 74

**Service géologique régional Bourgogne -
Franche Comté**
Parc Technologique
27, rue Louis de Broglie
21 000 - Dijon - France
Tél. : 03 80 72 90 40