Document public

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

Rapport final

BRGM/RP-57338-FR
septembre 2009

BRGM
3 5000 00053720 8

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Direction départementale de l'Équipement et de l'Agriculture
Doubs

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
PREFECTURE DE REGION FRANCHE-COMTE
PREFECTURE DU DOUBS

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

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

Rapport final

BRGM/RP-57338-FR
septembre 2009

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Service public du BRGM 07RISD04

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

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Emmanuelle PLAT	Nom : Yves SIMÉON
Date : 25 septembre2009	Date : 28 septembre 2009
Signature :	Signature :

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

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Direction départementale de l'Équipement et de l'Agriculture
Doubs

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
PREFECTURE DE REGION FRANCHE-COMTE
PREFECTURE DU DOUBS

Géosciences pour une Terre durable
brgm

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

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

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

© BRGM, 2009, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

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 Doubs fait partie des départements français touchés par le phénomène, puisque 103 sinistres imputés à la sécheresse y ont été recensés et localisés dans le cadre de la présente étude. À la date du 1er septembre 2009, 10 communes sur les 594 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 1er juillet et le 30 septembre 2003, soit un taux de sinistralité de 1,68 %.

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 Doubs, 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 CO_2 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 Direction départementale de l'équipement et de l'agriculture (DDEA) du Doubs.

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 23 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) :

- 7,15 % ont été classés en aléa moyen ;
- 39,65 % ont été considérés en aléa faible ;
- 53,20 % 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 Doubs 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 **13**

2. Méthodologie **15**

2.1. FACTEURS INTERVENANT DANS LE RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES 15
2.1.1. Facteurs de prédisposition 16
2.1.2. Facteurs de déclenchement 19

2.2. MÉTHODOLOGIE 20
2.2.1. Cartographie des formations argileuses ou marneuses 21
2.2.2. Caractérisation lithologique, minéralogique et géotechnique des formations 21
2.2.3. Examen des autres facteurs de prédisposition et de déclenchement 22
2.2.4. Carte de susceptibilité 22
2.2.5. Recensement et localisation géographique des sinistres 22
2.2.6. Détermination des densités de sinistres 23
2.2.7. Carte d'aléa 23

3. Présentation du département du Doubs **25**

3.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE 25
3.1.1. Généralités 25
3.1.2. Régions naturelles et relief 26

3.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL 28
3.2.1. Les formations triasiques 30
3.2.2. Les formations jurassiques 31
3.2.3. Les formations crétacées 31
3.2.4. Les formations tertiaires anté-Pliocène 32
3.2.5. Les formations plio-quaternaires 32
3.2.6. Les formations quaternaires glaciaires et périglaciaires 32

3.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE 33

3.4. CONTEXTE CLIMATIQUE 33

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 38

4.2. LITHOSTRATIGRAPHIE DES FORMATIONS ARGILEUSES AU SENS LARGE38
4.2.1. Formations du Quaternaire 41
(1) – Alluvions récentes (Fz) 41
(2) – Alluvions lacustres et tourbeuses (FzL-T) 42
(3) – Alluvions anciennes (Fx-y) 43
(4) – Colluvions diverses (C) 43
(5) – Recouvrement limoneux (OE) 44
(6) – Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène (FG) 45
(7) – Moraines rissiennes ou würmiennes (Gx-y) 46
4.2.2. Formations du Céno-Quaternaire 47
(8) – Argiles résiduelles d'altération (R) 47
(9) – Sables et cailloutis plio-quaternaires (équivalent de la Formation supérieure de la Forêt de Chaux) (p-IV SC) 48
4.2.3. Formation du Cénozoïque 49
(10) – Marnes et calcaires lacustres de l'Éocène supérieur et de l'Oligocène (e7-g1) 49
4.2.4. Formations du Crétacé inférieur 50
(11) – Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien – Albien (n5-6) 50
(12) – Marnes et calcaires du Crétacé inférieur (n1-3) 51
4.2.5. Formations du Jurassique 53
(13) – Marnes et calcaires à Exogyra virgula du Kimméridgien (j6b) 53
(14) – Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien (j5-6) 54
(15) – Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien (j4-5) 55
(16) – Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien (j5) 57
(17) – Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien (j4) 58
(18) – Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien (j2-3) 59
(19) – Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen (j1-2) 61
(20) – Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien (l4) 62
(21) – Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien (l1-3) 64
4.2.6. Formations du Trias 65
(22) – Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois (t7b) 65
(23) – Marnes irisées et dolomies du Keuper (t5-6) 66

4.3. REMARQUES SUR LES FORMATIONS NON ARGILEUSES 68

5. Caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique des formations retenues 69

5.1. CRITÈRES DE HIÉRARCHISATION 69
5.1.1. Critères retenus 69
5.1.2. Méthode de classification 69

5.2. CRITÈRE LITHOLOGIQUE 70
5.2.1. Définition du critère lithologique et barème 70
5.2.2. Caractérisation lithologique 71

5.3. CRITÈRE MINÉRALOGIQUE 73
5.3.1. Définition du critère minéralogique et barème 73
5.3.2. Caractérisation minéralogique 73

5.4. CRITÈRE GÉOTECHNIQUE 86
5.4.1. Définition du critère géotechnique et barème 86
5.4.2. Teneur en eau (Wn) 87
5.4.3. Indice de plasticité (Ip) 88
5.4.4. Essais au bleu de méthylène (Vb) 89
5.4.5. Retrait linéaire (Rl) 89
5.4.6. Coefficient de gonflement (Cg) 90
5.4.7. Caractérisation géotechnique 91

6. Élaboration de la carte de susceptibilité 93

6.1. DÉTERMINATION DU DEGRÉ DE SUSCEPTIBILITÉ 93

6.2. SYNTHÈSE 94

6.3. CARTE DE SUSCEPTIBILITÉ 95

7. Analyse de la sinistralité 97

7.1. PROCÉDURE DE DEMANDE DE RECONNAISSANCE DE L'ÉTAT DE CATASTROPHE NATURELLE 97

7.2. IDENTIFICATION DES COMMUNES SINISTRÉES 98
7.2.1. Localisation des communes sinistrées 98
7.2.2. Analyse des périodes de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle 101

7.3. COLLECTE DES DONNÉES DE SINISTRES 101

7.4. FRÉQUENCE D'OCCURRENCE RAPPORTÉE A LA SURFACE BATIE 106
7.4.1. Détermination de la densité d'urbanisation par formation 106
7.4.2. Détermination du critère densité de sinistres 108

8. Carte d'aléa 113

8.1. DÉTERMINATION DU NIVEAU D'ALÉA 113

8.2. CARTE D'ALÉA 115

8.3. COHÉRENCE AVEC LES DEPARTEMENTS LIMITROPHES 117

9. Conclusion 121

10. Bibliographie 123

Liste des illustrations

Illustration 1 : Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche 15

Illustration 2 : Localisation du département du Doubs (Image extraite du site internet http://fr.wikipedia.org, au 25/09/09) 25

Illustration 3 : Le département du Doubs et ses principales villes (image extraite du site Internet www.1france.fr, au 25/09/09) 26

Illustration 4 : Coupe équilibrée à travers le Jura entre Besançon (NW) et Saut du Doubs (SE) (Sommaruga, 1997) 27

Illustration 5 : Formes caractéristiques du relief jurassien (Gaudin, 1997) 28

Illustration 6 : Le département du Doubs dans son contexte géologique régional franc-comtois (extrait de la carte géologique de la France à 1/1 000 000, BRGM, 2003) 29

Illustration 7 : Principales caractéristiques météorologiques relevées dans différentes villes (source : http://fr.wikipedia.org) 34

Illustration 8 : Liste des 20 cartes géologiques à 1/50 000 qui concernent le département du Doubs 36

Illustration 9 : Assemblage des 20 cartes géologiques à 1/50 000 qui concernent le département du Doubs 37

Illustration 10 : Liste des formations argileuses du Doubs 39

Illustration 11 : Carte départementale synthétique des formations argilo-marneuses du Doubs 40

Illustration 12 : Répartition départementale des Alluvions récentes (Fz) 41

Illustration 13 : Répartition départementale des Alluvions lacustres et tourbeuses (FzL-T) 42

Illustration 14 : Répartition départementale des Alluvions anciennes (Fx-y) 43

Illustration 15 : Répartition départementale des Colluvions diverses (C) 44
Illustration 16 : Répartition départementale du Recouvrement limoneux (OE) 45
Illustration 17 : Répartition départementale des Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène (FG) 46
Illustration 18 : Répartition départementale des Moraines rissiennes ou würmiennes (Gx-y) 47
Illustration 19 : Répartition départementale des Argiles résiduelles d'altération (R) 48
Illustration 20 : Répartition départementale des Sables et cailloutis plio-quaternaires (p-IV SC) 49
Illustration 21 : Répartition départementale des Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène (e7-g1) 50
Illustration 22 : Répartition départementale des Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien (n5-6) 51
Illustration 23 : Répartition départementale des Marnes et calcaires du Crétacé inférieur (n1-3) 52
Illustration 24 : Répartition départementale des Marnes et calcaires à Exogyra virgula du Kimméridgien (j6b) 54
Illustration 25 : Répartition départementale des Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien (j5-6) 55
Illustration 26 : Répartition départementale des Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien (j4-5) 57
Illustration 27 : Répartition départementale des Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien (j5) 58
Illustration 28 : Répartition départementale des Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien (j4) 59
Illustration 29 : Répartition départementale du Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien (j2-3) 60
Illustration 30 : Répartition départementale des Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen (j1-2) 62
Illustration 31 : Répartition départementale des Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien (l4) 63
Illustration 32 : Répartition départementale des Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien (l1-3) 65
Illustration 33 : Répartition départementale des Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois (t7b) 66
Illustration 34 : Répartition départementale des Marnes irisées et dolomies du Keuper (t5-6) 68
Illustration 35 : Notes attribuées aux formations argileuses en fonction des caractéristiques lithologiques 70
Illustration 36 : Notes lithologiques des 23 formations argileuses retenues 72
Illustration 37 : Notes attribuées aux formations argileuses en fonction du pourcentage de minéraux gonflants 73

Illustration 38 : Données et notes minéralogiques des 23 formations argileuses retenues 85
Illustration 39 : Notes minéralogiques des 23 formations argileuses retenues 86
Illustration 40 : Barême d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de l'indice de plasticité de la formation 88
Illustration 41 : Barême d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la valeur au bleu de méthylène de la formation 89
Illustration 42 : Barême d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du retrait linéaire de la formation 90
Illustration 43 : Barême d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du coefficient de gonflement de la formation 90
Illustration 44 : Synthèse des données géotechniques recueillies et notes géotechniques 92
Illustration 45 : Barême d'attribution d'un niveau de susceptibilité d'une formation argileuse 93
Illustration 46 : Susceptibilité des 23 formations argileuses retenues 93
Illustration 47 : Superficie des formations par niveau de susceptibilité 94
Illustration 48 : Carte de susceptibilité au retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Doubs 96
Illustration 49 : Arrêtés interministériels et occurrences 99
Illustration 50 : Communes concernées par des arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse et nombre de sinistres recensés et localisés 100
Illustration 51 : Tableau de la répartition géologique des 103 sinistres localisés 103
Illustration 52 : Répartition géologique des 103 sinistres localisés 105
Illustration 53 : Carte des zones bâties sur le département du Doubs (source des données BD Topo IGN) 107
Illustration 54 : Nombre de sinistres, surface bâtie et taux d'urbanisation par formation 108
Illustration 55 : Densité de sinistres et notes de sinistralité 110
Illustration 56 : Niveau d'aléa des formations argileuses 114
Illustration 57 : Classement des formations en fonction de leur niveau d'aléa 115
Illustration 58 : Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement du Doubs 116
Illustration 59 : Comparaison des niveaux d'aléa des trois départements limitrophes (39, 25, 70) 119

Liste des annexes

Annexe 1 - Rappels sur le mécanisme de retrait-gonflement des argiles 131

Annexe 2 – Regroupement des formations argileuses à partir des formations de la carte géologique harmonisée départementale 135

Annexe 3 - Résultats des valeurs de bleu de méthylène et d'analyses minéralogiques par diffractométrie aux RX des 18 échantillons prélevés par le BRGM dans le cadre de la présente étude 139

Annexe 4 - Sinistres localisés et communes reconnues en état de catastrophe naturelle 143

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 1er septembre 2009, 10 communes sur les 594 que compte le département du

Doubs ont ainsi été reconnues en état de catastrophe naturelle sécheresse pour la période du 1er juillet au 30 septembre 2003, soit un taux de sinistralité de 1,68 %.

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, 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 27 juillet 2007 avec la DDEA du Doubs.

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.

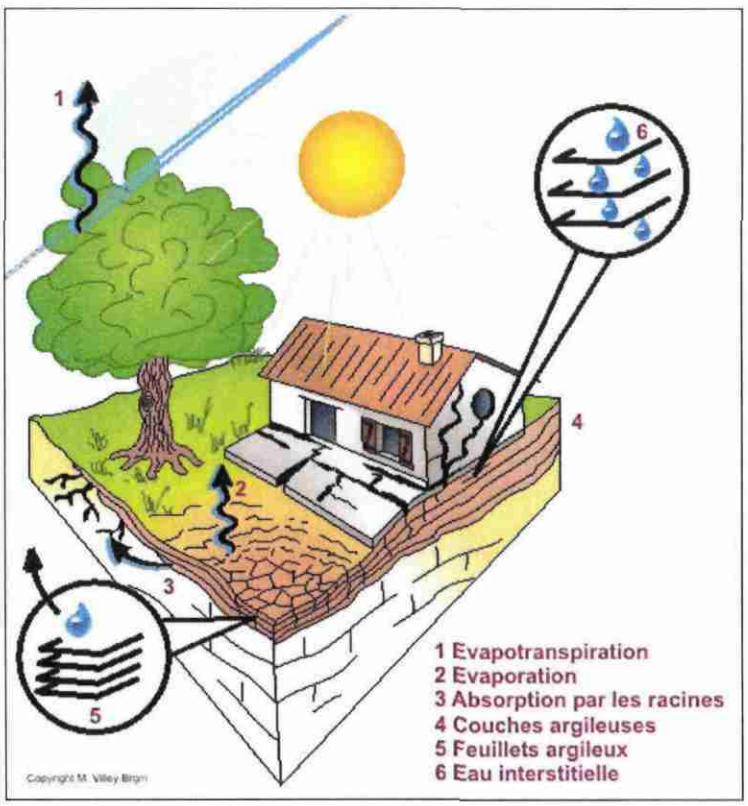


Illustration 1 : Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche

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 Doubs, 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'additionner 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 réalisées en Franche Comté 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 a terme l'ensemble du territoire métropolitain (Vincent *et al.*, 2008), ce qui

permettra d'obtenir des résultats homogènes au niveau national. Les départements voisins de la Haute-Saône (Le Roy *et al.*, 2009) et du Jura (Le Roy *et al.*, 2009) ont déjà fait l'objet d'une telle étude, alors que la cartographie de l'aléa dans le département du Territoire-de-Belfort est actuellement en cours, suivant la même méthodologie.

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 (Lagié et Nagel, 2008). 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 laissaient supposer des comportements semblables vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Cela a permis d'aboutir à la carte départementale synthétique des formations argileuses au sens large. Cette cartographie a été réalisée à l'échelle 1/50 000 (qui correspond donc à l'échelle de validité de la donnée brute), numérisée, puis synthétisée et présentée hors-texte à l'échelle 1/125 000 (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 Doubs.

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. Ces données ont été complétées par les dossiers conservés par la Caisse Centrale de Réassurance et par certains bureaux d'études ou entreprises qui ont accepté que leurs archives soient exploitées à cet effet. Après élimination des doublons (sinistres récurrents sur un

même site ou données identiques issues de sources différentes), ce sont 103 sites de sinistres qui ont été localisés sur cartes topographiques de l'IGN à l'échelle 1/25 000. Ils sont répartis dans 34 communes (dont 6 des 10 communes ayant déjà fait l'objet d'une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle) et l'échantillon peut donc être considéré comme représentatif de l'occurrence spatiale du phénomène dans le département du Doubs, même si le nombre de sinistres n'est pas très conséquent.

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 DDEA du Doubs 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, religieux, 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 à la nature « autre » de la BDTopo.

Ainsi, une hiérarchisation des formations géologiques argileuses et marneuses a été réalisée en fonction du taux de sinistralité ramené à 100 km^2 de formation géologique réellement bâtie.

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 km^2 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 Doubs

3.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

3.1.1. Généralités

Le département du Doubs (25) 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 32 % de la superficie. Il est bordé à l'Ouest et au Sud par le Jura (39), au Nord-Ouest par la Haute-Saône (70), au Nord par le Territoire-de-Belfort (90) et à l'Est par la Suisse avec qui il possède 170 km de frontière.

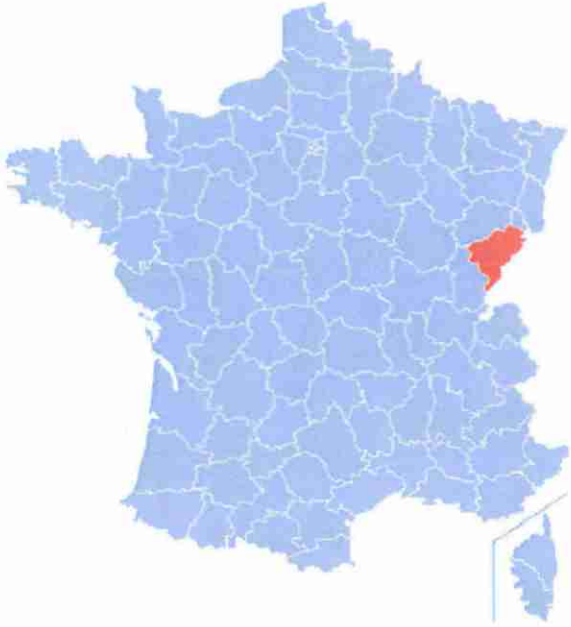


Illustration 2 : Localisation du département du Doubs (Image extraite du site internet http://fr.wikipedia.org, au 25/09/09)

Le département du Doubs, couvre une superficie de 5 228 km² (donnée Dictionnaire des communes du 15 avril 1997). Nous prendrons en compte pour la suite de l'étude les données surfaciques de la BD Carto© de l'IGN de novembre 2006 calculées en coordonnées cartésiennes ; dans ce contexte, la surface du département est évaluée à 5 255 km^2. Le Doubs est doté de 3 arrondissements : à l'Ouest du département, l'arrondissement de Besançon (préfecture), au Nord, l'arrondissement de Montbéliard (sous-préfecture), et au Sud, l'arrondissement de Pontarlier (sous-préfecture) (Illustration 3).

En 2006, le Doubs comptait 516 157 habitants (soit une densité de 98 habitants au km^2) répartis sur 594 communes.

3.1.2. Régions naturelles et relief

La rivière Ognon marque la frontière nord-ouest avec le département de la Haute-Saône. Le Doubs a un tracé plus sinueux : il prend sa source au Sud de Pontarlier, longe la frontière suisse avant de remonter sur Montbéliard et descendre vers Besançon. La Loue et la Dessoubre contribuent au réseau hydrographique du département.

Le département s'étend sur la partie centrale et septentrionale de la Chaîne jurassienne.

Illustration 3 : Le département du Doubs et ses principales villes (image extraite du site Internet www.1france.fr, au 25/09/09)

Le Doubs présente une certaine singularité géographique et géologique. Il dispose d'une grande diversité de milieux naturels et de territoires. Les paysages du Doubs sont assez contrastés, avec de vastes plaines, des plateaux et massifs montagneux boisés, ainsi que des vallées encaissées. Son point culminant est le Mont d'Or, au Sud de Pontarlier (1 463 m). On distingue la partie basse du département, une zone dont les altitudes sont inférieures à 500 m (de Besançon et Montbéliard) et le Haut-Doubs, une zone dont les altitudes sont supérieures à 500 m, qui s'étire le long de la frontière suisse (dont la capitale géographique est Pontarlier).

Le Doubs peut représenter à lui seul le style structural du Jura, massif marno-calcaire d'altitude moyenne. Le département est divisé en trois domaines structuraux très différents ordonnés selon des axes nord-est – sud-ouest (Illustration 4) :

- une zone s'étalant entre les rivières du Doubs et de l'Ognon (NNW du département). Il s'agit du Jura tabulaire, localisée à l'extérieur de l'arc jurassien. Il représente la transition des grabens rhénan et bressan au Bassin de Paris ;
- une zone centrale qui décrit des régions légèrement faillées et sans grand relief, appelées les Plateaux (Bisontin, Ornans, Levier). On parle du Jura externe. Ils sont séparés les uns des autres par des faisceaux (Lomont, bisontin, salinois, des Avant-monts, Mamirolle), qui représentent des zones très étroites fortement déformées, caractérisées par des décrochements et des imbrications. Les faisceaux sont constitués de plis d'axe NE-SW pour le synclinal à fond plat d'Amagney-Roulans (feuille de Vercel) et axe W-E pour l'anticlinal de Buez (feuille de Vercel) et de Lomont (feuille de Montbéliard et Baumes-les-Dames) ;
- le Haut-Doubs ou la Haute Chaîne, au sud-est du département. Il s'agit du Jura interne qui consiste en une succession de plis bien développés (anticlinaux éventuellement « coffrés » et synclinaux). À grande échelle, la déformation est caractérisée par des plis, des chevauchements et des décrochements (Pontarlier). Ces plis sont associés à de nombreuses failles inverses chevauchantes (principalement vers W-NW).

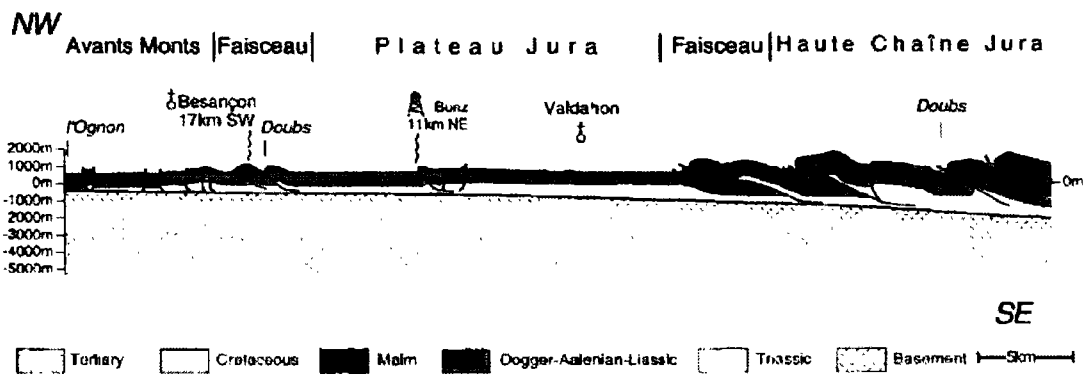


Illustration 4 : Coupe équilibrée à travers le Jura entre Besançon (NW) et Saut du Doubs (SE) (Sommaruga, 1997)

Les formes caractéristiques du relief jurassien appartiennent à la catégorie des grandes architectures topographiques définies par les relations qu'elles entretiennent avec la structure plissée de la région. Cela s'exprime au travers d'un vocabulaire spécifique : on parlera de mont, val, val perché, cluse, combe, crêts... (Illustration 5).

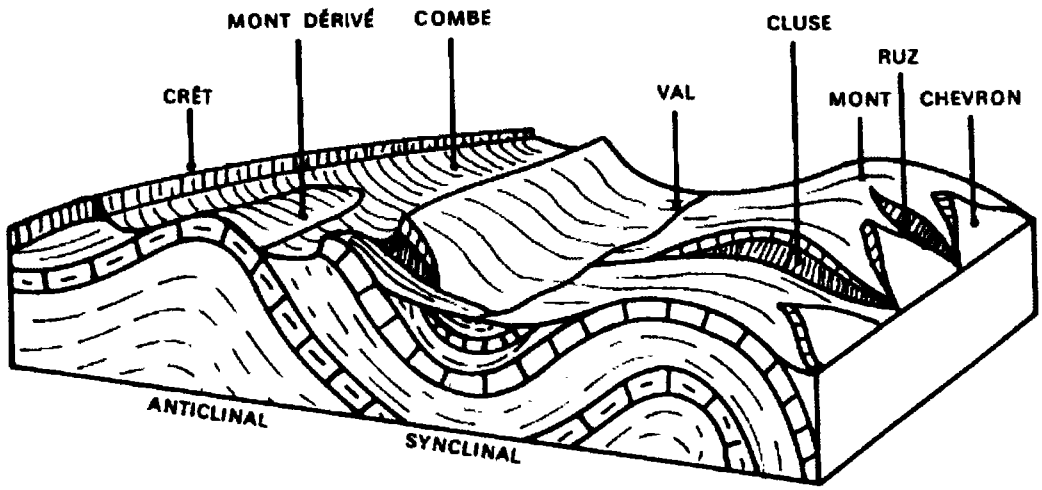


Illustration 5 : Formes caractéristiques du relief jurassien (Gaudin, 1997)

3.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL

Une carte géologique simplifiée de la région de Franche-Comté, tirée de la carte géologique de la France à l'échelle 1/1 000 000 (6ème édition de 2003), résume cette présentation (Illustration 6). L'histoire géologique de la région s'inscrit en grande partie dans celle de la Chaîne du Jura.

La Chaîne du Jura s'allonge en un arc montagneux en forme de croissant dont la convexité est tournée vers le nord-ouest. Avant-pays alpin, il est séparé des Alpes par la dépression molassique qui disparaît au Sud de la région de Voreppe, là ou l'arc jurassien jouxte les massifs subalpins.

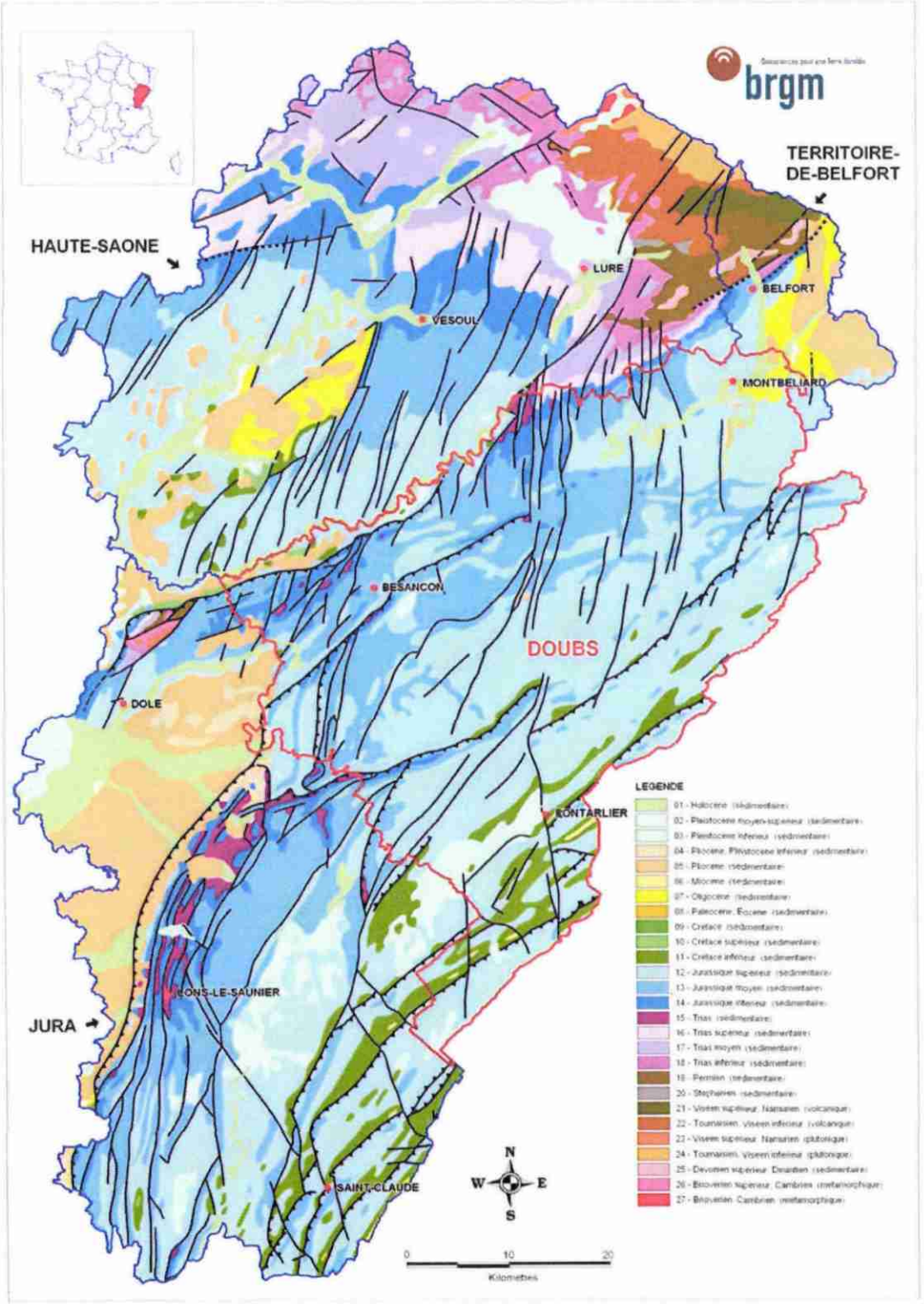


Illustration 6 : Le département du Doubs dans son contexte géologique régional franc-comtois (extrait de la carte géologique de la France à 1/1 000 000, BRGM, 2003)

Les limites du Jura sont relativement nettes car il est bordé sur la plus grande partie de son pourtour par des dépressions : plaine molassique suisse, Bas-Dauphiné, fossé bressan et fossé du Rhin. Au Nord-Ouest, il passe sans discontinuité au bassin de Paris ; au Nord, il s'appuie sur les massifs anciens de la Forêt Noire et des Vosges ; au Sud-Est, il se sépare de la zone subalpine.

L'individualisation du Jura date des grands mouvements tectoniques d'âge tertiaire. Au Secondaire, il a été occupé par une mer épicontinentale qui a déposé une importante masse de sédiments à dominante calcaire et marneuse. Depuis la fin du Crétacé la plus grande partie de sa superficie est restée émergée et soumise à l'érosion.

La structure de la chaîne, qui est contemporaine des grands mouvements alpins, permet de distinguer une région interne par rapport aux Alpes (Haute-Chaîne) où se succèdent des plis réguliers conformes et des chevauchements recoupés par de grands accidents transverses et un domaine plus externe où l'on rencontre des zones tabulaires séparées par des zones étroites et plissées : les faisceaux. La transition avec le bassin de Paris s'effectue progressivement au Nord-Ouest par des zones à caractères mixtes : les zones préjurassiennes.

La chaîne du Jura est constituée essentiellement de terrains mésozoïques (surtout jurassiques) localement recouverts de formations superficielles quaternaires parfois bien développés (principalement des dépôts glaciaires).

Les terrains cénozoïques anté-Pliocène sont peu représentés en surface. Ils affleurent sur de petites superficies au sein des trois grands Domaines (décrits au paragraphe 3.1.2), mais surtout, pour le Miocène, en limite des deux premiers et en bordure de la plaine molassique suisse.

En dehors des formations glaciaires et périglaciaires plus ou moins développées, les formations superficielles sont principalement représentées par les alluvions récentes à actuelles et, dans la Chaîne jurassienne, par des éboulis, des glissements de terrain, des colluvions ou des dépôts résiduels.

Les formations présentes sur le territoire du département du Doubs sont toutes d'origine sédimentaire et s'étagent depuis la base du Mésozoïque (Trias) jusqu'à la période récente à actuelle.

3.2.1. Les formations triasiques

À l'affleurement, les dépôts triasiques sont très restreints. On les trouve au nord de Baume-les-Dames et dans les faisceaux des Avant-monts et bisontin à la faveur de failles inverses chevauchantes et/ou de structures anticlinales. Le Trias moyen représente la base d'un cycle sédimentaire marin qui débute par une transgression de la mer dans la région. Dès lors la sédimentation organo-chimique s'étend, les faciès lagunaires y abondent : marnes bariolées, marnes irisées avec sel gemme et gypse, calcaire coquillier, argiles à lignites. La transgression continue jusqu'à la base des « Grès à Roseaux », grès marneux à lignite, (Keuper moyen) avant que la mer ne se retire. Puis le retour de la mer est marqué par les grès jaunâtres rhétiens (jusqu'à l'Hettangien et les calcaires à gryphées du Sinémurien). Les conditions de dépôts sont

celles d'une mer peu profonde aux eaux agitées (bancs ondulés, surface rubéfiés). La série triasique complète est bien développée en profondeur.

Bien que peu affleurant, 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.

3.2.2. Les formations jurassiques

Elles constituent une série de plusieurs centaines de mètres de calcaires variés, souvent massifs, et de marnes. La série jurassique est complète et tous les étages sont présents. Le Lias est présent au cœur de la plupart des anticlinaux du Jura plissé mais les affleurements sont rares. Essentiellement calcaire, le Jurassique moyen forme l'ossature des anticlinaux du Jura plissé : crêts des anticlinaux de la vallée du Doubs et carapace de certains plis chevauchants.

Dès le Lias moyen s'instaure un régime de dépôts vaseux, indice d'une mer calme, plus profonde, dont le fond est affecté de subsidence. À l'Aalénien, une tendance à l'émersion se manifeste, soulignée par des dépôts ferrugineux. Au Callovien inférieur, se poursuivent des conditions analogues : mer peu profonde, sédimentation à prédominance calcaire où alternent des faciès oolithiques et biodétritiques à stratification souvent entrecroisée (milieu agité), des faciès de calcaires fins sublithographiques (milieu calme) et des faciès récifaux. Le Callovien moyen, absent ou représenté par des faciès condensés à oolithes ferrugineuses, marque un arrêt de la subsidence et une nouvelle tendance à l'émersion. Au Callovien supérieur et surtout à l'Oxfordien inférieur, une séquence argileuse importante se développe et correspond à une période de sédimentation continue. À l'Oxfordien supérieur (faciès rauracien), le développement des récifs et de leurs formations connexes correspond à une diminution de la profondeur des eaux et à un changement des conditions climatiques. Le Jurassique supérieur représente une phase de dépôts à prédominance calcaire dans une mer calme, très peu profonde. L'épaisseur et la nature des dépôts indiquent une subsidence lente et presque continue. Après le Portlandien (Tithonien) marin, la région a émergé et se sont alors formées les couches laguno-lacustres du Purbeckien.

3.2.3. Les formations crétacées

Après une émersion temporaire, la sédimentation crétacée, discontinue et peu puissante, n'est connue que dans le cœur de plusieurs synclinaux dans la Haute Chaîne et présente quelques reliquats dans la vallée de l'Ognon.

Au Crétacé inférieur, une mer peu profonde envahit de nouveau le Jura, et les couches marno-calcaires du Valanginien reposent sur celles du Purbeckien. Cette transgression correspond plutôt à un mouvement eustatique qu'à une déformation de la région. Les apports terrigènes et notamment la limonite sont importants au Valanginien supérieur. Le régime néritique se maintient à l'Hauterivien et se poursuit au Barrémien (barres calcaires massives, faciès « urgonien »). Les calcaires gréseux de l'Aptien ont été enlevés par érosion, puis la mer revient sur le Jura à l'Albien (sables verts glauconieux) et s'y installe jusqu'à la base du Crétacé supérieur. L'émersion définitive de la région

est postérieure au Cénomanien voire post-turonienne, d'où une grande lacune pour tout ou partie du Crétacé supérieur.

Dès la fin du Crétacé, la région évolue dans un cadre continental.

3.2.4. Les formations tertiaires anté-Pliocène

Celles-ci sont très peu représentées dans le département, à l'exception du golfe tertiaire de Montbéliard.

A l'Éocène, le Jura septentrional reste émergé. La surface est soumise à une phase d'altération attestée par des dépôts sidérolithiques (marnes à granules ferrugineux) qui remplissent des poches karstiques, essentiellement au niveau de Montbéliard.

L'Oligocène est marqué par des conglomérats (*Conglomérats de Dijon*, faciès sannoisien) qui témoignent du démantèlement des reliefs, en particulier des calcaires jurassiques (et triasiques) qui fournissent les éléments à leur élaboration. On trouve également des marnes et calcaires lacustres associés. L'origine de ce démantèlement est à chercher dans des déformations dues à une tectonique cassante en rapport avec la formation du fossé rhénan, au Nord. Ces mouvements ont pour conséquences l'apparition de plis bien individualisés et de failles subméridiennes qui guideront ultérieurement la mise en place définitive de la région.

L'ensemble de la région, déformée par le jeu des accidents oligocènes, est soumis à une érosion intense qui tend à niveler les compartiments. Les dépôts miocènes se situent en bordure du Haut-Jura, voire au sein même de ce dernier. Il s'agit de marnes, grès, conglomérats et molasses lacustres. Une phase orogénique majeure post-pontienne (fin-miocène), beaucoup plus intense, a *(1)* accentué les plis déjà bien marqués, *(2)* créé les accidents Est-Ouest qui affectent les plis, *(3)* provoqué le rejeu, en cisaillement et chevauchement, des grandes failles subméridiennes en le compliquant du réseau de failles secondaires. Cette phase accentue aussi le décollement et le glissement de la couverture vers l'ouest.

3.2.5. Les formations plio-quaternaires

Les dépôts plio-quaternaires affleurent dans les vallées de rivières mais aussi par de grandes nappes, comme celle des conglomérats pliocènes de la forêt de Chau. Ces dépôts sont de différentes natures : cailloutis, limons (*Limons de la Bresse*), lœss, lehms, sables, argiles. Ils expriment un milieu continental fluviatile à fluvio-lacustre. La plupart de ces terrains sont représentés par les alluvions d'origine variés (alpine, vosgienne, calcaire, siliceuse).

3.2.6. Les formations quaternaires glaciaires et périglaciaires

Ces dépôts recouvrent partiellement les dépôts précédents. Ces dépôts peuvent être épais et étendus en superficie, notamment dans la région de Pontarlier. On trouve des cônes de déjection torrentiels, des dépôts morainiques (Riss), fluvio-glaciaires (alpin, jurassique) et glaciaires (Würm, jurassien). Ces formations ont une granulométrie variable : galets, cailloutis, sables, limons, argiles.

3.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

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

Le réseau hydrographique est réduit (Doubs, Loue et leurs affluents) et la plus grande partie des eaux de pluie subit au moins un parcours souterrain. D'une manière générale les réseaux souterrains se sont progressivement enfoncés au cours des temps et les sources sortent actuellement au niveau le plus bas. Parmi celles-ci, il faut distinguer les exurgences (source du Doubs), qui sont des sources dont les eaux ont toujours circulé en profondeur, et les résurgences, qui sont la réapparition à l'air libre de cours d'eau qui s'étaient perdus dans les calcaires (source de la Loue). Une mention particulière doit être faite pour la Loue qui est un affluent du Doubs, mais qui est alimentée par des pertes situées dans le haut cours du Doubs (entre Pontarlier et Morteau).

Le territoire se localise dans une région abondamment arrosée (pluviométrie annuelle de 1400 mm) où les réservoirs aquifères sont nombreux et étendus. L'aquifère est présent dans les calcaires karstiques tabulaires du Jurassique et du néo-Crétacé. Le drainage est essentiellement souterrain et les bassins fermés couvrent de grandes surfaces. Les deux principaux cours d'eau présentent une nappe d'accompagnement relativement réduite excepté à Morteau où la vallée du Doubs s'élargit.

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 influeront directement sur la teneur en eau des argiles sus-jacentes, donc sur le retrait ou le gonflement de ces dernières.

3.4. CONTEXTE CLIMATIQUE

Éloigné de l'influence régulatrice de l'océan, le département du Doubs possède une forte influence continentale, neige et fortes gelées l'hiver, sècheresses et chaleur l'été ponctuées par des pluies pouvant être orageuses. Les orages sont particulièrement fréquents et violents dans le Haut-Doubs.

La principale particularité du climat de ce département de vallées, plateaux et montagne est sa grande variabilité aussi bien au cours d'une saison que d'une année sur l'autre.

Les températures du département du Doubs sont le reflet de deux influences : *continentales d'une part et montagnardes d'autre part*. Le Doubs est un des départements les plus froids de France, mais aussi l'un des plus chauds à altitude comparée. L'amplitude entre la température annuelle la plus froide et la plus chaude atteint plus de 70° : 72,4° à Mouthe, 76,7° à Pierrefontaine-les-Varans, 59,5° à Besançon (Illustration 7). Le climat est donc plus continental que montagnard sur le Massif du Jura. Les records de température enregistrés dans quelques villes du Doubs sont présentés sur l'illustration 7.

Contrairement à une idée répandue, il ne fait pas plus froid sur les plateaux du Haut-Doubs qu'à Besançon. Il n'y a pas grande différence de température entre le bas et le haut. La différence de la température moyenne annuelle entre Besançon et Pierrefontaine-les-Varans est de 2,3°C et entre Besançon et Pontarlier, ; de 2,7 °C.

Ville	Record mini (°C)	Record maxi (°C)	Temp. moyenne (°C)	Quantité de pluie et neige par an	Nb de jours avec > 2,5 l/m² par an
Besançon	-20.7	38.8	10.2	1109	108
Isle-sur-le-Doubs	-25.0	39.6	9.2	1110	107
Le Russey	-32.0	36.0	6.1	1347	114
Montbéliard	-23.8	36.5	9.6	1036	99
Mouthe	-41	35.7	5.7	1706	117
Pierrefontaine-les-Varans	-31.9	39.3	7.9	1319	116
Pontarlier	-32.0	36.7	7.5	1471	123

Illustration 7 : Principales caractéristiques météorologiques relevées dans différentes villes (source : http://fr.wikipedia.org)

Concernant les précipitations, le département du Doubs est l'un des plus arrosés de France. La hauteur moyenne annuelle des précipitations (pluie et neige) varie de 1 000 mm en plaine à plus de 1700 mm en montagne. La présence de neige n'introduit de gêne qu'à partir de 700 mètres d'altitude. Le manteau neigeux couvre le sol entre 70 et 120 jours par an. Cependant, sa permanence n'est pas régulièrement assurée au cours de la saison froide, des redoux inopinés pouvant le faire disparaître totalement au cœur de l'hiver.

Avec près de 1.900 heures d'ensoleillement annuel, le département du Doubs est dans la moyenne française, à égalité avec la région toulousaine et angevine. A titre de comparaison, la région parisienne cumule 1.700 heures par an d'ensoleillement et La Rochelle 2.230 heures par an.

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 Doubs, 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 Doubs (Lagié et Nagel, 2008). Les cartes à 1/50 000, réalisées pour un grand nombre d'entre elles dans les années 30 et 80, avec une représentation répondant aux objectifs de l'époque, peuvent présenter localement des lacunes en ce qui concerne notamment les formations superficielles, et leur fiabilité ponctuelle est souvent limitée. Ces cartes ont été partiellement complétées par la consultation de la Banque des données du sous-sol (BSS) du Service Géologique Régional 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 Doubs est entièrement cartographié à l'échelle du 1/50 000. Vingt cartes (Illustration 8 et Illustration 9), publiées entre 1930 (Pontarlier) et 2000 (Lure), concernent peu ou prou le département (certaines coupures telles que celles de Lure, Belfort, Gy, Dole, Champagnole ou Morez n'ont qu'une très petite partie du département du Doubs sur leur territoire).

Nom de la carte	N° de la carte	Date de publication de la carte	Auteurs
LURE	443	2000	*D. Contini, J. Creuzot, M. Dressler, N. Théobald*
BELFORT	444	1948	*N. Théobald, J. Devantoy*
GY	472	1970	*T. Barthélémy, B. Budois, M. Dreyfuss, A. Duchemin, C. Javey, G. Kuntz, J. Martin, R. Mathieu, H. Pierrard, M. Rocca*
BAUME-LES-DAMES	473	1957	*P. Bardet, J. Bulle, P. Cailleteau, M. Campy, J.P. Cautru, D. Contini, M. Dreyfuss, R. Heilammer, H. Hudeley, J. Martin, P. Mosson, J.Y. Pasquier, M. Rollet, J. Seguin, N. Théobald*
MONTBÉLIARD	474	1973	*B. Angely, D. Contini, Y. Kerrien, G. Kuntz, J.L. Laffly, J. Landry, N. Théobald*
DELLE	475	1985	*C. Bailly, P. Chauve, J. Martin*
PESMES	501	1982	*M. Campy, P. Chauve, N. Morre-Biot, C. Pernin*
BESANÇON	502	1934	*A. Bonte, X. Caquineau, P. Celet, D. Contini, R. Cussey, M. Dreyfuss, A. Javey, G. Kuntz, J. Martin, N. Théobald, B. Renard, M. Rollet*
VERCEL	503	1958	*J.P. Cautru, J. Claret, M. Dreyfuss, D. Nicot, J. Patillet, G. Protche, J.C. Seguin*
MAICHE	504	1950	*Cl. Augier, J. Barlier, P. Biens, F. Castelo Branco, F. Derumaux, J. Guillemot, T. Guvenc, F. Jean, F. Melières, J.M. Pierron, R. Rouxel, R. Weber*
DAMPRICHARD	505	1949	*J. Barlier, D. Basseto, J. Bauer ,J. Guillemot, A. Souffès-Desprè, P. Vernhes*
DOLE	528	1979	*P. Chauve, Y. Kerrien, C. Pernin*
QUINGEY	529	1975	*A. Bonte, P. Celet*
ORNANS	530	1930	*J. Both, J. Bulle, J. Cassedanne, M. Chauve, G. Colas, M. Dreyfuss, C. Grandjacquet, C. Sainton, M. Ziegler*
MORTEAU	531	1960	*J. Cassedanne, P. Fallot, G. Fortems, P. Glasson, G. Kuntz, B. Nicklès, M. Nicklès, A. Perrodon, Serra, Cl. Sainton, M. Tixier, P. Umbach-Bascone, M. Ziegler*
SALINS-LES-BAINS	556	1936	*A. Caire*
PONTARLIER	557	1930	*G. Castany, P. Chauve, M. Dreyfuss, S. François, L. Glangeaud, J. Tricart*
CHAMPAGNOLE	582	1965	*S. Guillaume, M-A. Guillaume*
MOUTHE	583	1943	*P. Chauve, M. Dreyfuss, S. Guillaume, J. Tricart*
MOREZ	605	1968	*H. Bergougnan, C. Caron, L. Glangeaud, S. Guillaume, M-A. Guillaume, F. Llac, Ph. Olive, F. Toussaint*

Illustration 8 : Liste des 20 cartes géologiques à 1/50 000 qui concernent le département du Doubs

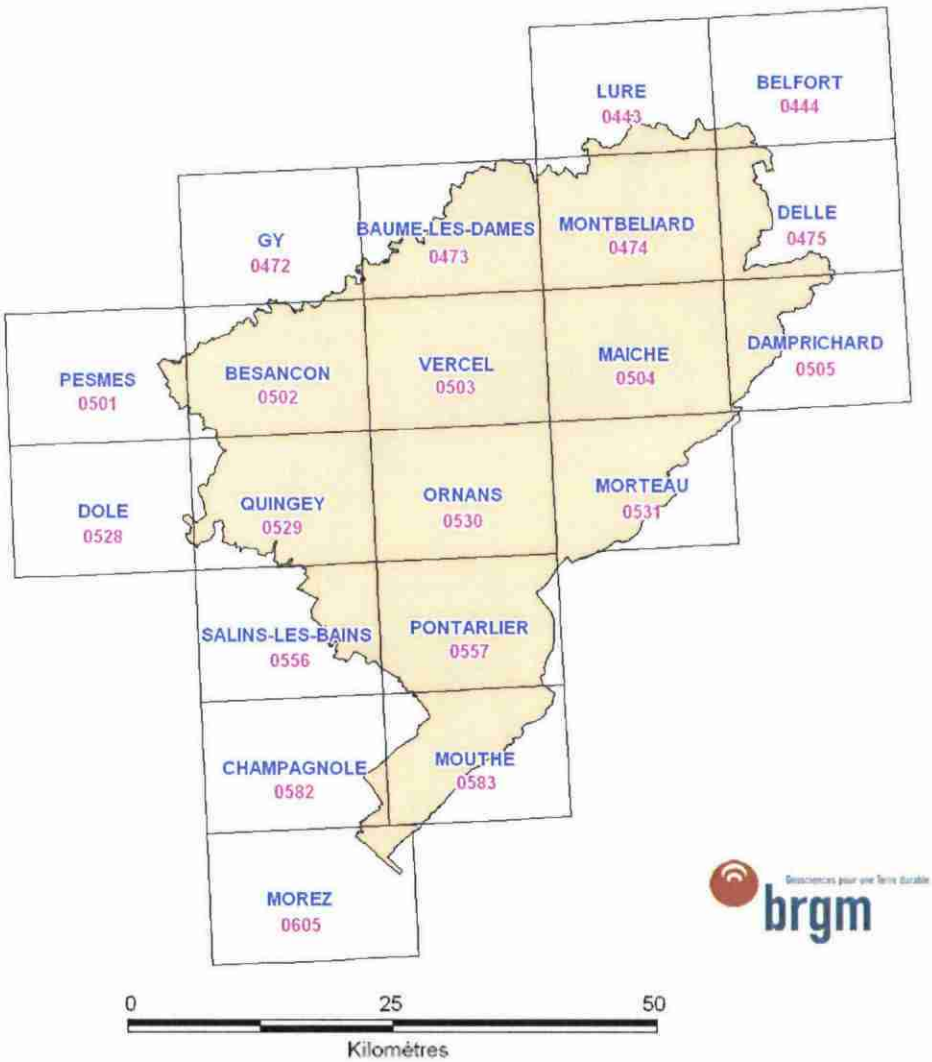


Illustration 9 : Assemblage des 20 cartes géologiques à 1/50 000 qui concernent le département du Doubs

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 Doubs sont très hétérogènes. Il peut s'agir :

- soit de formations intrinsèquement hétérogènes, qui sont constituées d'un mélange de différents matériaux dont des argiles ou des marnes, mais également des éléments plus grossiers (limons, sables, graves...). L'argile est soit mélangée avec les autres constituants, soit présente sous forme de niveaux individualisés, séparés les uns des autres par des interlits non argileux, répartis selon une séquence complexe et qui peut présenter des variations spatiales. Dans ces conditions, il n'est pas possible, à l'échelle départementale, de distinguer précisément les zones contenant de l'argile de celles où elle est totalement absente, et l'ensemble de ces formations, par nature hétérogènes, a été considéré comme argileux ;
- soit de formations à la base très peu argileuses, mais qui, du fait de leur altération, présentent, en de nombreux secteurs, des faciès argileux, notamment dans les premiers mètres de sol. Aussi, il a été décidé en général de considérer l'ensemble de ces formations comme argileuses, d'autant plus qu'elles ont souvent occasionné un nombre de sinistres non négligeable (par exemple, les *Argiles résiduelles d'altération*).

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 Doubs constitue finalement une représentation interprétée des zones potentiellement sujettes au phénomène de retrait-gonflement, en fonction des données actuellement disponibles au travers de la représentation cartographique des formations superficielles du département. Vingt-trois 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 Doubs retenues dans le cadre de cette étude.

Le tableau de l'illustration 10 présente la succession stratigraphique des 23 formations argileuses, au sens large, retenues dans le département du Doubs. Ce sont en réalité des regroupements de formations géologiques ayant les mêmes caractéristiques lithologiques. Ces regroupements ont été effectués à partir des formations identifiées sur la carte géologique harmonisée du département du Doubs (Lagié et Nagel, 2008) ; ils sont présentés sur l'Annexe 2.

Age		Code	Notation	Formation	Surface (km²)	% Surface départ.
QUATERNAIRE		1	Fz	Alluvions récentes	246.26	4.69
		2	FzL-T	Alluvions lacustres et tourbeuses	38.54	0.73
		3	Fx-y	Alluvions anciennes	48.88	0.93
		4	C	Colluvions diverses	34.03	0.65
		5	OE	Recouvrement limoneux	15.87	0.30
		6	FG	Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène	10.32	0.20
		7	Gx-y	Moraines rissiennes ou würmiennes	148.95	2.84
CENO-QUAT.		8	R	Argiles résiduelles d'altération	74.62	1.42
		9	p-IV SC	Sables et cailloutis plio-quaternaires (équival. de la Form. sup. de la Forêt de Chaux)	56.94	1.08
CENOZOIQUE		10	e7-g1	Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène	7.22	0.14
CRETACE	INF.	11	n5-6	Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien	1.29	0.02
		12	n1-3	Marnes et calcaires du Crétacé inférieur	94.59	1.80
JURASSIQUE	SUP.	13	j6b	Marnes et calcaires à *Exogyra virgula* du Kimméridgien	21.33	0.41
		14	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien	213.86	4.07
	MOY. - SUP.	15	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien	470.51	8.97
		16	j5	Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien	41.48	0.79
		17	j4	Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien	307.24	5.85
	MOY.	18	j2-3	Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien	10.79	0.21
		19	j1-2	Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen	431.71	8.23
	INF.	20	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien	111.17	2.12
		21	l1-3	Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien	41.06	0.78
TRIAS		22	t7b	Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois	8.85	0.17
		23	t6-7	Marnes irisées et dolomies du Keuper	20.35	0.39
				Total Formations argileuses	2 455.86	46.79
		998	NA	Formations à priori non argileuses	2 792.39	53.21
		999	HYDRO	Zones aquatiques	7.11	0.14
				Total département sans zones aquatiques	5 248.25	100.00

Illustration 10 : Liste des formations argileuses du Doubs

Leur extension géographique est représentée sur la carte départementale synthétique des formations argilo-marneuses (Illustration 11) également illustrée en planche hors-texte à l'échelle 1/125 000 (Carte 1).

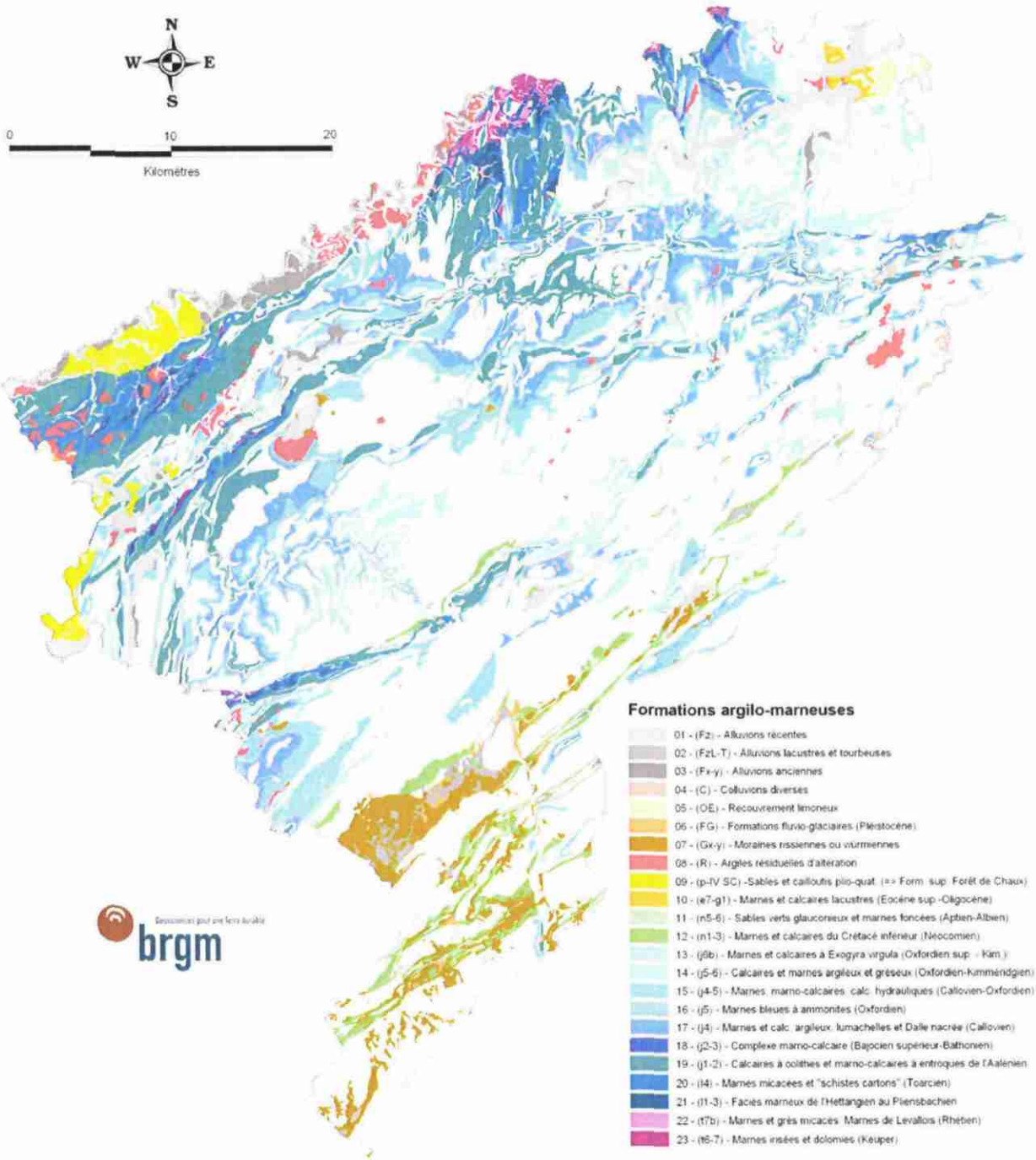


Illustration 11 : Carte départementale synthétique des formations argilo-marneuses du Doubs

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 Doubs, présentent une grande similitude lithologique avec les départements limitrophes 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 dans ces deux autres départements en 2009 et repris les appellations qui y avaient été utilisées. De même, pour ces formations, certaines descriptions sont identiques car ces trois départements présentent des feuilles géologiques communes.

4.2.1. Formations du Quaternaire

(1) – Alluvions récentes (Fz)

- Surface d'affleurement : 246,26 km² (Illustration 12)
- Pourcentage de la surface départementale : 4,69 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 4ème

Cette formation étendue est par nature très hétérogène, avec une granulométrie variée, allant des galets et blocs aux argiles (Illustration 12). L'ensemble reste essentiellement sablo-argileux à caillouteux, localement tourbeux, sur 6 à 12 m d'épaisseur. Les alluvions de l'Ognon semblent plutôt grossières (graveleuses à sableuses). Il faut toutefois noter que même lorsqu'elles sont plutôt grossières, ces alluvions présentent généralement une matrice de limons argileux emballant les graviers ou les sables. Ces alluvions sont particulièrement carbonatées dans la vallée du Doubs. Enfin, des niveaux tourbeux localisés essentiellement dans les zones humides ont été intégrés à ces formations alluviales, compte tenue 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.

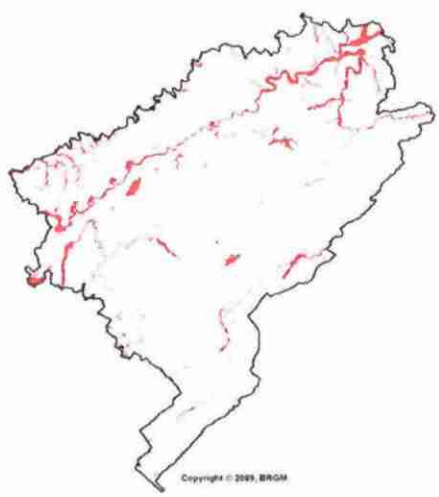


Illustration 12 : Répartition départementale des Alluvions récentes (Fz)

(2) – Alluvions lacustres et tourbeuses (FzL-T)

- Surface d'affleurement : 38,54 km² (Illustration 13)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,73 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 14ème

Cette formation regroupe des alluvions récentes et glacio-lacustres du massif du Jura (Illustration 13). L'essentiel de la formation est représenté par des alluvions glacio-lacustres, principalement présentes au niveau de la combe d'Ain et dans la dépression de la Thoreigne, et le plus souvent représentées par des argiles varvées, présentant une puissance pouvant atteindre une trentaine de mètres. Elles sont formées d'une alternance de couches silteuses claires et sombres se délitant facilement par paire au niveau d'intercouches plus grossières. Localement, des couches de sables grossiers s'interstratifient dans les dépôts silteux et des blocs peu émoussés de facture glaciaire interrompent la sédimentation fine. Un matériel grossier à sables et galets forme parfois un placage métrique sur ces dépôts.

Dans les zones marécageuses ou les vallées mal drainées peuvent également être rencontrés des niveaux tourbeux parfois accompagnés d'intercalations argileuses dans les alluvions lacustres. Ces tourbes ont été conservées ici en raison de leur très forte compressibilité pouvant occasionner des dommages au bâti, bien qu'il ne s'agisse pas de phénomènes de retrait-gonflement *sensu-stricto*.

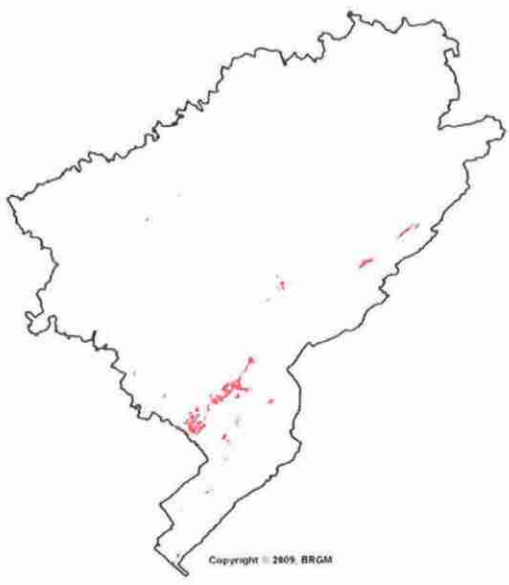


Illustration 13 : Répartition départementale des Alluvions lacustres et tourbeuses (FzL-T)

(3) – Alluvions anciennes (Fx-y)

- Surface d'affleurement : 48,88 km² (Illustration 14)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,93 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 11ème

Affleurant assez peu dans le nord du département (Illustration 14), cet ensemble alluvial épais d'une dizaine de mètres se révèle souvent assez grossier. Il s'agit, en effet, en général, de matériaux limoneux, sableux ou graveleux, voire de galets de petite taille dans une matrice argilo-sableuse, emballés dans des limons ou des lehms pouvant se révéler localement très argileux. Ces formations alluviales peuvent être recouvertes par des argiles à chailles ou des sables argileux, parfois altérés ou emballés par des lehms.

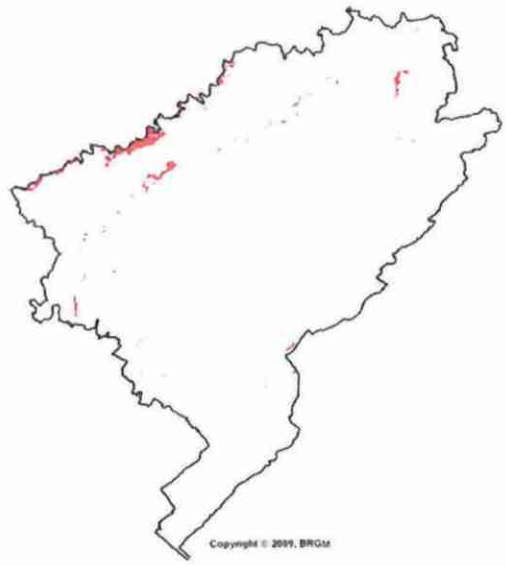


Illustration 14 : Répartition départementale des Alluvions anciennes (Fx-y)

(4) – Colluvions diverses (C)

- Surface d'affleurement : 34,03 km² (Illustration 15)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,65 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 15ème

Cet ensemble colluvial (Illustration 15), 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 fluviatiles. Elles recouvrent souvent les formations marneuses du Jurassique, tout en étant elles-mêmes parfois surmontées localement de lehms. Cependant, mêmes grossières, ces colluvions restent souvent emballées dans une matrice très argileuse. Les blocs et cailloutis peuvent être soit calcaires, lorsqu'ils proviennent des formations jurassiques, soit gréseux, lorsqu'ils sont issus de formations triasiques. Les éboulis ont, dans la mesure du possible, été considérés comme non argileux, et seuls les éboulis explicitement argileux ou limoneux ont été conservés. D'après la feuille de Lure (443), ces colluvions, lorsqu'elles sont franchement argileuses, peuvent atteindre 5 à 6 m d'épaisseur.

Illustration 15 : Répartition départementale des Colluvions diverses (C)

(5) – Recouvrement limoneux (OE)

- Surface d'affleurement : 15,87 km² (Illustration 16)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,30 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 18ème

Cet ensemble limoneux est particulièrement présent sur la feuille de Delle (475) (Illustration 16). Les lambeaux de plateaux découpés par le réseau hydrographique sont fréquemment recouverts d'une formation limoneuse d'épaisseur variable (localement plus de 80 cm). Il s'agit de loess décalcifiés (loess-lehms). La teinte est ocre pâle ou grise. Ces formations sont responsables d'une certaine rétention d'eau donnant un aspect marécageux à certains endroits. Localement ces formations peuvent se mélanger aux argiles résiduelles provenant de l'altération des formations sous-jacentes. L'origine de ces placages, peu épais et limoneux, est variée. Il s'agit le plus souvent d'un mélange d'argiles de décalcification, issues de l'altération

superficielle et du transport par ruissellement de formations plus sableuses, mais aussi d'apports éoliens.

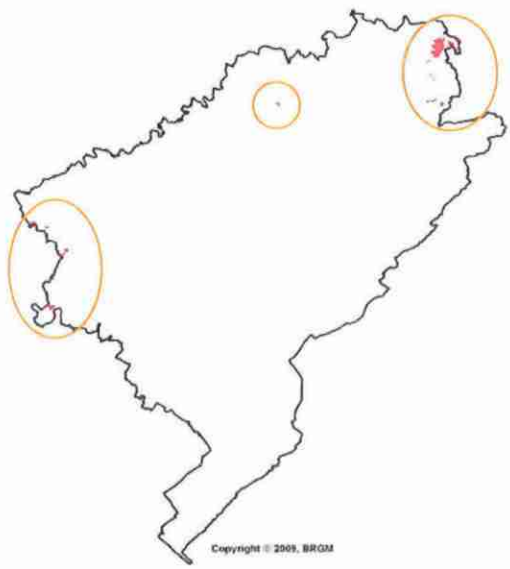


Illustration 16 : Répartition départementale du Recouvrement limoneux (OE)

(6) – Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène (FG)

- Surface d'affleurement : 10,32 km² (Illustration 17)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,20 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 20ème

Peu étendues, les formations fluvio-glaciaires rencontrées dans le sud du département datent du Würm et du Riss. Elles se présentent le plus souvent sous la forme de moraines ou de galets (quartzites, roches volcaniques, parfois granitiques, plus rarement des grès ou des poudingues pour les dépôts du Riss…) parfois très altérés et noyés dans une matrice argileuse. De gros blocs erratiques de plusieurs mètres de diamètre peuvent être rencontrés localement. En l'absence de matrice argileuse ou en cas d'induration, les faciès n'ont pas été retenus dans cette formation.

Illustration 17 : Répartition départementale des Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène (FG)

(7) – Moraines rissiennes ou würmiennes (Gx-y)

- Surface d'affleurement : 148,95 km² (Illustration 18)
- Pourcentage de la surface départementale : 2,84 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 6ème

Très présentes dans le sud du département, cette formation est en général peu épaisse. Accumulée pour l'essentiel lors des périodes glaciaires du Riss et du Würm (Quaternaire) dans les dépressions synclinales, elle est principalement constituée de matériaux grossiers, généralement d'origine locale, enrobés dans une matrice abondante, plus ou moins argileuse, voire marneuse.

Pour un premier faciès, nommé *Moraines de fond*, les matériaux grossiers, abondants, hétérométriques et sans stratification, sont en général de nature calcaire, mais quelques éléments alpins peuvent être rencontrés. L'origine de ces éléments alpins est supposée être soit anthropique, soit liée à un remaniement de dépôts glaciaires plus anciens. Le second faciès, plus rare, correspond aux moraines d'ablation périphérique. Il est caractérisé par des faciès plus différenciés où s'intercalent des niveaux triés par les eaux de fonte des glaces.

Dans la région de Frasne, les moraines würmiennes sont décrites comme une alternance de lits à granulométrie fine, de niveaux caillouteux et d'argiles à blocaux, remaniée partiellement par les eaux courantes lors du recul des glaciers, et disséquée par des ruisseaux. Des sols tourbeux peuvent aussi être rencontrés localement.

D'après la notice de la feuille de Champagnole (582), les moraines auraient subi un écoulement globalement orienté vers le nord-ouest sous l'effet de la glace. Cependant,

certains auteurs perçoivent plutôt des déplacements induits par des glaciers venus du nord, les glaces alpines n'ayant pu franchir les monts du Jura que de façon très limitée.

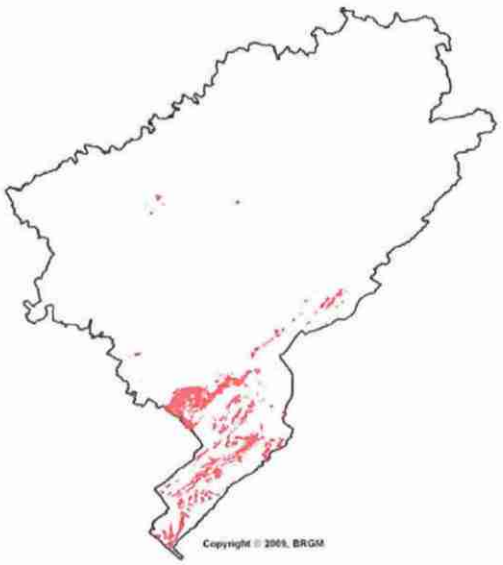


Illustration 18 : Répartition départementale des Moraines rissiennes ou würmiennes (Gx-y)

4.2.2. Formations du Céno-Quaternaire

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

- Surface d'affleurement : 74,62 km² (Illustration 19)
- Pourcentage de la surface départementale : 1,42 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 9ème

Ces faciès argileux, répartis dans la moitié nord du département, regroupent essentiellement, d'une part, des argiles d'altération, le plus souvent à chailles, parfois à pisolithes ferrugineuses, et d'autre part, des argiles à silex datées de l'Oligocène.

Les argiles d'altération sont le plus souvent issues de la décarbonatation des calcaires jurassiques, et en particulier de l'Oxfordien, mais elles peuvent prendre naissance sur tous les terrains secondaires et tertiaires. Elles ont souvent été remaniées soit par solifluxion, soit par ruissellement ou entrainement par les cours d'eau, ce qui a provoqué des accumulations importantes sur plusieurs mètres dans les points bas. Elles contiennent souvent des nodules siliceux dont la taille est comprise entre 1 et 25 cm, noyés dans une matrice argileuse jaune-roux. Ces chailles viennent pour la plupart des « terrains à chailles » oxfordiens, plus rarement des nodules siliceux du Bajocien. Le degré d'altération des chailles est variable. Présentant une patine

brunâtre ou jaunâtre, elles se trouvent à l'état roulé et mélangées à des fragments calcaires et à des sables dans les nappes alluviales. L'altération a dû se produire sous un climat chaud, plus ou moins humide comme il a pu en exister dans la région, du Crétacé jusqu'au milieu du Tertiaire surtout, voire plus tard, mais dans une moindre mesure. Sur la feuille de Quingey (529), ces altérites se présentent sous la forme d'argiles rouges ou jaunes ferrugineuses à pisolithes limonitiques de taille variant entre 1 et 50 mm. Elles tapissent le sol ou remplissent des poches ou fentes karstiques. Certaines d'entre elles, traversées par le pipe-line Sud-Européen, ont plus de 2 m de profondeur. Les dépôts sont plus fréquents au niveau de l'Oxfordien où ils sont très riches en fer. Il en existe aussi sur le Bajocien. Cette altération sidérolithique de nature climatique et pédogénétique a provoqué une rubéfaction intense et un enrichissement en fer ainsi qu'une néogenèse phylliteuse.

Les argiles vertes à silex de l'Oligocène inférieur renferment de minces lits calcaires généralement silicifiés, donnant de nombreux silex plats ayant constitué la matière première de plusieurs ateliers de taille préhistorique.

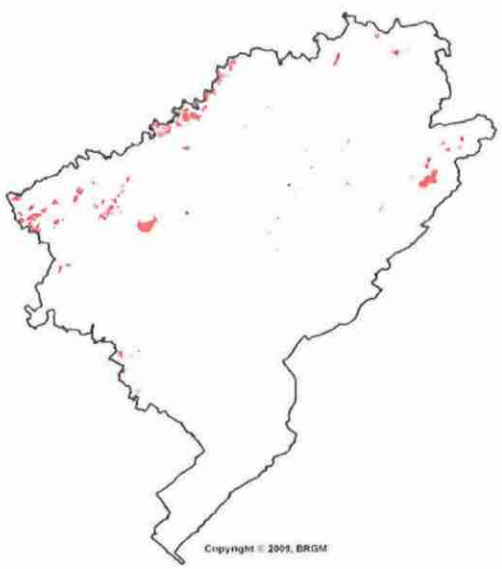


Illustration 19 : Répartition départementale des Argiles résiduelles d'altération (R)

(9) – Sables et cailloutis plio-quaternaires (équivalent de la Formation supérieure de la Forêt de Chaux) (p-IV SC)

- Surface d'affleurement : 56,94 km² (Illustration 20)
- Pourcentage de la surface départementale : 1,08 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 10ème

Affleurant à l'ouest du département, cette formation regroupe l'essentiel des formations plio-quaternaires qui recouvrent les marnes de Bresse. Dans le Doubs, cette formation est représentée essentiellement par une formation équivalente aux *Cailloutis supérieurs et conglomérats de la Forêt de Chaux*. Épaisse d'une trentaine de mètres, cette formation est assez similaire à celles des cailloutis inférieurs, et se confond même avec elle dans sa partie orientale. Elle se compose d'une matrice rouge, sablo-argileuse, enrobant des chailles et galets de tailles diverses, dépassant parfois 30 cm de diamètre et assez abondants (jusqu'à 9 %). Les galets de roches cristallines ou cristallophyliennes sont absents, signe d'une altération qui les aurait détruits. Les *Sables et cailloutis plio-quaternaires* sont également parfois décrits comme des poudingues à matrice argileuse et galets de tailles diverses (parfois supérieures à 30 cm de diamètre), de quartz, de quartzites gris peu altérés, de roches métamorphiques diverses, etc. Ces dépôts fluviatiles de type deltaïque s'accumulent parfois sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur et sont enrobés dans une argile rougeâtre.

Illustration 20 : Répartition départementale des Sables et cailloutis plio-quaternaires (p-IV SC)

4.2.3. Formation du Cénozoïque

(10) – Marnes et calcaires lacustres de l'Éocène supérieur et de l'Oligocène (e7-g1)

- Surface d'affleurement : 7,22 km² (Illustration 21)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,14 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 22ème

Présent à l'extrémité nord du département sur une faible superficie, l'Éocène supérieur et l'Oligocène regroupent différents faciès.

À la base, le Stampien inférieur (Sannoisien) est représenté par le Système de Bourogne, composé de conglomérats, marnes et calcaires. Ces formations sont connues ici en faciès côtier du Golfe de Montbéliard ; leur épaisseur et la succession des faciès sont donc variables. Elles débutent généralement par des poudingues calcaires avec intercalations molassiques reposant sur les terrains jurassiques. À ces poudingues de base succède une alternance de niveaux marneux gris ou lie-de-vin et de calcaires en plaquettes ou rognonneux. Ces calcaires prennent parfois un aspect gréseux. Un nouvel épisode conglomératique apparaît, surmonté de marnes lie-de-vin. Sur la route de Dasle ou au nord-est d'Etupes, l'épaisseur de la formation peut atteindre 45 à 50 m.

Au dessus, le Stampien supérieur (Rupélien) est représenté par des argiles et marnes riches en mica, localement sableuses, contenant des septaria.

Illustration 21 : Répartition départementale des Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène (e7-g1)

4.2.4. Formations du Crétacé inférieur

(11) – Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien – Albien (n5-6)

- Surface d'affleurement : 1,29 km² (Illustration 22)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,02 %

- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 23ème

D'extension très limitée dans le département, cette formation est représentée essentiellement par des sables glauconieux. Principalement observée lors de terrassements, sa limite inférieure est mal connue, alors que sa limite supérieure correspond parfois à une rupture de pente. Les sables verts glauconieux, quartzeux et argileux, contiennent des fossiles phosphatés, et sont localement surmontés de marnes noires qui peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur.

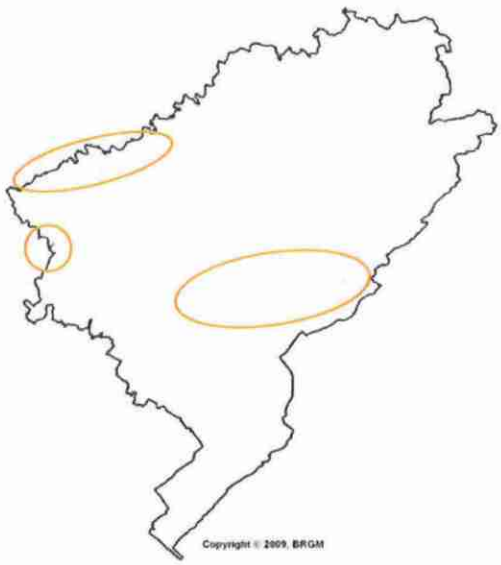


Illustration 22 : Répartition départementale des Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien (n5-6)

(12) – Marnes et calcaires du Crétacé inférieur (n1-3)

- Surface d'affleurement : 94,59 km² (Illustration 23)
- Pourcentage de la surface départementale : 1,80 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 8ème

Cet ensemble carbonaté affleure en « lanières » dans la moitié sud du département. Il regroupe des faciès correspondant au Valanginien et à l'Hauterivien, et dans une moindre mesure au Berriasien.

Surmonté d'un niveau marneux d'épaisseur métrique, l'Hauterivien, difficile à discerner du Barrémien, est représenté par un faciès appelé *Pierre jaune* sur la feuille de Morez (605). Ce faciès correspond à un calcaire, en petits bancs à stratification entrecroisée, riche en glauconie et débris d'organismes, pouvant atteindre une trentaine de mètres d'épaisseur. La partie inférieure de l'étage correspond aux *Marnes d'Hauterive*, épaisses de 20 à 30 m. Ce complexe est à dominante marneuse, mais les intercalations calcaires y sont fréquentes. Sur la feuille de Champagnole (582),

l'Hauterivien est représenté au sommet par 1,5 m d'un complexe marneux surmontant 10 à 12 m de calcaires ocre oolithiques ou graveleux, dont certains niveaux sont bioclastiques et glauconieux, puis une formation à dominante marneuse (2,50 m), des calcaires bioclastiques (4 à 5 m) et une alternance de marnes et calcaires marneux, souvent glauconieux, dessinant une combe nette (30 m environ).

Le Valanginien est représenté au sommet par un niveau de calcaires rougeâtres couronnant des calcaires roux bien stratifiés, alternant parfois avec des marnes bleues, riches en débris de bryozoaires et d'échinodermes, pauvres en limonite, oolithiques et graveleux, épais de quelques mètres à 35 m. Ils sont limités à leur base par un complexe de marnes et calcaires marneux à trocholines, correspondant aux Marnes d'Arzier, pouvant atteindre une dizaine de mètres d'épaisseur. Le Valanginien moyen et inférieur, dont l'épaisseur peut atteindre 55-60 m, présente des faciès calcaires à intercalations marneuses : le marbre bâtard (ensemble de calcaires graveleux et oolithiques de 5 à 25 m d'épaisseur) assure une transition avec un complexe de marnes et calcaires épais de 10 à 12 m, surmontant des niveaux moins argileux de calcaires à rares intercalations marneuses sur 40 à 45 m. On peut noter que l'épaisseur du Valanginien augmente sensiblement d'ouest en est, en particulier pour la partie inférieure.

Le Berriasien inférieur (Purbeckien), qui marque le passage du Jurassique au Crétacé, est représenté par un niveau laguno-lacustre constituant un bon repère cartographique et un niveau de disharmonie. Des récurrences de calcaires saumâtres se trouvent dans les premiers niveaux oolithiques, et il se termine parfois par des marnes blanches et des calcaires à characées et cailloux noirs. Il comprend de plus des calcaires gris plus ou moins fétides à characées, des niveaux de brèches à cailloux noirs et des argiles de couleur généralement blanc-verdâtre.

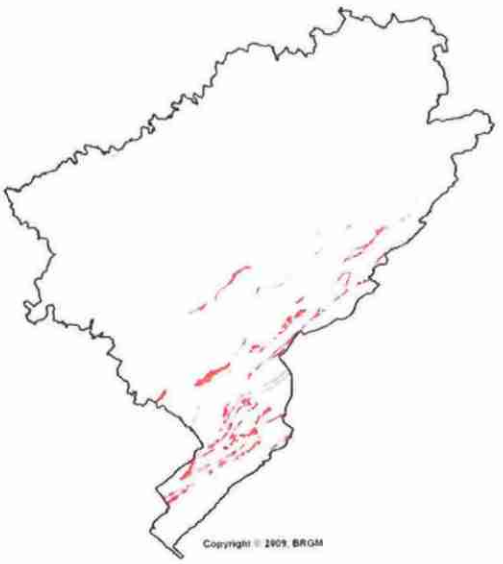


Illustration 23 : Répartition départementale des Marnes et calcaires du Crétacé inférieur (n1-3)

4.2.5. Formations du Jurassique

(13) – Marnes et calcaires à Exogyra virgula du Kimméridgien (j6b)

- Surface d'affleurement : 21,33 km² (Illustration 24)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,41 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 16ème

Affleurant localement au nord et au sud du département, le Kimméridgien supérieur regroupe trois ensembles qui sont de bas en haut : les *Calcaires et marnes à Ptérocères*, les *Calcaires à Corbis* et les *Marnes à Exogyra virgula*.

- *Calcaires et marnes à Ptérocères* (50 m) :
  - *Calcaire à Ptérocères* (40 m) : il s'agit un calcaire dur en bancs bien délimités, souvent très fendillés, de teinte et patine blanc-gris ; la pate est fine, souvent sublithographique. Ces niveaux sont peu fossilifères. Ils se poursuivent sur une trentaine de mètres et sont suivis par 6 ou 7 m de calcaires en bancs massifs, d'aspect grumeleux, plus grisâtres, qui ont livré des Ptérocères, de grosses Ceromya, de nombreuses sections de Trichites. Des niveaux gravelo-oolithiques et des calcarénites argileuses et gréseuses de teinte jaunâtre, plus ou moins riches en débris parfois recristallisés, peuvent s'intercaler et contenir de la glauconie. Ce minéral est, dans cette région, caractéristique du Kimméridgien : il fournit un bon repère pour les levés cartographiques.
  - *Marnes à Ptérocères* (8 à 10 m) : grises à jaunâtres, très fossilifères (Ptérocères, Ceromya, Zeilleria...), parfois gréseuses avec de petites intercalations de nature diverse : bancs noduleux, jaunâtres, limoniteux à débris, calcaires jaunâtres finement grenus, gréseux et glauconieux, calcaires gravelo-oolithiques blanchâtres ponctués de glauconie.
- *Calcaires à Corbis* (5 à 10 m ?) : ils affleurent peu ou très mal. Ce sont des calcaires blancs, gravelo-oolithiques, des calcaires finement spathiques et grenus à zones recristallisées, des calcaires fins, sublithographiques, blanc-jaune à empreintes de Corbis soulignées d'un dépôt limoniteux, et perforés de tubulures ramifiées à remplissage ocre-brun.
- Marnes à *Exogyra virgula*. Leur épaisseur est sans doute supérieure à 30 m mais reste souvent impossible à préciser. Ces marnes à nombreuses Huîtres de petite taille dont Exogyra Virgula terminent souvent la série jurassique et ont été fortement érodées.

Les faciès les plus calcaires n'ont pas été conservés lorsqu'ils étaient bien différenciés.

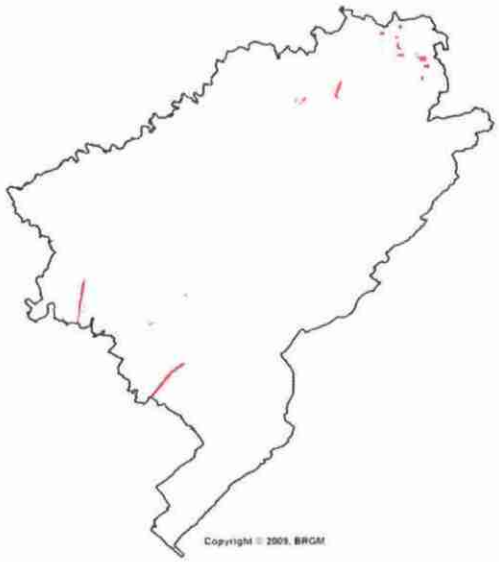


Illustration 24 : Répartition départementale des Marnes et calcaires à Exogyra virgula du Kimméridgien (j6b)

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

- Surface d'affleurement : 213,86 km² (Illustration 25)
- Pourcentage de la surface départementale : 4,07 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 5ème

Affleurant largement au nord et dans le centre du département, cet ensemble carbonaté correspond essentiellement au Séquanien (Oxfordien terminal à Kimméridgien inférieur) et est typiquement épais de 50 à 80 m.

Le faciès « séquanien » est relativement puissant (70 à 100 m) et 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 grain très fins et leur teinte très caractéristique : beige clair (café au lait), à taches nuageuses brunes couleur tabac.

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 [momies] ou oolithiques), des marnes grises, dures et gréseuses, feuilletées en profondeur, parfois terreuses ou

sableuses, renfermant des lits ou feuillets 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. Les marnes du sommet peuvent parfois être remplacées par des calcaires lithographiques et des calcaires compacts en gros bancs.

- 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.

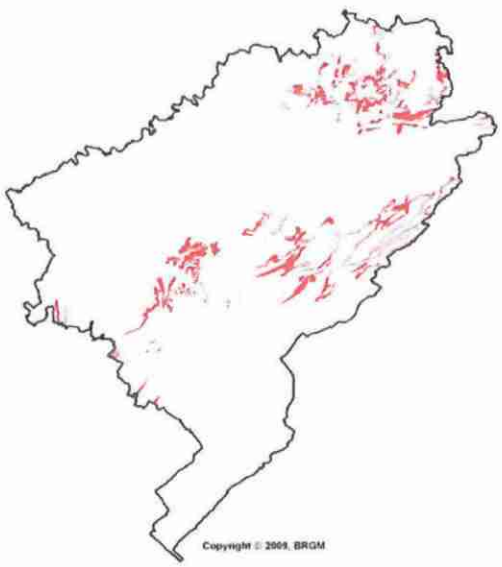


Illustration 25 : Répartition départementale des Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien (j5-6)

(15) – Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien (j4-5)

- Surface d'affleurement : 470,51 km² (Illustration 26)
- Pourcentage de la surface départementale : 8,97 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 1ère

Affleurant très largement dans le 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 165 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. Ces calcaires se cassent assez fréquemment au niveau de traces ferrugineuses ocre jaune fréquemment associées à des moulages de lamellibranches. 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 bleus 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.

Plus localement, surtout au sud du département, divers autres faciès carbonatés plus ou moins marneux peuvent être rencontrés (couches à sphérites, marnes bleues, calcaires à Polypiers...), ainsi que des niveaux marno-calcaires parfois oolithiques représentatifs du Callovien supérieur et de l'Oxfordien.

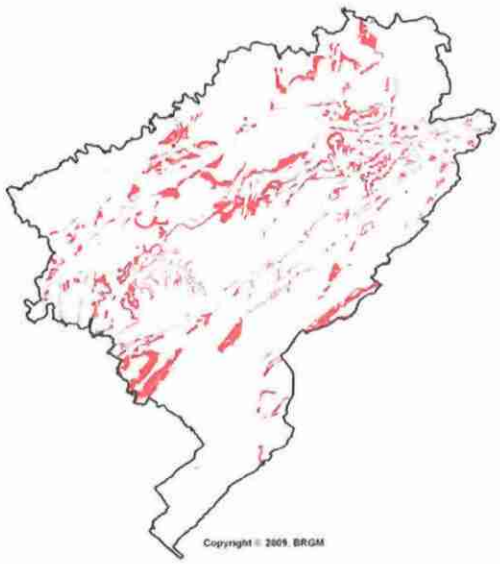


Illustration 26 : Répartition départementale des Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien (j4-5)

(16) – Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien (j5)

- Surface d'affleurement : 41,48 km² (Illustration 27)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,79 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 12ème

Affleurant assez peu, en minces lambeaux, dans la partie centre-ouest du département, cette formation présente un faciès classique de marnes gris-noir, riches en petites ammonites pyriteuses (*Creniceras renggeri*) et en bélemnites, surtout à leur base. Les affleurements de ces marnes sont assez rares, car elles sont soit laminées par la tectonique, soit recouvertes de dépôts d'altération ou d'alluvions tourbeuses. Morphologiquement, cependant, elles déterminent des combes nettement inscrites dans le paysage et elles sont responsables de vastes dépressions. Leur épaisseur peut atteindre une cinquantaine de mètres.

Les *Marnes à Creniceras renggeri* (ou *Marnes à Renggeri*) sont des marnes noires ou bleu-noirâtres, compactes, homogènes, se désagrégeant en surface, devenant subschisteuses, noduleuses, puis terreuses et passant au gris bleuâtre ou gris jaunâtre clair. Elles s'intercalent, dans le haut, de rares lits marno-calcaires tendres. Elles contiennent des grains de quartz corrodés, débris charbonneux, cristaux de gypse secondaire, rognons, grumeaux et fossiles pyriteux (sauf les bélemnites). Les lithofaciès et biofaciès sont très proches de ceux des marnes toarciennes. La partie supérieure se compose de marnes avec de rares lits marno-calcaires décimétriques. On rencontre ensuite le «banc bleu» (calcaire marneux à débit légèrement sphéritique), situé à 10 m environ sous le toit des *Marnes à Renggeri*. La partie inférieure se compose de marnes sans intercalation marno-calcaire.

Au sud du département, on peut rencontrer des marnes bleues reposant sur le sommet du Callovien par l'intermédiaire d'un niveau de marnes rouille à oolithes ferrugineuses. Il s'agit de 15 à 20 m de marnes bleues plastiques, pyriteuses à entroques et riches en microfaune.

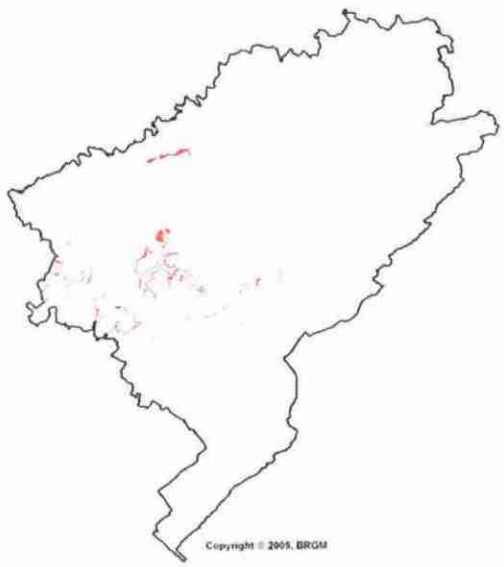


Illustration 27 : Répartition départementale des Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien (j5)

(17) – Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien (j4)

- Surface d'affleurement : 307,24 km² (Illustration 28)
- Pourcentage de la surface départementale : 5,85 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 3ème

Représentative du Callovien, et lithologiquement liée au Bathonien, cette formation affleure largement dans la partie centrale du département.

Parfois désigné sous le terme de Cornbash, il s'agit d'un ensemble essentiellement calcaire, de teinte grise, beige à brunâtre, où se succèdent et s'entremêlent des dalles biseautées, séparées par des surfaces taraudées, et présentant les faciès de calcaires oolithiques bioclastiques (oolithes blanches, roses ou jaunes et ciment sparitique), de calcaires à entroques, de calcaires gréseux roux, de calcaires marneux, de calcaires à débris calcaires bicolores, de calcaires graveleux et de calcaires lumachelliques en dalles couvertes de coquilles de brachiopodes ou de lamellibranches et de fragments d'échinodermes. On y observe, à quelques niveaux, le faciès classique de la « Dalle nacrée » (calcaire bicolore en plaquettes ou en dalles biseautées, riches en débris d'Échinodermes à cassure miroitante et nacrée, avec oolithes à cortex ferrugineux). À divers niveaux se voient des passées marno-calcaires ou marneuses. Au sommet localement, des marnes sableuses, bleuâtres, avec grès schisteux à empreintes

végétales, recouvrent les calcaires précédents et supportent un calcaire sableux, jaunâtre à taches bleuâtres. Ailleurs, le toit de la formation est une surface ravinée, bosselée, taraudée, encroûtée de brun noirâtre, installée sur des calcaires oolithiques à ciment hyalin.

Le Callovien inférieur est constitué par 8 à 10 m de calcaires oolithiques bioclastiques (exploités comme pierre de taille), terminés par une surface rubéfiée, taraudée. Un niveau lenticulaire de marnes à nodules de calcaires riches en bryozoaires et brachiopodes les sépare de 10 à 12 m de calcaires bioclastiques à bryozoaires, débris silicifiés et silex rubanés en amande ou bancs continus.

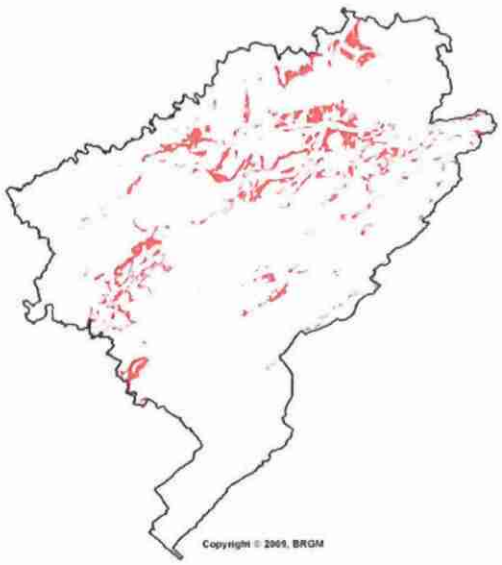


Illustration 28 : Répartition départementale des Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien (j4)

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

- Surface d'affleurement : 10,79 km² (Illustration 29)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,21 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 19ème

Affleurant modestement au nord du département, cet ensemble carbonaté s'étend du Bajocien supérieur au Bathonien supérieur.

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 tâches 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 de Lure, les *Marnes à rhynchonelles de Belfort*, représentées par une vingtaine de mètres de marnes et de calcaires argileux, parfois sableux, riches en lamellibranches et en 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*...

Illustration 29 : Répartition départementale du Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien (j2-3)

(19) – Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen (j1-2)

- Surface d'affleurement : 431,71 km² (Illustration 30)
- Pourcentage de la surface départementale : 8,23 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 2ème

Ce vaste ensemble calcaire, très présent dans la partie nord du département, regroupe divers faciès dont la stratigraphie s'étend de l'Aalénien au Bathonien.

Le Bathonien est principalement représenté par des calcaires oolithiques tendres et des marno-calcaires à la base et au sommet, et par des calcaires oolithiques durs dans la partie médiane.

- Le Bathonien supérieur comporte parfois un niveau supérieur de calcaire à chailles, noduleux, grumeleux et rognonneux. En dessous, des calcaires argileux en fines plaquettes constituent une très fine oolithe gris beige, tirant au brun jaunâtre par altération, se présentant à l'affleurement sous la forme de plaquettes millimétriques séparées par de minces lits marneux et constituant souvent de petites combes. Enfin, un calcaire massif gris-beige ou beige, à grain fin et oolithique, se présente en bancs plus ou moins compacts et épais, séparés par des bancs marneux de faible épaisseur pouvant localement devenir plus épais et se débitant alors en plaquettes grossières. L'épaisseur du Bathonien supérieur varie de la dizaine à la centaine de mètres.

- Le Bathonien moyen (épais de 5 et 20 m) est représenté par le niveau inférieur à chailles (calcaire marneux gris bleu, jaune par altération, noduleux, parfois schistoïde, parfois oolithique et à entroques, à chailles rognonneuses bien délimitées.

- Le Bathonien inférieur (épais de quelques mètres à 60 m) correspond à des marnes, des marno-calcaires et des calcaires marneux bicolores. Les niveaux marneux se trouvent plutôt vers la base de cette assise tandis que le sommet est plus nettement calcaire.

Le Bajocien est essentiellement représenté par des calcaires à polypiers, des calcaires spathiques, marnes et calcaires oolitiques. Les variations de faciès sont rapides dans le détail, mais dans l'ensemble, morphologiquement, il résiste bien à l'érosion et forme des falaises et des bordures du plateau. Son épaisseur est typiquement comprise entre 50 et 90 m. Les faciès sont le plus souvent calcaires, bien que des niveaux ou lits marneux ou argileux puissent être rencontrés (cas par exemple des calcaires à silex moyens de Messia, dont les bancs sont séparés de lits de marnes sableuses). Le Bajocien inférieur peut d'ailleurs devenir plus marneux et se confondre avec le sommet de l'Aalénien.

L'Aalénien, parfois indissociable du Bajocien inférieur et moyen, se présente également sous la forme de calcaires plus ou moins marneux :

- L'Aalénien inférieur est généralement représenté par des niveaux d'oolithe ferrugineuse. On peut y trouver des calcaires plus ou moins argileux, piqueté

d'oolithes ferrugineuses disséminées, ou des micrites à oolithes ferrugineuses (matrice micritique argilo-calcaire). Ils sont parfois masqués par des éboulis issus des falaises qui les surmontent.

- *L'Aalénien supérieur* est plutôt représenté par des *calcaires à silex* et des *calcaires* à entroques, épais de plusieurs dizaines de mètres. Ces faciès calcaires, parfois ferrugineux, sont plus ou moins argileux et gréseux, en bancs parfois mal définis pouvant être séparés par de minces interlits marneux ou des marnes sableuses.

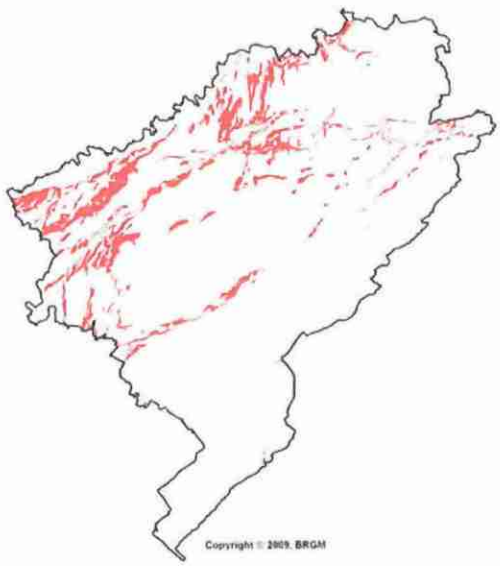


Illustration 30 : Répartition départementale des Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen (j1-2)

(20) – Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien (l4)

- Surface d'affleurement : 111,17 km² (Illustration 31)
- Pourcentage de la surface départementale : 2,12 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 7ème

Affleurant essentiellement au nord 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 de puissance 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 marnocalcaires, 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 (lamines millimétriques) formées d'une alternance de couches argileuses foncées riches en matière organique et de couches plus grossières silteuses, carbonatées. Ces « schistes carton » sont à l'origine de nombreux glissements de terrain et il est possible que certains sinistres déclarés à cette formation relèvent davantage de glissement de terrain que du phénomène de retrait-gonflement.

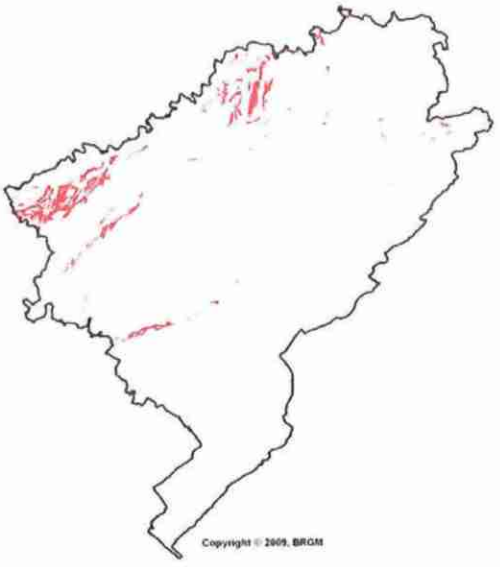


Illustration 31 : Répartition départementale des Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien (l4)

(21) – Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien (l1-3)

- Surface d'affleurement : 41,06 km² (Illustration 32)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,78 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 13ème

Affleurant au nord du département, cette formation rassemble les faciès du Pliensbachien, du Sinémurien et de l'Hettangien.

Le Pliensbachien est constitué d'un complexe marneux épais de 50 à 60 m. On y trouve une douzaine de mètres de calcaires marneux gris-noirâtre en nodules cloisonnés formant plusieurs bancs discontinus noyés dans les marnes à *Pleuroceras spinatum* et *Plicatula spinosa*, parfois légèrement sableuses (sur 8 à 10 m). On trouve aussi des marnes schistoïdes parfois à ovoïdes et des marnes feuilletées à *Amaltheus margaritatus* (sur 30 à 40 m). À la base, se trouve un niveau à concrétions ferrugineuses de couleur rouille et une zone d'altération renfermant *Amaltheus stockesi*. C'est à ce niveau que furent exploités autrefois des minerais de fer. Ces marnes à *Amaltheus margaritatus* du Domérien inférieur, bleues et jaunes à ovoïdes, sont nettement individualisées. Cette série marneuse, dont l'épaisseur atteint une quarantaine de mètres, débute par un niveau argileux et ferrugineux, épais de 0,20 à 0,30 m, renfermant de nombreuses bélemnites et des *Amaltheus stokesi*, puis viennent des marnes grises très plastiques renfermant des nodules calcaires. Parfois relativement détritiques, les faciès marneux apparaissent plus épais (40 à 45 m) mais leur base englobe alors sur 15 m de puissance tout le Carixien, franchement argileux. Le Carixien est constitué de marnes et d'argiles plastiques.

Le Lotharingien marneux (Sinémurien) correspond à environ 25 m de marnes grises à nodules calcaires et de marnes feuilletées pauvres en fossiles. La partie inférieure du Lotharingien comprend une vingtaine de mètres de marnes schistoïdes gris-bleu, à mica rare, pyriteuses par places, avec quelques nodules calcaires, déterminant dans le paysage des dépressions ou des talus convexes vers le haut, entre les replats du Sinémurien et du Carixien. Le Lotharingien supérieur correspond plutôt à des calcaires gris-bleu, séparés par des lits marneux sur 5 à 6 m d'épaisseur.

L'Hettangien débute par des calcaires gréseux (voire par des grès calcaires roussâtres) et ferrugineux épais de 1,50 à 2 m, riches en lamellibranches, et se termine par un mètre environ de calcaires bleus à Schlotheimia angulata, très riches en gros lamellibranches. L'épaisseur de l'étage peut atteindre 3 m.

Illustration 32 : Répartition départementale des Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien (I1-3)

4.2.6. Formations du Trias

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

- Surface d'affleurement : 8,85 km² (Illustration 33)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,17 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 21ème

Affleurant par petits lambeaux au nord 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*), dont l'épaisseur diminue du nord au sud, 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 33 : Répartition départementale des Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois (t7b)

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

- Surface d'affleurement : 20,35 km² (Illustration 34)
- Pourcentage de la surface départementale : 0,39 %
- Position parmi les 23 formations argileuses retenues : 17ème

Affleurant au nord 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 exploité. 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 bancs compacts admettent le polissage, et ils ont été exploités autrefois en de nombreuses carrières comme pierre à construction et pour la fabrication de la chaux hydraulique. 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'écailles 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.

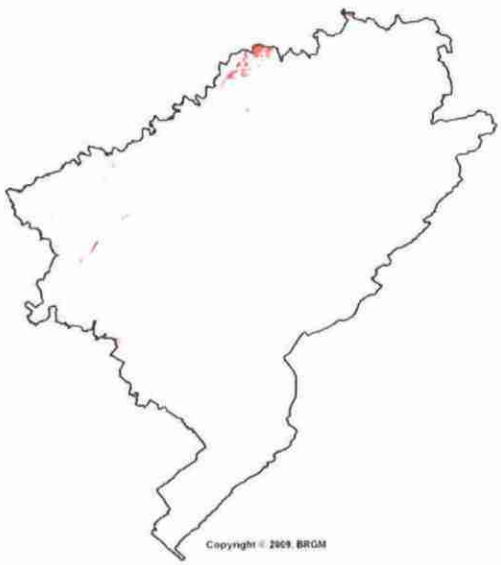


Illustration 34 : Répartition départementale des Marnes irisées et dolomies du Keuper (t5-6)

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 d'un certain nombre 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 23 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 23 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 35) :

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 35 : 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 36 permet de synthétiser les différentes notes lithologiques attribuées aux 23 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 sur les 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	2
2	FzL-T	Alluvions lacustres et tourbeuses	2
3	Fx-y	Alluvions anciennes	2
4	C	Colluvions diverses	3
5	OE	Recouvrement limoneux	2
6	FG	Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène	2
7	Gx-y	Moraines rissiennes ou würmiennes	1
8	R	Argiles résiduelles d'altération	3
9	p-IV SC	Sables et cailloutis plio-quaternaires (équival. de la Form. sup. de la Forêt de Chaux)	2
10	e7-g1	Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène	2
11	n5-6	Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien	2
12	n1-3	Marnes et calcaires du Crétacé inférieur	2
13	j6b	Marnes et calcaires à *Exogyra virgula* du Kimméridgien	1
14	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien	1
15	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien	2
16	j5	Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien	3
17	j4	Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien	1
18	j2-3	Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien	1
19	j1-2	Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen	1
20	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien	3
21	l1-3	Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien	3
22	t7b	Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois	2
23	t6-7	Marnes irisées et dolomies du Keuper	3

Total Formations argileuses	

Formations à priori non argileuses	
Zones aquatiques	

Total département sans zones aquatiques	

Illustration 36 : Notes lithologiques des 23 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 37).

% 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 37 : 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 Doubs proviennent :

- des notices des cartes géologiques à 1/50 000 ;
- d'études menées dans le cadre de la construction de la LGV, fournies par le Réseau Ferré de France (RFF) ;
- de bureaux d'études (Compétences Géotechniques, Fondasol, Hydrogéo) ;

- du Laboratoire des Ponts et Chaussées d'Autun.

Ces données ont été complétées par des analyses effectuées sur 18 échantillons recueillis par le BRGM dans le cadre de la présente étude (Annexe 3). Les prélèvements ont été réalisés jusqu'à 1,50 m de profondeur à la tarière à main. Les 18 échantillons, prélevés en deux exemplaires chacun, ont été analysés respectivement par le bureau d'études GEOTEC (Dijon) pour la détermination de la valeur au bleu de méthylène et par le laboratoire UMR 5561 de l'université de Bourgogne (Dijon) pour les analyses minéralogiques de la fraction argileuse par diffractométrie des rayons X. Quelques données recueillies dans des départements voisins lors de la réalisation des cartes d'aléa sont également mentionnées pour les formations d'extension régionale.

Concernant les formations superficielles, les données sont plus rares, notamment au point de vue minéralogique. 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 38), sachant que le nombre d'échantillons analysés n'est pas toujours clairement exprimé dans la bibliographie scientifique consultée. L'illustration 39 résume les notes minéralogiques attribuées.

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques dpt 25	Données minéralogiques autres départements
1	Fz	Alluvions récentes	2	***Analyse éch. 18 :*** illite (15 %), kaolinite (20 %), vermiculite (30 %), interstratifiés illite/smectite R1 (10 %), interstratifiés illite/smectite R0 (25 %).	***Jura :*** *Vannière et al. (2003) :* Sur la commune de Neublans, dans la vallée du Doubs, la minéralogie dominante est constituée d'illite, de chlorite, de kaolinite et de smectites + ou - interstratifiées ***Côte d'Or / Saône-et-Loire :*** *Feuille 553 :* - kaolinites (30 %), smectite (60 %), illite (10 %). - illite (50 %) et chlorite (50 %). ***Haute-Marne :*** ***Analyse :*** 45 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite).
2	FzL-T	Alluvions lacustres et tourbeuses	1		***Jura :*** *Magny et al. (2006) :* Illite et chlorite, s'enrichissant en kaolinite en profondeur; smectites rares.
3	Fx-y	Alluvions anciennes	2	***Analyse éch. 6 :*** illite (15 %), kaolinite (35 %), vermiculite (20 %), interstratifiés illite/smectite R1 (30 %).	***Côte d'Or :*** *Feuille 500 :* illite (15 %) et montmorillonite (25 %). ***Haute-Marne :*** ***Analyse :*** 55 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite). ***Saône-et-Loire :*** *Feuilles 527, 553, 554, 579 :* kaolinite (50 à 30 %), smectite (30 à 40 %) et illite (20 à 30 %). *Feuille 553 :* illite (50 %) et chlorite (50 %). *Feuille 580 :* montmorillonite (>50 %) puis l'illite et la kaolinite en proportions voisines.

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques dpt 25	Données minéralogiques autres départements
4	C	Colluvions diverses	2	***Analyse éch. 16 :*** illite (45 %), kaolinite (20 %), vermiculite (10 %), interstratifiés illite/smectite R1 (25 %).	***Jura :*** *Vannière et al. (2003) :* Sur la commune de Neublans, près de la vallée du Doubs, présence d'illite, de chlorite et de kaolinite. ***Saône-et-Loire :*** *Feuille 601 :* Concernant les matériaux issus de l'altération et du remaniement des calcaires et marnes du Jurassique : kaolinite (50 %) et interstratifiés du type illite-montmorillonite (50 %) sur 3 échantillons. Concernant les colluvions issues de ces mêmes matériaux : kaolinite (50 %), illite (50 %). *Feuille 649 :* Concernant les colluvions recouvrant les altérites de socle : Analyse : kaolinite (100 %). Analyse : illite (20 %), kaolinite (30 %), vermiculite (30 %), interstratifiés vermiculite-chlorite (20 %). Analyse : illite (50 %), kaolinite (20 %), vermiculite (30 %). Analyse : illite (40 %), kaolinite (30 %), vermiculite (30 %). Analyse : illite (10 %), kaolinite (20 %), montmorillonite (70 %). Essentiellement de l'illite (sur substrat granitique ou tufs rhyolitiques), kaolinite en quantité modeste (sauf sur substrat de siltite où elle peut en constituer la totalité), montmorillonite (liée préférentiellement aux roches amphiboliques), vermiculite rare et localement interstratifiés chlorite-vermiculite (sur tufs rhyolitiques et sur microgranites).

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques dpt 25	Données minéralogiques autres départements
5	OE	Recouvrement limoneux	3	***Analyse éch. 8 :*** illite (15 %), kaolinite (30 %), vermiculite (40 %), interstratifiés illite/smectite R1 (15 %).	***Jura :*** *Leneuf et Lamouroux (1974) :* kaolinite (fortes proportions) et interstratifiés illite-vermiculite irréguliers (faible importance). ***Côte d'Or :*** *Feuille 404 :* montmorillonite (60 %), illite (20 %) et kaolinite (20 %). *Feuille 500 :* vermiculite et interstratifiés 10-14 Å. *Feuille 525 :* minéraux argileux riches en vermiculite et smectites et pauvres en illite. ***Haute-Marne :*** ***Analyse :*** 35 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite).
6	FG	Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène	3		***Haute-Saône :*** ***Analyse BRGM :*** chlorite + vermiculite (63 %), illite et/ou micas (18 %), kaolinite (19 %).
7	Gx-y	Moraines rissiennes ou würmiennes	3	***Analyse éch. 10 :*** illite (25 %), kaolinite (15 %), interstratifiés illite/smectite R0 (60 %).	***Haute-Saône :*** ***Analyse BRGM :*** chlorite + vermiculite (63 %), illite et/ou micas (18 %), kaolinite (19 %).
8	R	Argiles résiduelles d'altération	2	***Analyse éch. 2 :*** illite (30 %), kaolinite (30 %), vermiculite (15 %), interstratifiés illite/smectite R1 (25 %). ***Analyse éch. 3 :*** illite (15 %), kaolinite (25 %), vermiculite (20 %), interstratifiés illite/smectite R1 (40 %). ***Analyse éch. 4 :*** illite (20 %), kaolinite (35 %), interstratifiés illite/smectite R1 (35 %), interstratifiés illite/smectite R0 (10 %). ***Analyse éch. 7 :*** chlorite (5 %), illite (15 %), kaolinite (30 %), vermiculite (40 %), interstratifiés illite/smectite R1 (15 %).	***Haute-Saône :*** ***Analyse BRGM :*** vermiculite + interstratifié smectite/illite (8 %), illite et/ou micas (40 %), kaolinite (52 %).

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques dpt 25	Données minéralogiques autres départements
9	p-IV SC	Sables et cailloutis plio-quaternaires (équivalent de la Formation supérieure de la Forêt de Chaux)	3		***Jura :*** *Feuille 554 :* - Pour les sables et silts quartzeux parfois carbonatés : montmorillonite dominante, kaolinite et illite en quantités égales, et quelquefois chlorite ou interstratifiés illite/montmorillonite. - Pour les argiles et argiles sableuses : La montmorillonite précède, dans l'ordre d'abondance, l'illite, elle-même un peu plus fréquente que la kaolinite. *Feuille 555 :* - p2-IVA, p2-IVS, p2S, p2SC, p2M : Montmorillonite (50 %), illite (25 %), kaolinite (25 %). *Feuille 580 :* - p-IV : Les minéraux argileux sont essentiellement la montmorillonite (fréquemment plus de la moitié), l'illite et la kaolinite. On rencontre un peu de chlorite et quelques interstratifiés. La vermiculite est rare. *Feuille 603 :* kaolinite (40 %) et de montmorillonite (60 %). *Vannière et al. (2003) :* Présence d'illite, de chlorite, de kaolinite et de smectites + ou - interstratifiées. ***Analyse BRGM :*** Interstratifiés smectite/illite + vermiculite (~49 %), kaolinite (~30 %), illite et/ou micas (~21 %). ***Côte d'Or et Saône-et-Loire :*** *Feuille 526 :* kaolinite et montmorillonite dominantes, illite subordonnée (sur 8 échantillons). *Feuille 553 :* fraction argileuse des échantillons non calcaire : kaolinite (30 %), smectite (50 %), illite (20 %). fraction argileuse des échantillons carbonatés : kaolinite (10 %), smectite (70 %), illite (20 %).

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques dpt 25	Données minéralogiques autres départements
10	e7-g1	Marnes et calcaires lacustres de l'Éocène supérieur et de l'Oligocène	3	***Analyse éch. 13 :*** illite (25 %), kaolinite (15 %), vermiculite (30 %), interstratifiés illite/smectite R1 (15 %), interstratifiés illite/smectite R0 (15 %).	***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 %). ***Côte d'Or :*** *Feuille 553 :* kaolinite (20 %), illite (40 %) et interstratifiés illite-smectite (40 %). ***Saône-et-Loire :*** *Feuille 553 :* kaolinite (20 %), illite (40 %) et interstratifiés illite-smectite (40 %). *Feuille 599 :* illite et montmorillonite, éventuelle kaolinite à la base.
11	n5-6	Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien	2		***Haute-Saône :*** ***Analyse BRGM :*** interstratifié smectite/chlorite (46 %), illite et/ou micas (14 %), kaolinite (40 %).
12	n1-3	Marnes et calcaires du Crétacé inférieur	3	***Analyse éch. 11 :*** chlorite (5 %), illite (25 %), kaolinite (10 %), vermiculite (20 %), interstratifiés illite/smectite R0 (40 %). ***Analyse éch. 12 :*** illite (15 %), kaolinite (15 %), vermiculite (10 %), interstratifiés illite/smectite R0 (60 %).	***Jura :*** *Deconinck (1988) :* illites au sud, interstratifiés illite/smectites riches en illite plus au nord. ***Haute-Saône :*** ***Analyse BRGM :*** Cénomanien : interstratifié smectite/chlorite (71 %), illite et/ou micas (6 %), kaolinite (23 %).
13	J6b	Marnes et calcaires à *Exogyra virgula* du Kimméridgien	1		***Haute-Saône :*** *Feuille 470 :* *- Concernant les lits argileux des Calcaires de Spoy, fins compacts ou à tubulures :* kaolinite et illite. ***Analyse BRGM :*** interstratifié smectite/chlorite (25 %), illite et/ou micas (5 %), kaolinite (70 %).

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques dpt 25	Données minéralogiques autres départements
14	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien	1		***Jura*** Mouchet (1995) : analyse de deux échantillons : proportions similaires de mica/illite et de kaolinite, peu d'interstratifiés. ***Haute-Saône :*** *Feuille 439 :* *- Concernant les niveaux marneux des Faciès calcaires dits «séquaniens» :* illite et kaolinite. *- Concernant les niveaux marneux des Calcaires jaunâtres dolomitiques ou glauconieux :* kaolinite, illite, interstratifiés. *- Concernant les niveaux marneux des Calcaires et marnes à Exogyra Virgula :* kaolinite, illite, interstratifiés. *Feuille 470 :* *- Concernant les joints calcaréo-argileux des Calcaires compacts piquetés de la Charmette, dans les Faciès calcaires dits «séquaniens» :* kaolinite et illite. *- Concernant les argiles des Calcaires de Beaumont-sur-Vingeanne, rognonneux, dolomitiques ou glauconieux :* illite et kaolinite. *- Concernant les niveaux marneux ou calcaréo-argileux des marnes et calcaires lumachelliques du Kimméridgien supérieur :* illite et kaolinite. ***Haute-Marne :*** ***Analyse :*** *49 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite).* ***Saône-et-Loire :*** *Feuille 553 :* illite, kaolinite, interstratifiés, goethite. *Feuille 579 :* illite, kaolinite, interstratifiés.

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques dpt 25	Données minéralogiques autres départements
15	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien	2		***Jura :*** *Pellenard et Deconinck (2006) :* - Oxfordien moyen (Crotenay) : au sommet : interstratifiés irréguliers illite/smectites (~80 %), illlite (~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 %). ***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. *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. ***Côte d'Or :*** *Feuille 469 :* illite (40 à 70 %), smectites (0 à 40 %), interstratifiés (0 à 60 %). ***Haute-Marne :*** ***Analyse :*** 33 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite).

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques dpt 25	Données minéralogiques autres départements
16	j5	Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien	2		***Jura :*** *Pellenard et Deconinck (2006) :* - Oxfordien inférieur (Crotenay) : Illite (~45 %), interstratifiés réguliers illite/smectites (~30 %), kaolinite (~15 %) et chlorite (~10 %).
17	j4	Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien	2		***Vosges :*** ***Analyse :*** illite (40 %), kaolinite (30 %), smectites+interstratifiés (25 %), illite (5 %). ***Analyse :*** smectites+interstratifiés (44 %), kaolinite (35 %), illite (17 %), illite (4 %).
18	j2-3	Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien	1		***Côte d'Or :*** *Feuille 406 :* illite, kaolinite et interstratifiés. *Feuille 438 :* illite et kaolinite. *Feuille 469 :* illite et kaolinite. ***Haute-Marne :*** *Analyse :* 18 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite).
19	j1-2	Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen	2	***Analyse éch. 5 :*** illite (20 %), kaolinite (20 %), vermiculite (20 %), interstratifiés illite/smectite R1 (30 %), interstratifiés illite/smectite R0 (10 %)	***Côte d'Or :*** *feuille 406 :* illite, kaolinite et interstratifiés. *feuille 438 :* illite et kaolinite dans la phase argileuse. *feuille 469 :* illite et kaolinite essentiellement.

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques dpt 25	Données minéralogiques autres départements
20	I4	Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien	2	***Analyse éch. 1 :*** illite (35 %), kaolinite (25 %), vermiculite (5 %), interstratifiés illite/smectite R1 (20 %), interstratifiés illite/smectite R0 (15 %). ***Analyse éch. 9 :*** illite (35 %), kaolinite (35 %), vermiculite (15 %), interstratifiés illite/smectite R1 (15 %). ***Analyse éch. 17 :*** illite (25 %), kaolinite (35 %), vermiculite (15 %), interstratifiés illite/smectite R1 (25 %).	***Jura :*** *Feuille 555 :* - I7-8 : Illite (40 %), kaolinite (35 %), montmorillonite (traces). *Broquet (2004) :* Phase argileuse composée d'illite dominante, avec kaolinite et smectites en faible proportions. ***Côte d'Or :*** *Feuille 469 :* kaolinite et illite nettement dominantes, quartz, muscovite, chlorite et plus rarement biotite. ***Haute-Marne / Vosges :*** ***Analyses :*** 20 à 25 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite), sur 2 analyses. ***Meurthe-et-Moselle :*** ***Analyses 2001 :*** interstratifiés smectites-illite (15 %), illite (20 %), kaolinite (55 %), vermiculite (10 %). ***Analyses 1977 :*** smectites (20 à 41 %), interstratifiés smectites/illite (15 %), kaolinite (40 %), chlorite (19 à 29 %). ***Analyses CETE :*** interstratifiés smectites-illite (16 à 18 %), illite (19 à 21 %), kaolinite (60 à 63 %). ***Saône-et-Loire :*** *Feuille 600 :* kaolinite.

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques dpt 25	Données minéralogiques autres départements
21	I1-3	Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien	2	***Analyse éch. 14 :*** illite (50 %), kaolinite (10 %), vermiculite (20 %), interstratifiés illite/smectite R1 (20 %).	***Jura :*** *Feuille 555 :* - I5-6 : illite (35 %), kaolinite (32 %), montmorillonite (traces). ***Haute-Saône :*** ***Analyse RFF :*** *- 1 analyse dans les marnes et argiles grises du Lotharingien :* · quartz (85 %), anorthoclase (feldspath, 3 %), montmorillonite (6 %), illite (3 %), clinochlore (chlorite, 3 %). ***Analyse BRGM :*** interstratifié smectite/chlorite + interstratifié illite/smectite (19 %), illite et/ou micas (52 %), kaolinite (29 %). ***Haute-Marne / Vosges :*** ***Analyses :*** 5 à 30 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite), sur 2 analyses. ***Haute-Marne :*** ***Analyse :*** 20 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite).
22	t7b	Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois	1		***Haute-Saône :*** ***Analyse BRGM) :*** vermiculite (14 %), illite et/ou micas (14 %), kaolinite + chlorite (72 %). ***Haute-Marne :*** ***Analyse :*** 20 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite).
23	t6-7	Marnes irisées et dolomies du Keuper	2	***Analyse éch. 15 :*** chlorite (5 %), illite (60 %), vermiculite (20 %), interstratifiés illite/smectite R1 (15 %).	***Haute-Saône :*** ***Analyses RFF :*** ***- 2 analyses dans les marnes bariolées du Keuper :*** · fraction argileuse (59 %) composée de corrensite (interstratifiés réguliers chlorite vermiculite ou smectite, 66 %), d'illite (28 %) et de chlorite (6 %). · fraction argileuse (80 %) composée de corrensite (interstratifiés réguliers chlorite vermiculite ou smectite, 64 %), d'illite (29 %) et de chlorite (7 %).

N°	Notation	Nom	Note minéralogique	Données minéralogiques dpt 25	Données minéralogiques autres départements
					- 11 analyses dans les marnes irisées inférieures du Keuper : · fraction argileuse (59 %) composée de corrensite (75 %), d'illite (20 %) et de chlorite (5 %). · fraction argileuse (65 %) composée de corrensite (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 corrensite (72 %), d'illite (24 %), de chlorite (4 %). · 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 %). ***Analyse BRGM :*** interstratifié chlorite/smectite (68 %), illite et/ou micas (19 %), kaolinite (13 %). ***Haute-Marne :*** ***Analyse :*** 20 % de minéraux gonflants (smectites, vermiculite, interstratifiés smectite-illite ou vermiculite-illite). ***Saône-et-Loire :*** ***Expertise :*** illite et vermiculite dominantes. *Feuille 601 :* illite prédominante et kaolinite pour la base. interstratifiés en plus dans les niveaux gypsifères (chlorite gonflante). smectite-illite avec peu de kaolinite pour le sommet.

Illustration 38 : Données et notes minéralogiques des 23 formations argileuses retenues

Code	Notation	Formation	Note minéralogique 25
1	Fz	Alluvions récentes	2
2	FzL-T	Alluvions lacustres et tourbeuses	1
3	Fx-y	Alluvions anciennes	2
4	C	Colluvions diverses	2
5	OE	Recouvrement limoneux	3
6	FG	Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène	3
7	Gx-y	Moraines rissiennes ou würmiennes	3
8	R	Argiles résiduelles d'altération	2
9	p-IV SC	Sables et cailloutis plio-quaternaires (équival. de la Form. sup. de la Forêt de Chaux)	3
10	e7-g1	Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène	3
11	n5-6	Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien	2
12	n1-3	Marnes et calcaires du Crétacé inférieur	3
13	j6b	Marnes et calcaires à *Exogyra virgula* du Kimméridgien	1
14	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien	1
15	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien	2
16	j5	Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien	2
17	j4	Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien	2
18	j2-3	Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien	1
19	j1-2	Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen	2
20	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien	2
21	l1-3	Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien	2
22	t7b	Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois	1
23	t6-7	Marnes irisées et dolomies du Keuper	2

Total Formations argileuses	
Formations à priori non argileuses	
Zones aquatiques	
Total département sans zones aquatiques	

Illustration 39 : Notes minéralogiques des 23 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 40) :

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

Illustration 40 : Barême 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 41) :

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 41 : Barême 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 (Rl)

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 42) :

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

Illustration 42 : Barême 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 43) :

Coefficient de gonflement	Susceptibilité	Note
Cg < 0,025	faible	1
0,025 ≤ Cg < 0,035	moyenne	2
0,035 ≤ Cg < 0,055	forte	3
Cg ≥ 0,055	très forte	4

Illustration 43 : Barême 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 Doubs.

5.4.7. Caractérisation géotechnique

Les données présentées proviennent :

- de différents bureaux d'études qui nous ont aimablement permis de consulter leurs archives (B3G2, DSC-Rincent-BTP, Fondasol Montbéliard, GEOTEC, HYDROGEO, ICSEO, SOLETCO, Soletco et Compétences Géotechniques) ;
- du Laboratoire régional d'Autun (CETE de Lyon) ;
- de tableaux de synthèse par formation géologique issus des études menées pour la construction de la LGV, fournies par Réseau Ferré de France (RFF).

Nous remercions donc ces organismes pour leur précieuse collaboration.

Toutes les valeurs géotechniques recueillies pour les formations argileuses retenues ont été synthétisées dans le tableau de l'illustration 44.

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

- Indice de plasticité :

  403 données ont été obtenues (dont 359 ont pu être attribuées à des formations identifiées comme argileuses). Ces données ont été complétées par 1344 valeurs d'indice de plasticité recueillies dans les départements limitrophes dans le cadre d'études similaires (Haute-Saône et Jura).

- Valeur de bleu :

  63 données ont pu être collectées, dont 31 attribuées à des formations identifiées comme argileuses. Celles-ci ont été complétées par 18 analyses réalisées sur des échantillons prélevés dans le cadre de cette étude, ainsi que par 1002 valeurs de bleu recueillies dans les départements limitrophes dans le cadre d'études similaires (Haute-Saône et Jura).

En définitive, les données dont nous avons pu disposer permettent de caractériser la totalité des formations identifiées comme argileuses dans le département.

Illustration 44 : Synthèse des données géotechniques recueillies et notes géotechniques

				Données recueillies dans le Doubs								Données recueillies dans les départements voisins (39, 70)			
				Vb (g/100g)				Ip				Vb (g/100g)		Ip	
Code	Notation	Formation	Note géotechnique	Nb. Éch.	Min	Moy	Max	Nb. Éch.	Min	Moy	Max	Nb. Éch.	Moy	Nb. Éch.	Moy
1	Fz	Alluvions récentes	2	2	1.90	2.59	3.28	81	3.00	17.38	43.00	226	2.74	208	27.06
2	FzL-T	Alluvions lacustres et tourbeuses	1	1	2.10	2.10	2.10	1	17.10	17.10	17.10	1	0.51	6	13.62
3	Fx-y	Alluvions anciennes	2	1	6.02	6.02	6.02	10	8.00	17.70	26.00	94	3.29	43	22.21
4	C	Colluvions diverses	2	1	5.06	5.06	5.06	1	15.00	15.00	15.00	84	3.02	120	27.71
5	OE	Recouvrement limoneux	2	1	4.76	4.76	4.76	0				2	4.70	11	22.81
6	FG	Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène	2	0				2	38.00	44.50	51.00	4	2.01	1	63.30
7	Gx-y	Moraines rissiennes ou würmiennes	1	7	1.95	2.45	3.10	13	5.00	13.19	28.00	0		23	16.02
8	R	Argiles résiduelles d'altération	2	4	4.12	6.30	8.92	98	5.00	23.42	56.00	188	2.71	262	23.37
9	p-IV SC	Sables et cailloutis plio-quat. (équiv. de la Form. sup. de la Forêt de Chaux)	2	0				0				8	4.02	21	24.81
10	e7-g1	Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène	2	1	3.14	3.14	3.14	40	9.30	17.30	25.00	4	5.18	0	
11	n5-6	Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien	2	0				0				7	4.39	0	
12	n1-3	Marnes et calcaires du Crétacé inférieur	2	5	0.80	3.76	7.72	6	11.40	20.33	39.00	23	1.58	21	30.55
13	j6b	Marnes et calcaires à *Exogyra virgula* du Kimméridgien	3	0				3	11.00	17.33	26.00	0		7	33.43
14	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien	2	0				5	17.00	20.80	26.00	1	1.06	21	24.10
15	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien	2	4	2.00	4.63	6.50	18	7.00	19.92	30.00	53	3.64	100	23.52
16	j5	Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien	2	0				0				5	3.95	2	29.15
17	*j4*	*Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien*	2	*1*	*1.30*	*1.30*	*1.30*	*21*	*8.00*	*20.05*	*29.00*	*0*		*1*	*21.60*
18	j2-3	Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien	1	0				0				0		5	17.00
19	j1-2	Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen	3	12	0.60	3.42	4.80	39	10.00	25.57	52.00	4	6.06	11	29.23
20	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien	2	6	0.90	2.78	5.06	16	14.00	25.13	44.00	22	3.67	35	21.52
21	l1-3	Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien	2	1	4.77	4.77	4.77	0				11	2.75	47	26.69
22	t7b	Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois	2	1	0.90	0.90	0.90	0				62	3.51	79	24.76
23	t6-7	Marnes irisées et dolomies du Keuper	2	1	3.56	3.56	3.56	5	19.00	27.00	29.00	203	4.06	320	22.59

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 45) :

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

Illustration 45 : Barême d'attribution d'un niveau de susceptibilité d'une formation argileuse

Moyennant ce traitement, les notes de susceptibilité attribuées aux 23 formations retenues comme argileuses sont les suivantes (Illustration 46) :

Code	Notation	Formation	Note lithologique	Note minéralogique	Note géotechnique	Indice de suceptibilité	Niveau suceptibilité	Surface (km²)	% Surface départ.
1	Fz	Alluvions récentes	2	2	2	2,00	Faible	246,26	4,69
2	FzL-T	Alluvions lacustres et tourbeuses	2	1	1	1,33	Faible	38,54	0,73
3	Fx-y	Alluvions anciennes	2	2	2	2,00	Faible	48,88	0,93
4	C	Colluvions diverses	3	2	2	2,33	Moyen	34,03	0,65
5	OE	Recouvrement limoneux	2	3	2	2,33	Moyen	15,87	0,30
6	FG	Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène	2	3	2	2,33	Moyen	10,32	0,20
7	Gx-y	Moraines rissiennes ou würmiennes	1	3	1	1,67	Faible	148,95	2,84
8	R	Argiles résiduelles d'altération	3	2	2	2,33	Moyen	74,62	1,42
9	p-IV SC	Sables et cailloutis plio-quat. (équiv. de la Form. sup. de la Forêt de Chaux)	2	3	2	2,33	Moyen	56,94	1,08
10	e7-g1	Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène	2	3	2	2,33	Moyen	7,22	0,14
11	n5-6	Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien	2	2	2	2,00	Faible	1,29	0,02
12	n1-3	Marnes et calcaires du Crétacé inférieur	2	3	2	2,33	Moyen	94,59	1,80
13	j6b	Marnes et calcaires à *Exogyra virgula* du Kimméridgien	1	1	3	1,67	Faible	21,33	0,41
14	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien	1	1	2	1,33	Faible	213,86	4,07
15	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien	2	2	2	2,00	Faible	470,51	8,97
16	j5	Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien	3	2	2	2,33	Moyen	41,48	0,79
17	j4	Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien	1	2	2	1,67	Faible	307,24	5,85
18	j2-3	Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien	1	1	1	1,00	Faible	10,79	0,21
19	j1-2	Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen	1	2	3	2,00	Faible	431,71	8,23
20	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien	3	2	2	2,33	Moyen	111,17	2,12
21	l1-3	Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien	3	2	2	2,33	Moyen	41,06	0,78
22	t7b	Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois	2	1	2	1,67	Faible	8,85	0,17
23	t6-7	Marnes irisées et dolomies du Keuper	3	2	2	2,33	Moyen	20,35	0,39
		Total Formations argileuses						2 455,86	46,79
		Formations à priori non argileuses						2 792,39	53,21
		Zones aquatiques						7,11	0,14
		Total département						5 248,25	100,00

Illustration 46 : Susceptibilité des 23 formations argileuses retenues

6.2. SYNTHÈSE

Aucune formation argileuse n'apparaît comme fortement susceptible dans le département du Doubs, alors que 11 formations sont jugées moyennement susceptibles, et 12 faiblement susceptibles. Au final, 9,67 % du département sont classés en susceptibilité moyenne au phénomène de retrait-gonflement, et 37,12 % en susceptibilité faible. 53,21 % de la surface départementale sont donc considérés comme *à priori* non argileux, et donc non susceptibles (Illustration 47).

Code	Notation	Formation	Surface (km²)	% Surface départ.	Niveau de suceptibilité
4	C	Colluvions diverses	34.03	0.65	Moyen
5	OE	Recouvrement limoneux	15.87	0.30	Moyen
6	FG	Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène	10.32	0.20	Moyen
8	R	Argiles résiduelles d'altération	74.62	1.42	Moyen
9	p-IV SC	Sables et cailloutis plio-quat. (équiv. de la Form. sup. de la Forêt de Chaux)	56.94	1.08	Moyen
10	e7-g1	Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène	7.22	0.14	Moyen
12	n1-3	Marnes et calcaires du Crétacé inférieur	94.59	1.80	Moyen
16	j5	Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien	41.48	0.79	Moyen
20	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien	111.17	2.12	Moyen
21	l1-3	Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien	41.06	0.78	Moyen
23	t6-7	Marnes irisées et dolomies du Keuper	20.35	0.39	Moyen
		Total des formations de susceptibilité moyenne	**507.65**	**9.67**	
1	Fz	Alluvions récentes	246.26	4.69	Faible
2	FzL-T	Alluvions lacustres et tourbeuses	38.54	0.73	Faible
3	Fx-y	Alluvions anciennes	48.88	0.93	Faible
7	Gx-y	Moraines rissiennes ou würmiennes	148.95	2.84	Faible
11	n5-6	Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien	1.29	0.02	Faible
13	j6b	Marnes et calcaires à *Exogyra virgula* du Kimméridgien	21.33	0.41	Faible
14	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien	213.86	4.07	Faible
15	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien	470.51	8.97	Faible
17	j4	Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien	307.24	5.85	Faible
18	j2-3	Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien	10.79	0.21	Faible
19	j1-2	Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen	431.71	8.23	Faible
22	t7b	Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois	8.85	0.17	Faible
		Total des formations de susceptibilité faible	**1 948.21**	**37.12**	
		Total Formations argileuses	**2 455.86**	**46.79**	
		Formations à priori non argileuses	**2 792.39**	**53.21**	
		Zones aquatiques	7.11	0.14	
		Total département sans zones aquatiques	**5 248.25**	**100.00**	

Illustration 47 : Superficie des formations par niveau de susceptibilité

6.3. CARTE DE SUSCEPTIBILITÉ

L'illustration 48 représente la carte départementale de susceptibilité au phénomène de retrait-gonflement, réalisée d'après les résultats présentés dans le tableau de l'illustration 46. 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 *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.

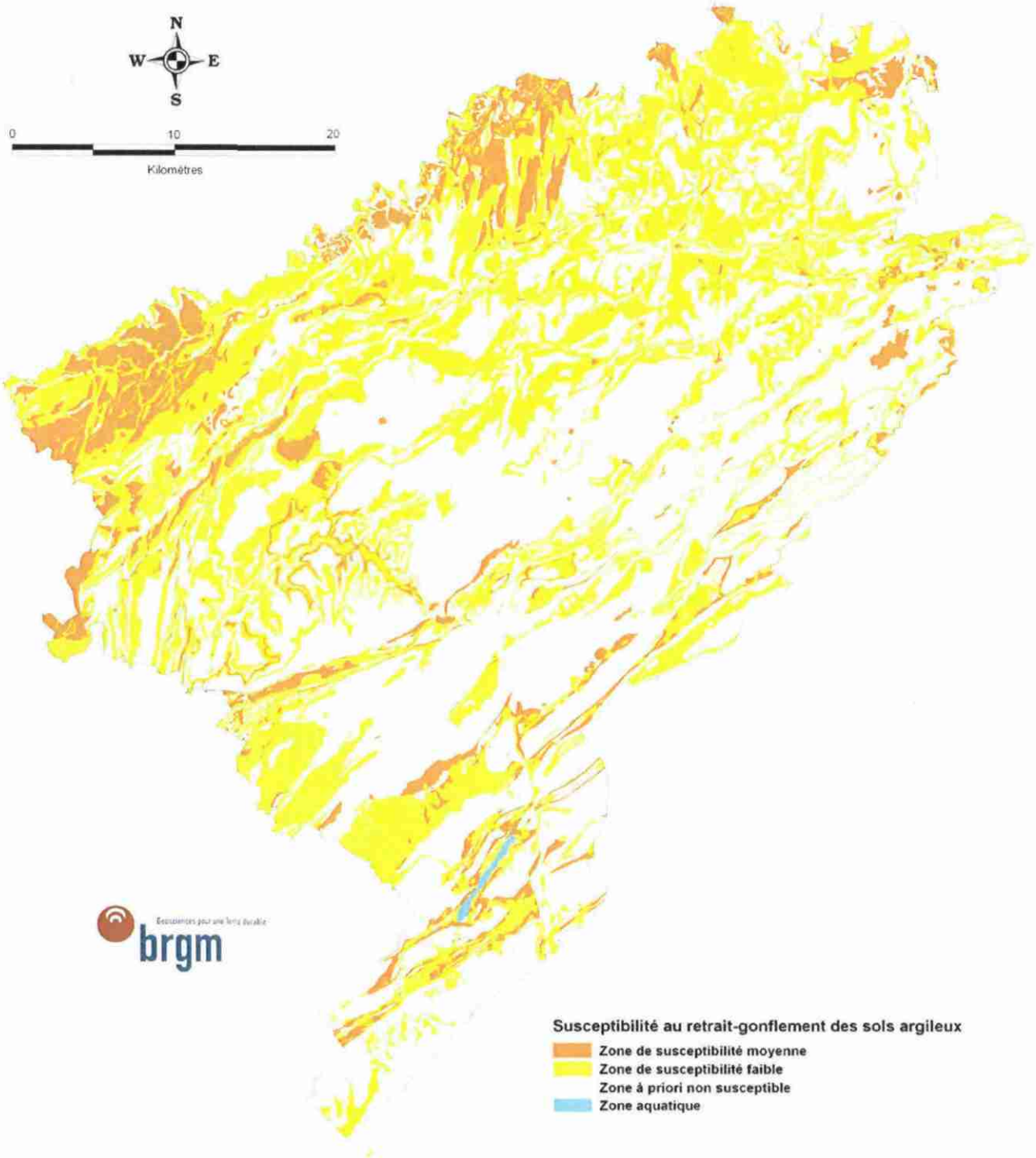


Illustration 48 : Carte de susceptibilité au retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Doubs

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 décadaire. 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 décade 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 1er septembre 2009, 10 des 594 communes du département ont déjà été reconnues 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 1,68 %. Les périodes reconnues correspondent exclusivement à l'été 2003 (juillet à septembre). Le nombre total d'occurrences (nombre d'arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle, en distinguant à la fois par commune et par période) s'élève actuellement à 10 dans le département.

À ce jour (début septembre 2009), 3 arrêtés interministériels successifs reconnaissant l'état de catastrophe naturelle sécheresse ont été pris dans le département du Doubs, dont les dates s'échelonnent entre le 6 février et le 15 janvier 2007. L'illustration 49 présente le nombre de communes concernées par les différents arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse au cours de cette période.

Arrêtés interministériels	Publication au Journal Officiel	Nombre de communes reconnues
06 février 2006	14 février 2006	8
05 mai 2006	14 mai 2006	1
15 janvier 2007	25 janvier 2007	1

Illustration 49 : Arrêtés interministériels et occurrences

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 70ème position des départements français les plus touchés, loin derrière certains du Sud-Ouest (1 418 occurrences reconnues en Haute-Garonne, 1 257 dans le Gers, 1 072 en Dordogne, par exemple). Cependant, aucun arrêté n'avait été pris sur ce département avant l'été 2003, et le Doubs se place à la 52ème position au vu du nombre de communes reconnues en état de catastrophe naturelle pour l'été 2003 sur 70 départements concernés. 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 liste des communes concernées est présentée en Annexe 4, ainsi que les dates des arrêtés interministériels et les dates de leur parution au Journal Officiel.

La carte de l'illustration 50 permet de localiser les 10 communes qui ont fait l'objet d'un arrêté de reconnaissance à ce jour, ainsi que le nombre respectif de sinistres par commune localisés dans le cadre de la présente étude. Cette carte montre une répartition assez hétérogène du phénomène sur le département, avec une sinistralité plus marquée dans les secteurs les plus urbanisés.

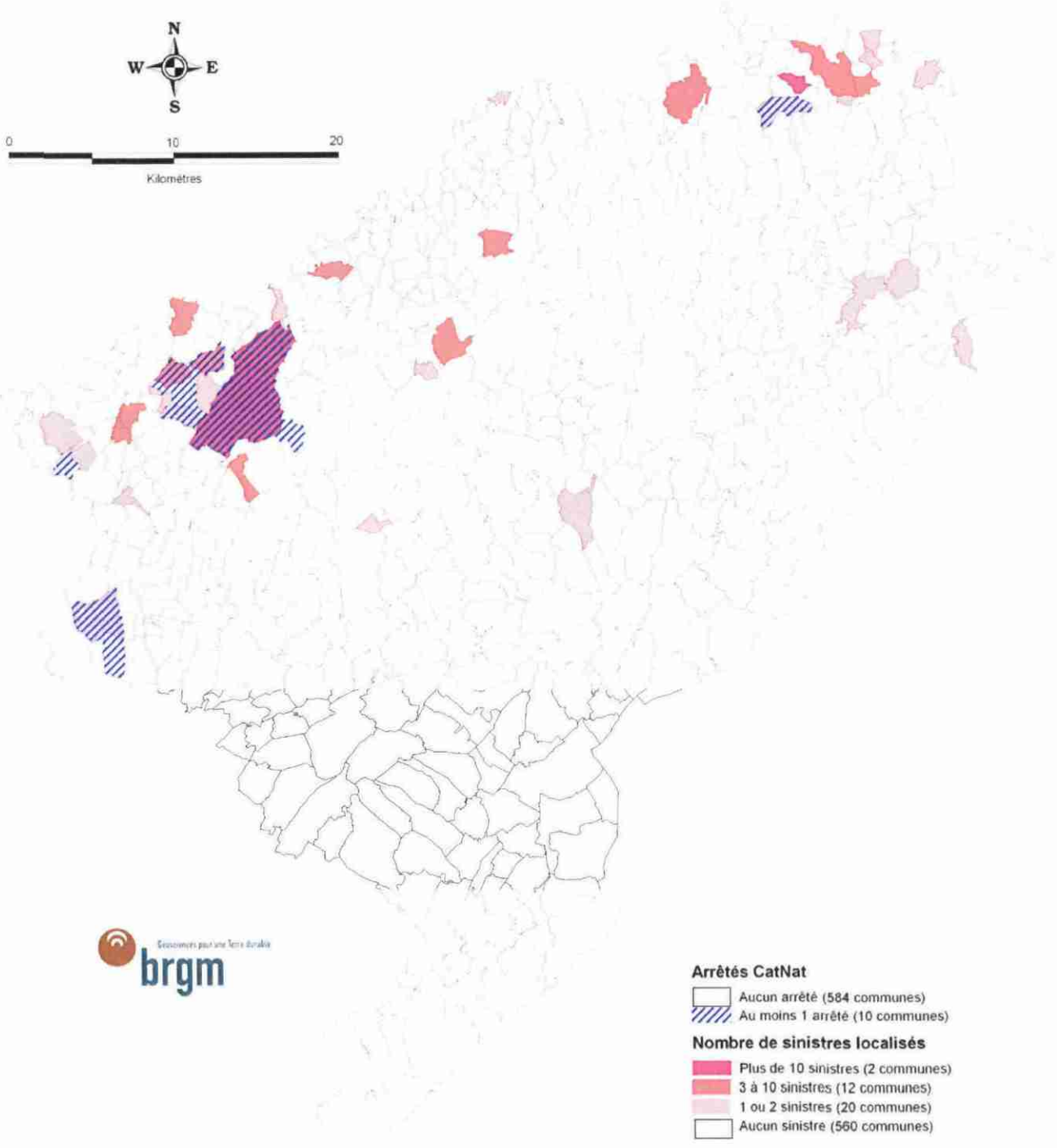


Illustration 50 : Communes concernées par des arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse et nombre de sinistres recensés et localisés

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

Les 10 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 49 des 103 sinistres localisés ont pu être datés, soit 47,6 % des cas. Cela permet de constater que si les sinistres recensés lors de l'étude sont apparus pour la plupart durant l'été 2003 (29 sinistres), 14 sinistres nous ont toutefois été signalés comme étant soit plus récents (1 en 2008, 1 en 2006 et 12 en 2004), soit plus anciens (1 en 2002, 3 en 1990, 1 en 1989 et 1 en 1986), bien qu'aucun arrêté n'ait été pris à ce jour pour ces périodes.

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 ou d'entreprises spécialisées.

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 de l'Équipement et de l'Agriculture du Doubs (DDEA, anciennement DDE), aux maires des 594 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 66 %, ce qui semble raisonnable compte tenu de l'ampleur limitée des conséquences du retrait-gonflement des sols argileux dans ce département. Cependant, 4 des 10 communes reconnues en état de catastrophe naturelle n'ont pas

répondu malgré les sollicitations répétées (Berthelange, Buffard, Morre, Pouilley-les-Vignes).

En définitive, ce sont 103 sites de sinistres, répartis dans 34 communes, qui ont été recensés et localisés. La localisation des sinistres a été effectuée sur fonds topographiques de l'IGN à 1/25 000. Ce travail a été réalisé grâce aux plans de localisation renvoyés par les communes, ou figurant dans les dossiers préfectoraux et ceux des différents bureaux d'étude, ainsi que par la consultation des sites internet www.cadastre.gouv.fr, www.maporama.fr, www.viamichelin.fr et www.pagesjaunes.fr/. Finalement, la majorité des sinistres recensés a pu être localisée avec une précision suffisante pour l'étude.

Ce résultat peut être considéré comme représentatif de la sinistralité du département.

Le nombre de sinistres par commune est très variable, mais la majorité des communes restent peu sinistrées : 41,2 % des communes sinistrées ne comptent qu'un seul sinistre recensé ; 17,6 % d'entre elles en comptent 2 ; 32,3 % en comptent entre 3 et 5 ; 2,9 % en comptent 8 (une seule commune : Miserey-Salines) ; seules 5,9 % des communes sinistrées comptent plus de 10 sinistres. Elles sont au nombre de deux : ce sont Besançon (17 sinistres) et Dung (12 sinistres).

34 % des sinistres (soit 35 sur 103) sont effectivement localisés dans 6 des 10 communes reconnues en état de catastrophe naturelle pour l'été 2003, alors que les 66 % restants (soit 68 sinistres) se répartissent dans 28 communes qui n'ont encore jamais été reconnues en état de catastrophe naturelle « sécheresse ».

La liste des sinistres avec leurs coordonnées en projection Lambert II étendu est présentée en Annexe 4. Pour des raisons de confidentialité, les noms et adresses des sinistrés ne figurent pas dans ce tableau.

L'examen des données recueillies indique que la totalité des sinistres localisés (103 sur 103 recensés) 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 47 % de la surface du département (Illustration 51, Illustration 52). Il n'est pas exclu cependant que dans l'avenir des sinistres apparaissent sur des niveaux d'altération non cartographiés actuellement, ou bien encore résultent d'autres phénomènes que celui de retrait-gonflement. 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 Doubs est concerné par le risque sismique, en particulier pour les communes situées au nord du département. 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 ou que des sinistres soient mal localisés.

Code	Notation	Formation	Surface (km²)	% Surface départ.	Nombre de sinistres
1	Fz	Alluvions récentes	246.26	4.69	9
2	FzL-T	Alluvions lacustres et tourbeuses	38.54	0.73	0
3	Fx-y	Alluvions anciennes	48.88	0.93	4
4	C	Colluvions diverses	34.03	0.65	4
5	OE	Recouvrement limoneux	15.87	0.30	1
6	FG	Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène	10.32	0.20	0
7	Gx-y	Moraines rissiennes ou würmiennes	148.95	2.84	0
8	R	Argiles résiduelles d'altération	74.62	1.42	10
9	p-IV SC	Sables et cailloutis plio-quat. (équiv. de la Form. sup. de la Forêt de Chaux)	56.94	1.08	3
10	e7-g1	Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène	7.22	0.14	2
11	n5-6	Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien	1.29	0.02	0
12	n1-3	Marnes et calcaires du Crétacé inférieur	94.59	1.80	0
13	j6b	Marnes et calcaires à *Exogyra virgula* du Kimméridgien	21.33	0.41	1
14	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien	213.86	4.07	12
15	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien	470.51	8.97	15
16	j5	Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien	41.48	0.79	1
17	j4	Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien	307.24	5.85	5
18	j2-3	Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien	10.79	0.21	0
19	j1-2	Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen	431.71	8.23	10
20	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien	111.17	2.12	19
21	l1-3	Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien	41.06	0.78	4
22	t7b	Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois	8.85	0.17	3
23	t6-7	Marnes irisées et dolomies du Keuper	20.35	0.39	0
		Total Formations argileuses	2 455.86	46.79	103
		Formations à priori non argileuses	2 792.39	53.21	0
		Zones aquatiques	7.11	0.14	
		Total département sans zones aquatiques	5 248.25	100.00	103

Illustration 51 : Tableau de la répartition géologique des 103 sinistres localisés

Parmi les formations retenues comme argileuses au sens large, 3 se distinguent par un nombre de sinistres supérieur à 10 :

- les *Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien* avec 12 sinistres ;
- les *Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien* avec 15 sinistres ;
- les *Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien* avec 19 sinistres.

Il faut cependant noter que la seconde formation est celle qui affleure le plus largement sur le département (plus de 470 km²), ce qui modère en réalité la densité de sinistres de celle-ci.

Parmi les 23 formations argilo-marneuses retenues, 7 ne comptent aucun sinistre recensé à ce jour (voir illustration 51). Il faut cependant noter que cette absence de sinistres peut en partie s'expliquer par des surfaces d'affleurement relativement réduites ; en effet, 5 formations sur 7 affleurent sur moins de 50 km², ce qui induit un faible nombre de constructions exposées.

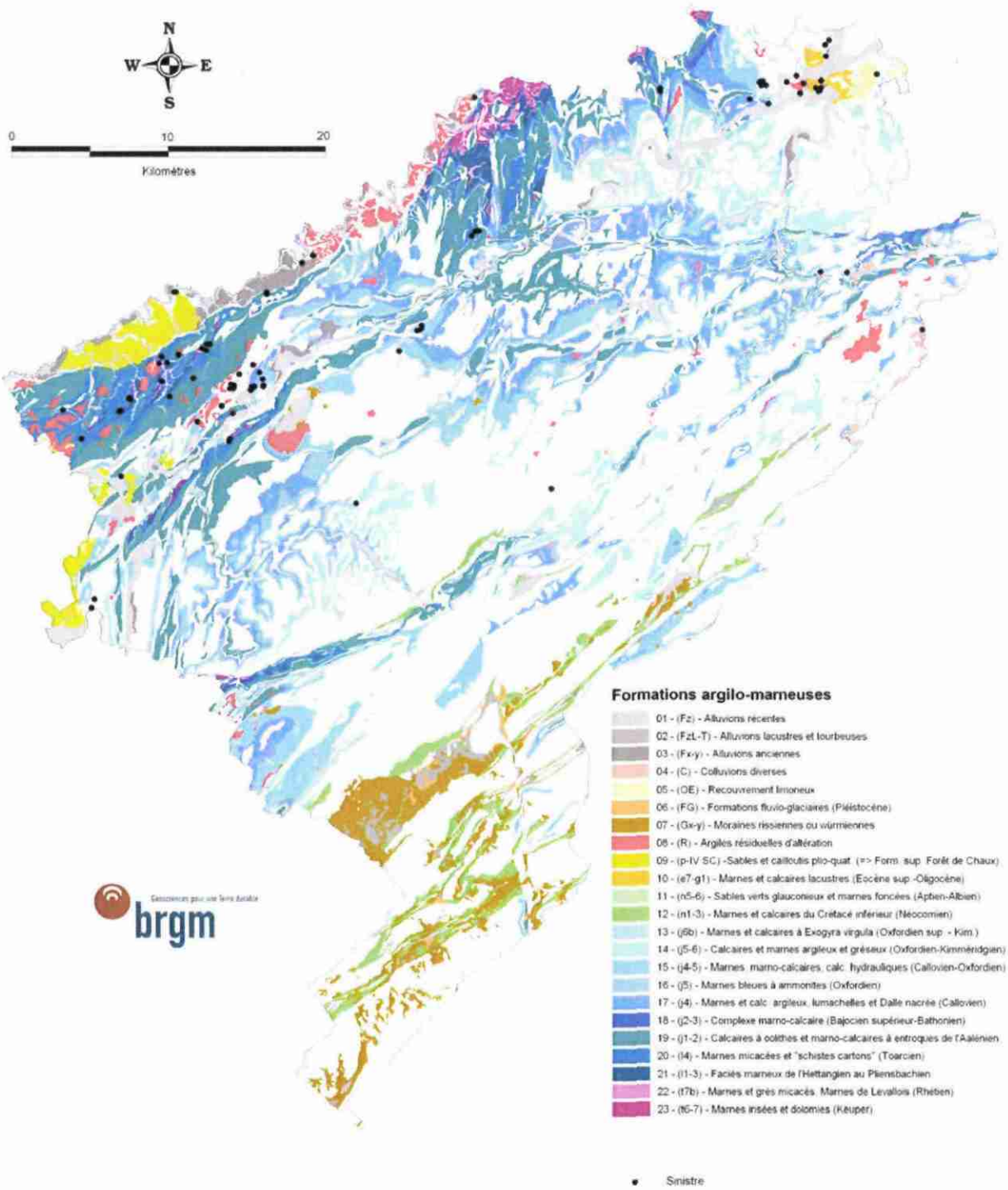


Illustration 52 : Répartition géologique des 103 sinistres localisés

7.4. FRÉQUENCE D'OCCURRENCE RAPPORTÉE A LA SURFACE BATIE

Étant donné que les surfaces d'affleurement des différentes formations géologiques sont extrêmement variables, il est important de raisonner sur les densités de sinistres par formation géologique (ramenées à 100 km^2 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 km^2 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 DDEA du Doubs 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, religieux, 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 à la nature « autre » de la BDTopo.

La surface totale des zones bâties du département a été ainsi estimée à 30,96 km², soit 0,59 % de la superficie départementale (Illustration 53).

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 17,67 km², soit 0,72 % 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 54.

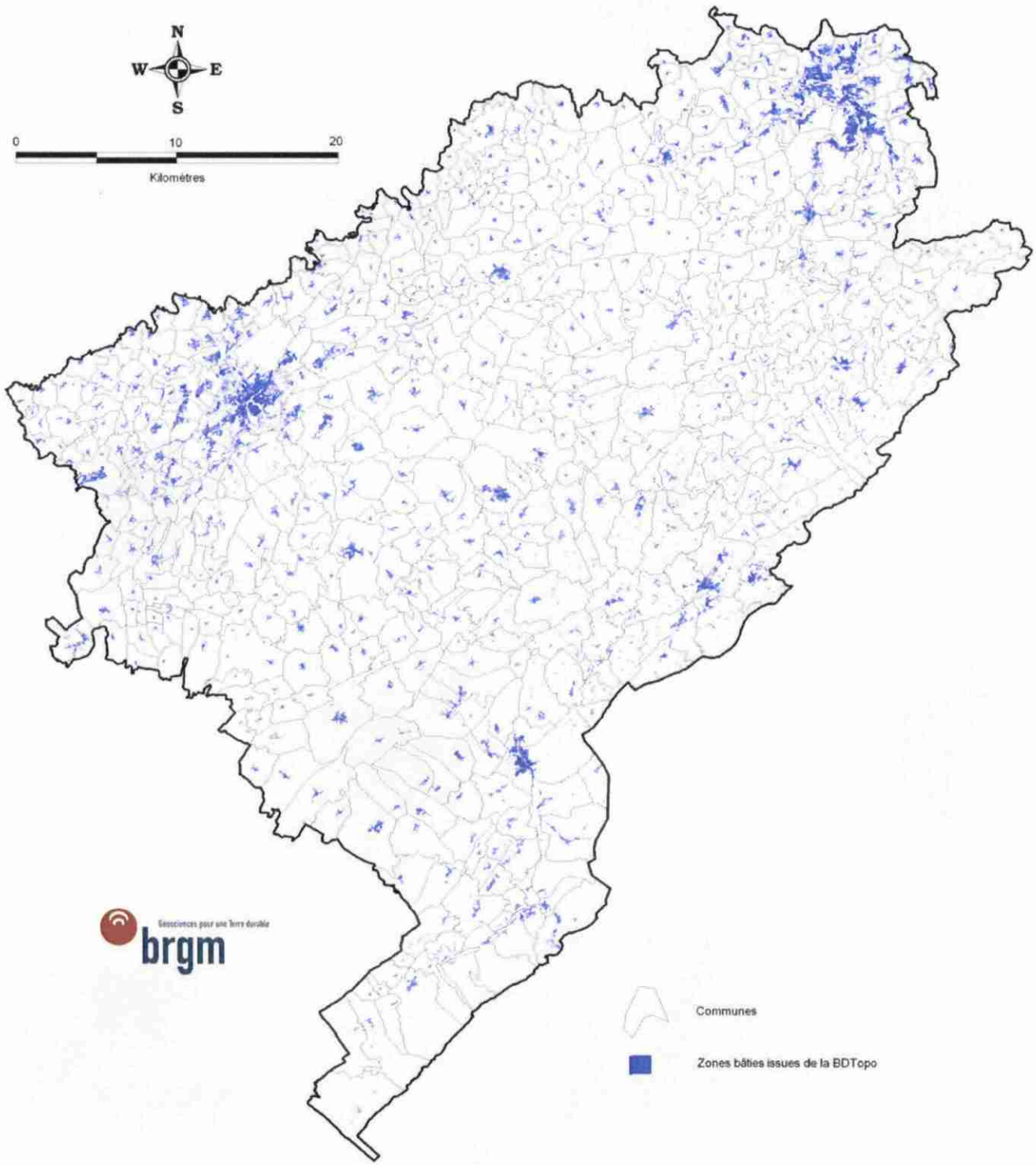


Illustration 53 : Carte des zones bâties sur le département du Doubs (source des données BD Topo IGN)

Code	Notation	Formation	Surface (km²)	% Surface départ.	Nombre de sinistres	Densité de sinistres pour 100 km² de formation	Surfaces bâties (km²)	Taux d'urbanisation (%)
1	Fz	Alluvions récentes	246.26	4.69	9	3.65	4.35	1.77
2	FzL-T	Alluvions lacustres et tourbeuses	38.54	0.73	0	0.00	0.06	0.16
3	Fx-y	Alluvions anciennes	48.88	0.93	4	8.18	0.93	1.90
4	C	Colluvions diverses	34.03	0.65	4	11.75	0.23	0.68
5	OE	Recouvrement limoneux	15.87	0.30	1	6.30	0.05	0.32
6	FG	Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène	10.32	0.20	0	0.00	0.17	1.65
7	Gx-y	Moraines rissiennes ou würmiennes	148.95	2.84	0	0.00	1.40	0.94
8	R	Argiles résiduelles d'altération	74.62	1.42	10	13.40	0.79	1.06
9	p-IV SC	Sables et cailloutis plio-quat. (équiv. de la Form. sup. de la Forêt de Chaux)	56.94	1.08	3	5.27	0.28	0.49
10	e7-g1	Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène	7.22	0.14	2	27.70	0.40	5.54
11	n5-6	Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien	1.29	0.02	0	0.00	0.02	1.55
12	n1-3	Marnes et calcaires du Crétacé inférieur	94.59	1.80	0	0.00	0.67	0.71
13	j6b	Marnes et calcaires à *Exogyra virgula* du Kimméridgien	21.33	0.41	1	4.69	0.20	0.94
14	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien	213.86	4.07	12	5.61	0.67	0.31
15	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien	470.51	8.97	15	3.19	1.81	0.38
16	j5	Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien	41.48	0.79	1	2.41	0.16	0.39
17	j4	Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien	307.24	5.85	5	1.63	2.43	0.79
18	j2-3	Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien	10.79	0.21	0	0.00	0.06	0.56
19	j1-2	Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen	431.71	8.23	10	2.32	1.91	0.44
20	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien	111.17	2.12	19	17.09	0.64	0.58
21	l1-3	Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien	41.06	0.78	4	9.74	0.31	0.75
22	t7b	Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois	8.85	0.17	3	33.90	0.05	0.56
23	t6-7	Marnes irisées et dolomies du Keuper	20.35	0.39	0	0.00	0.08	0.39
		Total Formations argileuses	*2 455.86*	*46.79*	*103*	*4.19*	*17.67*	*0.72*
		Formations à priori non argileuses	2 792.39	53.21	0	0.00	13.29	0.48
		Zones aquatiques	7.11	0.14				
		Total département sans zones aquatiques	5 248.25	100.00	103	1.96	30.96	0.59

Illustration 54 : Nombre de sinistres, surface bâtie et taux d'urbanisation par formation

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 54). Les densités de sinistres rapportées à 100 km² de formation argileuse réellement bâtie sont présentées dans le tableau de l'illustration 55.

La densité moyenne ainsi obtenue pour les formations argileuses est de l'ordre de 580 sinistres pour 100 km² d'affleurement réellement bâti.

Il est important de noter que pour une des 23 formations considérées, le critère de sinistralité ne peut être jugé comme significatif en raison de la trop faible surface bâtie qu'elles présentent. Il s'agit des *Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien – Albien* (aucun sinistre recensé, mais seulement 0,02 km² bâtis pour cette formation, ce qui correspond à quelques dizaines de maisons seulement sur l'ensemble du département). Pour cette formation d'extension géographique très réduite, la prise en compte d'un seul sinistre pourrait faire immédiatement passer la densité de sinistres d'une valeur nulle à forte. En revanche, la sinistralité a été jugée significative pour le *Recouvrement limoneux du Quaternaire* et les *Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois*, malgré une surface bâtie également très réduite (0,05 km² pour chacune d'elles), en raison de la présence respectivement de 1 et 3 sinistres, ce qui tend à démontrer l'existence d'une sinistralité relativement importante pour ces deux formations malgré leur faible urbanisation.

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 580 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 580 et 1160 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 1160 sinistres pour 100 km² de surface bâtie dans la formation (ce qui correspond aux formations ayant une densité de sinistres très importante).

Les notes de sinistralité ainsi attribuées sont précisées dans le tableau de l'illustration 55.

Sept formations obtiennent ainsi une note de densité de sinistres maximale de 3 :

- les *Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois du Rhétien* (6000 sinistres pour 100 km² bâtis) ;
- les *Marnes micacées et « schistes cartons » du Toarcien* (près de 3000 sinistres pour 100 km² bâtis) ;
- le *Recouvrement limoneux du Quaternaire* (2000 sinistres pour 100 km² bâtis) ;
- les *Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien* (près de 1800 sinistres pour 100 km² bâtis) ;
- les Colluvions diverses (plus de 1700 sinistres pour 100 km² bâtis) ;

- les *Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien* (près de 1300 sinistres pour 100 km² bâtis) ;
- les *Argiles résiduelles d'altération* (près de 1300 sinistres pour 100 km² bâtis).

Cinq de ces sept formations sont par ailleurs affectées d'une susceptibilité moyenne.

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
1	Fz	Alluvions récentes	246,26	4,69	9	3,65	4,35	1,77	207	1
2	FzL-T	Alluvions lacustres et tourbeuses	38,54	0,73	0	0,00	0,06	0,16	0	1
3	Fx-y	Alluvions anciennes	48,88	0,93	4	8,18	0,93	1,90	430	1
4	C	Colluvions diverses	34,03	0,65	4	11,75	0,23	0,68	1739	3
5	OE	*Recouvrement limoneux*	15,87	0,30	1	6,30	0,05	0,32	2000	3
6	FG	Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène	10,32	0,20	0	0,00	0,17	1,65	0	1
7	Gx-y	Moraines rissiennes ou würmiennes	148,95	2,84	0	0,00	1,40	0,94	0	1
8	R	Argiles résiduelles d'altération	74,62	1,42	10	13,40	0,79	1,06	1266	3
9	p-IV SC	Sables et cailloutis plio-quat. (équiv. de la Form. sup. de la Forêt de Chaux)	56,94	1,08	3	5,27	0,28	0,49	1071	2
10	e7-g1	Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène	7,22	0,14	2	27,70	0,40	5,54	500	1
11	n5-6	Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien	1,29	0,02	0	0,00	0,02	1,55	0	NS
12	n1-3	Marnes et calcaires du Crétacé inférieur	94,59	1,80	0	0,00	0,67	0,71	0	1
13	j6b	*Marnes et calcaires à Exogyra virgula du Kimméridgien*	21,33	0,41	1	4,69	0,20	0,94	500	1
14	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien	213,86	4,07	12	5,61	0,67	0,31	1791	3
15	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien	470,51	8,97	15	3,19	1,81	0,38	829	2
16	j5	Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien	41,48	0,79	1	2,41	0,16	0,39	625	2
17	j4	Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien	307,24	5,85	5	1,63	2,43	0,79	206	1
18	j2-3	Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien	10,79	0,21	0	0,00	0,06	0,56	0	1
19	j1-2	Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen	431,71	8,23	10	2,32	1,91	0,44	524	1
20	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien	111,17	2,12	19	17,09	0,64	0,58	2969	3
21	l1-3	*Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien*	41,06	0,78	4	9,74	0,31	0,75	1290	3
22	t7b	Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois	8,85	0,17	3	33,90	0,05	0,56	6000	3
23	t6-7	Marnes irisées et dolomies du Keuper	20,35	0,39	0	0,00	0,08	0,39	0	1
		Total Formations argileuses	2 455,86	46,79	103	4,19	17,67	0,72	583	
		Formations à priori non argileuses	2 792,39	53,21	0	0,00	13,29	0,48		
		Zones aquatiques	7,11	0,14						
		Total département sans zones aquatiques	5 248,25	100,00	103	1,96	30,96	0,59		

Illustration 55 : Densité de sinistres et notes de sinistralité

Il est à noter que ce niveau de sinistralité reste relativement 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). Toutefois, cette densité moyenne de sinistres reste comparable à celle obtenue de la même manière dans des départements comme la Haute-Saône, la Drôme, les Landes ou la Loire-Atlantique, caractérisés également par une sinistralité modérée. Elle est naturellement très inférieure à celle calculée dans plusieurs départements de la région Île-de-France (Essonne, Val-de-Marne et Seine-

Saint-Denis) où elle atteint en moyenne 9 000 sinistres pour 100 km² de surface bâtie argileuse, avec des pointes allant jusqu'à plus de 50 000 sinistres pour 100 km² bâtis dans certaines formations argileuses particulièrement réactives.

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 Doubs).

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 (Illustration 56) 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 Doubs, aucune formation n'est ainsi classée en aléa fort vis à vis du phénomène de retrait-gonflement des argiles. En revanche, 7 formations présentent un aléa moyen, résultant d'une susceptibilité moyenne combinée avec une sinistralité forte (*Colluvions diverses ; Recouvrement limoneux ; Argiles résiduelles d'altération ; Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien ; Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien*) ou moyenne (*Sables et cailloutis plio-quat. (équiv. de la Form. sup. de la Forêt de Chaux ; Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien*). Ces formations couvrent 7,15 % de la surface départementale (Illustration 57).

16 formations, couvrant 39,65 % 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 à forte, voire non significative, ou d'une susceptibilité moyenne combinée à une sinistralité faible.

Code	Notation	Formation	Surface (km²)	Note lithologique	Note minéralogique	Note géotechnique	Indice de suceptibilité	Niveau de suceptibilité	Note de suceptibilité	Note de sinistralité	Indice d'aléa	Niveau d'aléa
1	Fz	Alluvions récentes	246,26	2	2	2	2,00	Faible	1	1	3	Faible
2	FzL-T	Alluvions lacustres et tourbeuses	38,54	2	1	1	1,33	Faible	1	1	3	Faible
3	Fx-y	Alluvions anciennes	48,88	2	2	2	2,00	Faible	1	1	3	Faible
4	C	Colluvions diverses	34,03	3	2	2	2,33	Moyen	2	3	7	Moyen
5	OE	*Recouvrement limoneux*	15,87	2	3	2	2,33	Moyen	2	3	7	Moyen
6	FG	Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène	10,32	2	3	2	2,33	Moyen	2	1	5	Faible
7	Gx-y	Moraines rissiennes ou würmiennes	148,95	1	3	1	1,67	Faible	1	1	3	Faible
8	R	Argiles résiduelles d'altération	74,62	3	2	2	2,33	Moyen	2	3	7	Moyen
9	p-IV SC	*Sables et cailloutis plio-quat. (équiv. de la Form. sup. de la Forêt de Chaux)*	56,94	2	3	2	2,33	Moyen	2	2	6	Moyen
10	e7-g1	Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène	7,22	2	3	2	2,33	Moyen	2	1	5	Faible
11	n5-6	Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien	1,29	2	2	2	2,00	Faible	1	NS	NS	Faible
12	n1-3	Marnes et calcaires du Crétacé inférieur	94,59	2	3	2	2,33	Moyen	2	1	5	Faible
13	j6b	Marnes et calcaires à *Exogyra virgula* du Kimméridgien	21,33	1	1	3	1,67	Faible	1	1	3	Faible
14	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien	213,86	1	1	2	1,33	Faible	1	3	5	Faible
15	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien	470,51	2	2	2	2,00	Faible	1	2	4	Faible
16	j5	Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien	41,48	3	2	2	2,33	Moyen	2	2	6	Moyen
17	j4	Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien	307,24	1	2	2	1,67	Faible	1	1	3	Faible
18	j2-3	Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien	10,79	1	1	1	1,00	Faible	1	1	3	Faible
19	j1-2	Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen	431,71	1	2	3	2,00	Faible	1	1	3	Faible
20	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien	111,17	3	2	2	2,33	Moyen	2	3	7	Moyen
21	l1-3	Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien	41,06	3	2	2	2,33	Moyen	2	3	7	Moyen
22	t7b	Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois	8,85	2	1	2	1,67	Faible	1	3	5	Faible
23	t6-7	Marnes irisées et dolomies du Keuper	20,35	3	2	2	2,33	Moyen	2	1	5	Faible

Total Formations argileuses	2 455,86
Formations à priori non argileuses	2 792,39
Zones aquatiques	7,11
Total département sans zones aquatiques	5 248,25

Illustration 56 : Niveau d'aléa des formations argileuses

Code	Notation	Formation	Surface (km²)	% Surface départ.	Niveau d'aléa
4	C	Colluvions diverses	34.03	0.65	Moyen
5	OE	Recouvrement limoneux	15.87	0.30	Moyen
8	R	Argiles résiduelles d'altération	74.62	1.42	Moyen
9	p-IV SC	Sables et cailloutis plio-quat. (équiv. de la Form. sup. de la Forêt de Chaux)	56.94	1.08	Moyen
16	j5	Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien	41.48	0.79	Moyen
20	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien	111.17	2.12	Moyen
21	l1-3	Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien	41.06	0.78	Moyen
		Total des formations de susceptibilité moyenne	**375.17**	**7.15**	
1	Fz	Alluvions récentes	246.26	4.69	Faible
2	FzL-T	Alluvions lacustres et tourbeuses	38.54	0.73	Faible
3	Fx-y	Alluvions anciennes	48.88	0.93	Faible
6	FG	Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène	10.32	0.20	Faible
7	Gx-y	Moraines rissiennes ou würmiennes	148.95	2.84	Faible
10	e7-g1	Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène	7.22	0.14	Faible
11	n5-6	Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien	1.29	0.02	Faible
12	n1-3	Marnes et calcaires du Crétacé inférieur	94.59	1.80	Faible
13	j6b	Marnes et calcaires à *Exogyra virgula* du Kimméridgien	21.33	0.41	Faible
14	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien	213.86	4.07	Faible
15	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien	470.51	8.97	Faible
17	j4	Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien	307.24	5.85	Faible
18	j2-3	Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien	10.79	0.21	Faible
19	j1-2	Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen	431.71	8.23	Faible
22	t7b	Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois	8.85	0.17	Faible
23	t6-7	Marnes irisées et dolomies du Keuper	20.35	0.39	Faible
		Total des formations de susceptibilité faible	**2 080.69**	**39.65**	
		Total Formations argileuses	**2 455.86**	**46.79**	
		Formations à priori non argileuses	**2 792.39**	**53.21**	
		Zones aquatiques	7.11	0.14	
		Total département sans zones aquatiques	**5 248.25**	**100.00**	

Illustration 57 : Classement des formations en fonction de leur niveau d'aléa

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 58 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.

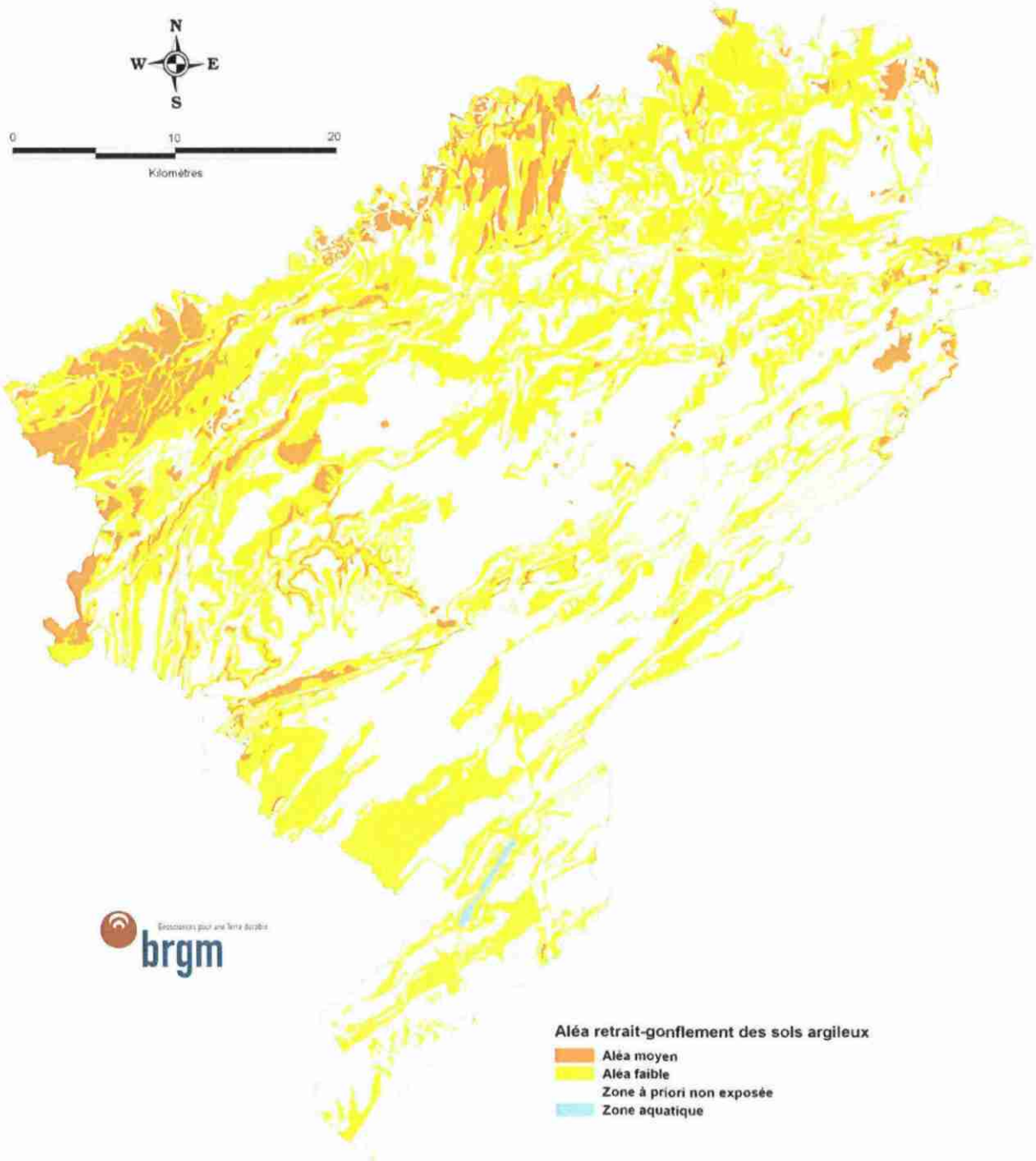


Illustration 58 : Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement du Doubs

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 *à priori* non argileuses, et donc théoriquement dépourvues de tout aléa. Elles couvrent près de 53,20 % de la superficie départementale.

Il n'est toutefois pas exclu que, sur ces derniers secteurs considérés d'aléa *à 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 diffère relativement de la carte de susceptibilité établie précédemment, sur la seule base d'une caractérisation physique des formations identifiées comme argileuses. En effet, il apparaît que 4 formations regroupant plus de 132 km^2 s'étaient vues attribuer un niveau de susceptibilité moyenne, mais sont classées finalement en aléa faible compte tenu de la sinistralité modérée qu'elles ont occasionnée à ce jour.

8.3. COHÉRENCE AVEC LES DEPARTEMENTS LIMITROPHES

Parmi les trois départements limitrophes du Doubs, deux disposent d'ores-et-déjà d'une carte d'aléa publiée. Il s'agit des départements du Jura (39) et de la Haute-Saône (70). L'illustration 59 juxtapose les niveaux d'aléa des trois départements.

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

Quelques discontinuités apparaissent au niveau des *Marnes et calcaires à Exogyra virgula du Kimméridgien* et des *Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien ;* en effet, les faciès les plus calcaires de ces deux formations ont pu être différenciés dans le Doubs et n'ont pas été conservés dans ce département.

Les seules discontinuités notables qui apparaissent concernent :

- les formations quaternaires correspondant aux *colluvions* et au *recouvrement limoneux*. En effet, ces deux formations ont été classées en aléa moyen dans le Jura et le Doubs, alors qu'elles sont en aléa faible en Haute-Saône ;
- les *argiles résiduelles d'altération*, qui sont classées en aléa moyen en Haute-Saône et dans le Doubs sont en contact avec de l'aléa faible dans le département du Jura ; en effet, dans ce dernier département, ces formations superficielles n'ont pas toujours été conservées au profit des formations sous-jaccente.
- les *Marnes irisées et dolomie du Keuper*, qui sont classées en aléa faible en Haute-Saône et dans le Doubs, alors qu'elles sont en aléa moyen dans le Jura.

Pour ce qui est des *Colluvions*, on peut noter qu'elles ont été classés en susceptibilité moyenne dans chacun des trois départements, et que le niveau d'aléa final est conditionné par la sinistralité, jugée moyenne et forte respectivement dans le Jura et le Doubs, et faible en Haute-Saône.

Concernant le *Recouvrement limoneux,* le niveau d'aléa final est conditionné par la susceptibilité de niveau moyen dans le Jura et le Doubs et de niveau faible en Haute-Saône, alors que la sinistralité est moyenne à forte dans les trois départements.

Pour ce qui est des *Argiles résiduelles d'altération*, le niveau d'aléa final est conditionné également par la susceptibilité de niveau moyen dans le Doubs et la Haute-Saône, et de niveau faible dans le Jura, alors que la sinistralité est là encore moyenne à forte dans les trois départements.

Concernant enfin les *Marnes irisées et dolomie du Keuper*, on note qu'elles ont été classés en susceptibilité moyenne dans chacun des trois départements, et que le niveau d'aléa final est conditionné par la sinistralité, jugée moyenne dans le Jura, et faible dans le Doubs et en Haute-Saône.

Code	Notation	Formation	Niveau d'aléa 39	Niveau d'aléa 25	Niveau d'aléa 70
1	Fz	Alluvions récentes	Faible	Faible	Faible
2	FzL-T	Alluvions lacustres et tourbeuses	Faible	Faible	
3	Fx-y	Alluvions anciennes	Faible	Faible	Faible
4	C	Colluvions diverses	Moyen	Moyen	Faible
5	OE	Recouvrement limoneux	Moyen	Moyen	Faible
6	FG	Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène		Faible	Faible
7	Gx-y	Moraines rissiennes ou würmiennes	Faible	Faible	Faible
8	R	Argiles résiduelles d'altération	Faible	Moyen	Moyen
9	p-IV SC	Sables et cailloutis plio-quat. (équiv. de la Form. sup. de la Forêt de Chaux)	Moyen	Moyen	
10	e7-g1	Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène		Faible	Faible
11	n5-6	Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien - Albien	Faible	Faible	
12	n1-3	Marnes et calcaires du Crétacé inférieur	Faible	Faible	
13	j6b	Marnes et calcaires à *Exogyra virgula* du Kimméridgien	Faible	Faible	
14	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien	Faible	Faible	Faible
15	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien	Faible	Faible	Faible
16	j5	Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien	Moyen	Moyen	
17	j4	Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien	Faible	Faible	Faible
18	j2-3	Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien		Faible	Faible
19	j1-2	Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen	Faible	Faible	
20	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien	Moyen	Moyen	Moyen
21	l1-3	Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien	Moyen	Moyen	Moyen
22	t7b	Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois		Faible	Faible
23	t6-7	Marnes irisées et dolomies du Keuper	Moyen	Faible	Faible

Illustration 59 : Comparaison des niveaux d'aléa des trois départements limitrophes (39, 25, 70)

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 Doubs. 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 (MEEDDM) 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 23 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, 103 sinistres répartis dans 34 communes du département ont ainsi été recensés et localisés. Cet échantillon, bien qu'assurément non exhaustif, paraît représentatif du phénomène tel qu'il a été observé à ce jour dans le département.

En appliquant au département du Doubs 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 5 248 km² (hors zones aquatiques) :

- 7,15 % ont été classés en aléa moyen ;
- 39,65 % ont été considérés en aléa faible ;
- 53,20 % 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 Doubs, 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 la forte hétérogénéité des formations du département. À défaut, il conviendra de mettre en œuvre des règles constructives type par zones d'aléa, visant à réduire le risque de survenance de sinistres.

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.

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.

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.

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

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.

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.

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.

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.

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, 4ème 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. 9e 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 *8e 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

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

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

Piantone P. (1986) – Minéralogie et cristallochimie 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 enginneering 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. – 3ème 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

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

Cartes géologiques

Nom de la carte	N° de la carte	Date de publication de la carte	Auteurs
Carte géologique de la France à 1 000 000 (6ème édition)		2003	
LURE	**443**	2000	D. Contini, J. Creuzot, M. Dressler, N. Théobald
BELFORT	**444**	1948	N. Théobald, J. Devantoy
GY	**472**	1970	T. Barthélémy, B. Budois, M. Dreyfuss, A. Duchemin, C. Javey, G. Kuntz, J. Martin, R. Mathieu, H. Pierrard, M. Rocca
BAUME-LES-DAMES	**473**	1957	P. Bardet, J. Bulle, P. Cailleteau, M. Campy, J.P. Cautru, D. Contini, M. Dreyfuss, R. Heilammer, H. Hudeley, J. Martin, P. Mosson, J.Y. Pasquier, M. Rollet, J. Seguin, N. Théobald
MONTBÉLIARD	**474**	1973	B. Angely, D. Contini, Y. Kerrien, G. Kuntz, J.L. Laffly, J. Landry, N. Théobald
DELLE	**475**	1985	C. Bailly, P. Chauve, J. Martin
PESMES	**501**	1982	M. Campy, P. Chauve, N. Morre-Biot, C. Pernin
BESANÇON	**502**	1934	A. Bonte, X. Caquineau, P. Celet, D. Contini, R. Cussey, M. Dreyfuss, A. Javey, G. Kuntz, J. Martin, N. Théobald, B. Renard, M. Rollet
VERCEL	**503**	1958	J.P. Cautru, J. Claret, M. Dreyfuss, D. Nicot, J. Patillet, G. Protche, J.C. Seguin
MAICHE	**504**	1950	Cl. Augier, J. Barlier, P. Biens, F. Castelo Branco, F. Derumaux, J. Guillemot, T. Guvenc, F. Jean, F. Melières, J.M. Pierron, R. Rouxel, R. Weber
DAMPRICHARD	**505**	1949	J. Barlier, D. Basseto, J. Bauer ,J. Guillemot, A. Souffès-Desprè, P. Vernhes
DOLE	**528**	1979	P. Chauve, Y. Kerrien, C. Pernin
QUINGEY	**529**	1975	A. Bonte, P. Celet
ORNANS	**530**	1930	J. Both, J. Bulle, J. Cassedanne, M. Chauve, G. Colas, M. Dreyfuss, C. Grandjacquet, C. Sainton, M. Ziegler
MORTEAU	**531**	1960	J. Cassedanne, P. Fallot, G. Fortems, P. Glasson, G. Kuntz, B. Nicklès, M. Nicklès, A. Perrodon, Serra, Cl. Sainton, M. Tixier, P. Umbach-Bascone, M. Ziegler
SALINS-LES-BAINS	**556**	1936	A. Caire
PONTARLIER	**557**	1930	G. Castany, P. Chauve, M. Dreyfuss, S. François, L. Glangeaud, J. Tricart
CHAMPAGNOLE	**582**	1965	S. Guillaume, M-A. Guillaume
MOUTHE	**583**	1943	P. Chauve, M. Dreyfuss, S. Guillaume, J. Tricart
MOREZ	**605**	1968	H. Bergougnan, C. Caron, L. Glangeaud, S. Guillaume, M-A. Guillaume, F. Llac, Ph. Olive, F. Toussaint

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

Le terme argile désigne à la fois une classe granulométrique (< 2 µm) 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_RG25	NOTATION_RG25	FORMATION_RG25	CODE_HARMO	NOTATION_HARMO	DESCRIPTION HARMO
1	Fz	Alluvions récentes	20	Fz	Alluvions récentes (actives ou stabilisées) indifférenciées, graviers, sables, argiles
			21	Fz2	Alluvions modernes actives
			22	Fz1	Alluvions modernes stabilisées parfois recouvertes (limons)
2	FzL-T	Alluvions lacustres et tourbeuses	18	L	Dépôts lacustres
			19	T	Tourbes et dépôts associés (Limnées, Planorbes)
3	Fx-y	Alluvions anciennes	23	F	Alluvions anciennes non datées (Belfort & Baume-les-Dames)
			24	Fy2	Alluvions calcaires anciennes (Terrasses basses du Doubs,..)
			25	Fy1	Graviers, sables, silts, argiles (terrasse haute : +30/+50m de la vallée du Doubs (Besançon)
			35	Fx	Alluvions anciennes, sables et graviers, des vallées et des plateaux (Riss)
4	C	Colluvions diverses	0	CF	Remplissage de fond de vallée sèche
			4	Eca	Eboulis et panneaux calcaires glissés
			5	S	Glissements en masse et loupes de glissement
			6	C	Colluvions
			7	FC	Collu-alluvions
5	OE	Recouvrement limoneux	15	OE	Limons en placages
			16	OE-H	Limons complexes en épandage interfluves ou plateaux
6	FG	Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène	30	GLy1	Alluvions de delta glacio-lacustre de Pontarlier (Würm)
			32	FGx	Fluvio-glaciaire de la Loue (Lods à Ornans) et Salins-les-Bains (Riss)
7	Gx-y	Moraines rissiennes ou würmiennes	29	GyJ	Moraines jurassiennes et cailloutis (Grand'Combe-Châteleu, Montlebon, synclinal des Alliés)(Würm)
			31	Gx	Moraines de fond, blocs erratiques, cailloutis péri-glaciaires de Gennes
8	R	Argiles résiduelles d'altération	0	Iarg	Argiles à silex et à chailles sur substrat indifférencié
			9	Ñé	Argile de décalcification à pisolithes ferrugineuses (sur Sidérolithique) de Quingey
			10	i-S	Argiles d'altération à chailles mélangées à des dépôts soliflués sur pentes (Baume-les-Dames)
			11	i	Argiles d'altération sur terrains variés
			12	Iars	Argiles sableuses de décalcification à chailles et silex
			13	is/F	Argiles résiduelles silto-sableuses à quartz (formation de Piedmont de Jallerange, Pesmes)
			45	pS	Sidérolithique argiles bleues et sables ferrugineux de "La Pierre Trouée" (Pliocène probable)
			56	e6	Argiles rouges à pisolithes ferrugineux (exploités) : argiles du sidérolithique (Eocène continental)
9	p-IV SC	Sables et cailloutis plio-quaternaires (équival. de la Formation sup. de la Forêt de Chaux)	40	p-IV SS	Sables et cailloutis, galets de grès parfois (equivalent de la Formation supérieure de la Forêt de Chaux) (Plio-Quaternaire)
10	e7-g1	Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène	53	gM	Marnes jaunes ou brunes à granules de fer, remaniées à la base (Oligocène)
			55	e7	Marnes à Helix et Mytilus, grès, conglomérats et calcaires lacustres (Ludien)
11	n5-6	Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien-Albien	59	n6	Sables verts glauconieux de la vallée de l'Ognon à Douvilleiceras mamillare, Hoplites deluci, Acanthoceras
12	n1-3	Marnes et calcaires du Crétacé inférieur	64	n3	Calcaires bioclastiques glauconieux ou ferrugineux, associés à des marnes dans la vallée de l'Ognon et la
			65	n2	Calcaires roux oolithiques à Pholadomya elongata, ferrugineux, exploités aux Grangettes et à Oye-et-Pallet,
			66	n1	Calcaires fétides, dolomitiques, brèches à cailloux noirs, argiles verdâtres, marnes claires, faune saumâtre et d'eau douce : Cerithium, Turritella, Planorbis, Cyprina ; lentilles de gypse des Fins (exploité)
13	j6b	Marnes et calcaires à Exogyra virgula de l'Oxfordien sup. et Kimméridgien	71	j6b	Calcaires marneux à Ptéroceras à la base, marnes et calcaires à Exogyra virgula au sommet (Kimméridgien
			72	j6b2	Calcaires parfois dolomitiques et marnes à Exogyra virgula, Diceras (Kimmeridgien supérieur, Virgulien)
14	j5-6	Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien	78	j5c2-6aM	Marnes grises et calcaires gréseux, oolithiques, lumachelliques ou argileux bioclastiques (Séquanien moyen,
15	j4-5	Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien	81	j5bA	Marnes et marno-calcaires (couches d'Effingen et du Geissberg), Astartes, calcaires hydrauliques et
			82	j5abA	Marnes bleues pyriteuses plastiques à entroques, calcaires argilo-siliceux gris (Argovien, Oxfordien inférieur
			84	j4-5	Calcaires argileux oolithiques et marnes à Creniceras renggeri (Callovien-Oxfordien indifférenciés)
16	j5	Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien	83	j5a	Marnes gris-noir à ammonites pyriteuses, Creniceras renggeri (Oxfordien inférieur)
17	j4	Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien	87	j4a	Calcaires localement oolithiques, lumachelles, marnes, "Dalle nacrée", lacunes (Callovien inférieur)
18	j2-3	Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien	89	j3bc	Marnes à Rhynchonelles (-de Belfort), calcaires compacts (-de la citadelle), calcaires oolithiques, spathiques
			90	j3a	Calcaires oolithiques, bioclastiques à tâches, calcaires marneux en dalles fines, hard-ground au sommet,
19	j1-2	Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen	91	j2b	Calcaires oolithiques (Grande oolithe) à entroques, petites hu˜tres, marnes à O. acuminata (Vésulien),
			93	j2a	Calcaires à entroques (-de Vesoul) au nord, polypiers, calcaires à silex (-de Messia), calcaires spathiques (à
			94	j1-2	Oolithes ferrugineuses, calcaires à silex, calcaires à entroques (Petit Granite)(calcaires de
20	l4	Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien	97	l4-j1	Marnes (Toarcien-Aalénien indifférenciés)
			98	l	Marnes (Lias indifférencié)
			99	lt	Marnes et calcaires (Lias et Trias indifférenciés)
			100	l4	Marnes micacées, marnes grises, marnes à nodules calcaires ou ferrugineux (Hildoceras bifrons), schistes
			101	l4c	Marnes avec quelques bancs de calcaires, marnes et silts micacés (Toarcien moyen à supérieur)
			102	l4a-b	"Schistes carton", marnes à miches, argilites, lacunes (Toarcien inférieur et moyen)
21	l1-3	Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien	103	l3	Calcaires argileux (à Pleuroceras), marnes à Amaltheus, oolithes ferrugineuses à Stokesi, calcaires à
			104	l2-3	Marno-calcaires à Gryphaea dilatata, calcaires à bélemnites, alternance calcaires-marnes (Lotharingien
			105	l2	Marnes bleues à Asteroceras et Arnioceras (Lotharingien inférieur)
			106	l1-2	Calcaires à Gryphées, marnes, calcaires argileux (Hettangien-Sinémurien)
22	t7b	Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois	108	t7	Argiles brun-rouge (-de Levallois), argilites et grès grossiers, schistes noirs, bone-beds (Rhétien)
23	t6-7	Marnes irisées et dolomies du Keuper	109	t5-7	Marnes bariolées, dolomies (Trias supérieur indifférencié)
			110	t6-7R	Grès, dolomies, marnes bariolées, gypse, argiles schisteuses noires et "chocolat" (Keuper supérieur-
			111	t4-7	Marnes irisées lie-de-vin et vertes, dolomies grises, gypse (Keuper indifférencié)
			112	t6-7	Argiles et marnes bariolées dolomitiques (Marnes irisées supérieures), lie-de-vin ("Châlin"), argiles (-de
			114	t5	Marnes irisées inférieures : marnes à sel gemme et à gypse (Carnien)

Annexe 3 - Résultats des valeurs de bleu de méthylène et d'analyses minéralogiques par diffractométrie aux RX des 18 échantillons prélevés par le BRGM dans le cadre de la présente étude

Prélèvements :

Les prélèvements ont été réalisés jusqu'à 1,50 m de profondeur à la tarière à main. Les 18 échantillons prélevés en deux exemplaires chacun ont été analysés respectivement par GEOTEC (Dijon) pour la détermination de la valeur au bleu de méthylène et par le laboratoire UMR 5561 de l'université de Bourgogne (Dijon) pour les analyses minéralogiques de la fraction argileuse par diffractométrie aux rayons X.

Valeur au bleu de méthylène :

Ces analyses ont consisté à déterminer la valeur au bleu de méthylène des sols par essai à la tâche, suivant la norme NF P 94-068. La quantité de bleu est directement liée à la surface spécifique des particules, notamment les argiles et leur réactivité.

L'essai consiste à injecter une solution de bleu de méthylène (dosée à 10 g/l) dans une suspension constituée d'une prise d'essai de la fraction 0/5 mm du sol à étudier dispersée dans 500 cm3 d'eau minéralisée. La valeur de bleu est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol.

Avant les essais d'adsorption, les échantillons ont été dispersés dans de l'eau, puis laissés au repos au moins 12 heures.

Étude minéralogique par diffractométrie des rayons X :

La méthode utilisée est la suivante :

La fraction argileuse (< 2µm) est étudiée par diffraction des rayons X sur pâtes orientées selon le protocole analytique donné par Holtzapffel (1985).

Après broyage des échantillons et décarbonatation à l'aide d'HCl N/5, les échantillons sont défloculés par rinçages successifs à l'eau distillée. La fraction argileuse prélevée après décantation de la suspension est centrifugée puis étalée sur une lame de verre rainurée (méthodes des pâtes orientées).

Les analyses sont effectuées sur un diffractomètre Bruker D4 équipé d'une anticathode en Cu. Trois types d'analyses sont effectuées : 1) sans traitement préalable des échantillons ; 2) après saturation des argiles par l'éthylène-glycol ; 3) après chauffage à 490°C pendant deux heures. Les proportions relatives des minéraux argileux sont estimées avec une erreur de ± 5%, en suivant le protocole préconisé par Reynolds (1980), et Moore et Reynolds (1989 ; 1997).

Numéro Echantillon	Numéro Formation RG25	Code Formation RG25	Commune	X L2E (m)	Y L2E (m)	Vb (g/100g)	Chlorite	Illite	Kaolinite	Vermiculite	I/S R1	I/S R0	Chl/Sm	Quartz	Feldspath	Goethite	Lépidocrocite
18	1	Fz	GENEUILLE	875 148	2 264 705	3.28		15	20	30	10	25		+		+	
6	3	Fx-y	BONNAY	880 816	2 266 353	6.02		15	35	20	30			+++		+	
16	4	C	HERICOURT [2]	932 527	2 294 152	5.06		45	20	10	25			+		+	
8	5	OE	BERTHELANGE	861 672	2 250 129	4.76		15	30	40	15			+++	+	+	
10	7	Gx-y	LA CLUSE-ET-MIJOUX	911 306	2 217 011	2.35		25	15			60		+			
2	8	R	CHAMPAGNEY	869 134	2 256 830	4.74		30	30	15	25			+		+	
3	8	R	PELOUSEY	872 829	2 259 863	8.92		15	25	20	40			+		++	
4	8	R	PELOUSEY	872 829	2 259 863	7.41		20	35		35	10		+		+++	
7	8	R	BERTHELANGE	861 325	2 249 897	4.12	5	20	15	35	15		10	++		+	
13	10	e7-g1	MONTBELIARD	937 654	2 286 450	3.14		25	15	30	15	15		+		+	
11	12	n1-3	BULLE	895 074	2 217 419	7.72	5	25	10	20		40		+			
12	12	n1-3	BANNANS	897 762	2 218 360	7.47		15	15	10		60		+		+	
5	19	j1-2	MEREY-VIEILLEY	881 745	2 265 700	3.89		20	20	20	30	10		+		+	
1	20	l4	AUDEUX	867 623	2 256 721	5.06		35	25	5	20	15		+		+	
9	20	l4	FONTAIN	880 105	2 251 872	4.60		35	35	15	15			+			
17	20	l4	FRASNOIS	870 110	2 254 353	2.93		25	35	15	25			+		+	
14	21	l1-3	CHAVANNE [2]	924 600	2 292 802	4.77		50	10	20	20						+
15	23	t5-6	ECHENANS [2]	932 065	2 299 419	3.56	5	60		20	15						

[2] = commune située en Haute-Saône, à proximité du département du Doubs

I/S R1 = interstratifiés illite/smectite riches en feuillets illitiques
I/S R0 = interstratifiés illite/smectite riches en feuillets smectitiques assimilables aux smectites
Chl/Sm = interstratifiés chlorite/smectite
+ peu abondant **++** abondant **+++** très abondant

Tableau des résultats des valeurs au bleu de méthylène (Vb) et des analyses minéralogiques par diffractométrie aux rayons X des 18 échantillons classés par ordre stratigraphique

Annexe 4 - Sinistres localisés et communes reconnues en état de catastrophe naturelle

Communes reconnues en état de catastrophe naturelle au titre des mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols et sinistres recensés dans le cadre de l'étude (données actualisées au 1er juin 2009) :

- Nombre de sinistres localisés par commune

- Communes reconnues en état de catastrophe naturelle « sécheresse », dates des arrêtés et de leurs parutions au Journal Officiel

- Liste des sinistres localisés et formations géologiques concernées

Nombre de sinistres localisés sur 34 communes des 594 communes du département du Doubs

	INSEE	Commune	Nombre de sinistres localisés	Reconnaissance CatNat
1	25020	ARBOUANS	1	
2	25027	ARGUEL	3	
3	25039	AVOUDREY	1	
4	25048	BAVANS	2	OUI
5	25056	BESANCON	17	OUI
6	25072	BONNAL	1	
7	25076	BONNEVAUX-LE-PRIEURE	1	
8	25119	CHAMPVANS-LES-MOULINS	2	
9	25186	CUSSEY-SUR-L'OGNON	3	
10	25189	DAMMARTIN-LES-TEMPLIERS	4	
11	25190	DAMPIERRE-LES-BOIS	1	
12	25207	DUNG	12	
13	25230	EXINCOURT	5	
14	25235	FERRIERES-LES-BOIS	1	
15	25280	GOUMOIS	1	
16	25326	LANTENNE-VERTIERE	1	
17	25336	LIESLE	2	OUI
18	25354	LUXIOL	4	
19	25371	MAZEROLLES-LE-SALIN	4	
20	25376	MEREY-VIEILLEY	2	
21	25381	MISEREY-SALINES	8	OUI
22	25382	MONCEY	3	
23	25388	MONTBELIARD	3	
24	25428	NOMMAY	2	
25	25431	ONANS	3	
26	25448	PELOUSEY	5	OUI
27	25454	PIREY	2	
28	25509	ROUTELLE	1	
29	25519	SAINT-HIPPOLYTE	1	
30	25542	SERRE-LES-SAPINS	1	OUI
31	25551	SOULCE-CERNAY	1	
32	25587	VAUCHAMPS	1	
33	25614	VIEUX-CHARMONT	1	
34	25622	VILLERS-BUZON	3	

Reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle au titre des mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols pour 10 communes du département du Doubs *(données prim.net)*

		Période de sécheresse			
Insee	Commune	Date de début	Date de fin	Date de l'arrêté interministériel	Date de publication au journal officiel
25048	Bavans	01/07/2003	30/09/2003	06/02/2006	14/02/2006
25055	Berthelange	01/07/2003	30/09/2003	06/02/2006	14/02/2006
25056	Besançon	01/07/2003	30/09/2003	05/05/2006	14/05/2006
25098	Buffard	01/07/2003	30/09/2003	06/02/2006	14/02/2006
25336	Liesle	01/07/2003	30/09/2003	06/02/2006	14/02/2006
25381	Miserey-Salines	01/07/2003	30/09/2003	06/02/2006	14/02/2006
25410	Morre	01/07/2003	30/09/2003	06/02/2006	14/02/2006
25448	Pelousey	01/07/2003	30/09/2003	06/02/2006	14/02/2006
25467	Pouilley-les-Vignes	01/07/2003	30/09/2003	15/01/2007	25/01/2007
25542	Serre-les-Sapins	01/07/2003	30/09/2003	06/02/2006	14/02/2006

Liste des 103 sinistres localisés classés par communes et formations argileuses concernées

	Commune	ID	X_L2E	Y_L2E	Formation argileuse concernée
1	ARBOUANS	26	936 229	2 286 447	08 - (R) - Argiles résiduelles d'altération
2	ARGUEL	62	877 805	2 250 767	21 - (l1-3) - Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien
3		63	877 696	2 250 567	21 - (l1-3) - Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien
4		64	877 830	2 250 822	21 - (l1-3) - Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien
5	AVOUDREY	69	910 776	2 245 630	08 - (R) - Argiles résiduelles d'altération
6	BAVANS	20	932 896	2 285 346	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
7		21	930 943	2 285 814	17 - (j4) - Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée (Callovien)
8	BESANCON	10	874 376	2 252 611	08 - (R) - Argiles résiduelles d'altération
9		14	878 743	2 257 492	08 - (R) - Argiles résiduelles d'altération
10		16	876 942	2 254 211	08 - (R) - Argiles résiduelles d'altération
11		19	877 897	2 256 424	08 - (R) - Argiles résiduelles d'altération
12		8	880 161	2 258 469	08 - (R) - Argiles résiduelles d'altération
13		11	878 054	2 253 425	08 - (R) - Argiles résiduelles d'altération
14		5	881 177	2 256 167	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
15		17	880 185	2 256 068	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
16		15	881 197	2 256 297	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
17		4	880 267	2 256 203	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
18		6	880 014	2 256 185	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
19		7	881 143	2 256 987	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
20		12	879 937	2 255 789	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
21		18	880 803	2 257 675	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
22		3	878 142	2 256 015	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
23		13	877 756	2 255 980	17 - (j4) - Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée (Callovien)
24		9	878 190	2 256 301	17 - (j4) - Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée (Callovien)
25	BONNAL	95	902 793	2 286 076	03 - (Fx-y) - Alluvions anciennes
26	BONNEVAUX-LE-PRIEURE	94	890 564	2 244 167	14 - (j5-6) - Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien-Kimméridgien)
27	CHAMPVANS-LES-MOULINS	39	870 677	2 256 748	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
28		38	870 781	2 256 713	22 - (t7b) - Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)
29	CUSSEY-SUR-L'OGNON	96	872 008	2 265 960	09 - (p-IV SC) -Sables et cailloutis plio-quat. (équiv. Form. sup. Forêt de Chaux)
30		98	872 206	2 265 963	09 - (p-IV SC) -Sables et cailloutis plio-quat. (équiv. Form. sup. Forêt de Chaux)
31		97	872 201	2 265 975	09 - (p-IV SC) -Sables et cailloutis plio-quat. (équiv. Form. sup. Forêt de Chaux)
32	DAMMARTIN-LES-TEMPLIERS	66	897 330	2 262 262	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
33		67	897 223	2 262 116	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
34		68	897 343	2 262 535	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
35		65	896 904	2 262 041	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
36	DAMPIERRE-LES-BOIS	34	944 011	2 288 409	05 - (OE) - Recouvrement limoneux
37	DUNG	47	932 651	2 287 269	01 - (Fz) - Alluvions récentes
38		54	932 345	2 287 680	14 - (j5-6) - Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien-Kimméridgien)
39		46	932 192	2 287 262	14 - (j5-6) - Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien-Kimméridgien)
40		49	932 038	2 287 654	14 - (j5-6) - Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien-Kimméridgien)
41		50	932 147	2 287 533	14 - (j5-6) - Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien-Kimméridgien)
42		51	932 132	2 287 243	14 - (j5-6) - Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien-Kimméridgien)
43		52	932 201	2 287 454	14 - (j5-6) - Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien-Kimméridgien)
44		53	932 223	2 287 505	14 - (j5-6) - Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien-Kimméridgien)
45		55	931 973	2 287 639	14 - (j5-6) - Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien-Kimméridgien)
46		56	932 283	2 287 656	14 - (j5-6) - Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien-Kimméridgien)
47		57	931 945	2 287 566	14 - (j5-6) - Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien-Kimméridgien)
48		48	932 173	2 287 458	14 - (j5-6) - Calcaires et marnes argileux et gréseux (Oxfordien-Kimméridgien)
49	EXINCOURT	90	938 254	2 286 726	01 - (Fz) - Alluvions récentes
50		92	938 114	2 286 667	01 - (Fz) - Alluvions récentes
51		89	938 372	2 287 022	01 - (Fz) - Alluvions récentes
52		88	938 383	2 287 727	08 - (R) - Argiles résiduelles d'altération
53		91	937 848	2 286 974	10 - (e7-g1) - Marnes et calcaires lacustres (Eocène sup.-Oligocène)

Liste des 103 sinistres localisés classés par communes et formations argileuses concernées
(suite)

	Commune	ID	X_L2E	Y_L2E	Formation argileuse concernée
54	FERRIERES-LES-BOIS	22	862 495	2 250 818	19 - (j1-2) - Calc. à oolithes et marno-calc. à entroques de l'Aalénien au Bathonien
55	GOUMOIS	27	948 680	2 262 051	04 - (C) - Colluvions diverses
56	LANTENNE-VERTIERE	45	860 612	2 253 778	19 - (j1-2) - Calc. à oolithes et marno-calc. à entroques de l'Aalénien au Bathonien
57	LIESLE	30	863 713	2 234 301	01 - (Fz) - Alluvions récentes
58		29	863 416	2 233 403	01 - (Fz) - Alluvions récentes
59	LUXIOL	25	902 798	2 272 224	19 - (j1-2) - Calc. à oolithes et marno-calc. à entroques de l'Aalénien au Bathonien
60		103	902 471	2 271 785	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
61		24	903 262	2 272 315	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
62		23	903 063	2 272 325	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
63	MAZEROLLES-LE-SALIN	61	867 333	2 254 908	19 - (j1-2) - Calc. à oolithes et marno-calc. à entroques de l'Aalénien au Bathonien
64		58	867 443	2 255 017	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
65		59	867 288	2 254 984	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
66		60	867 534	2 254 824	22 - (t7b) - Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)
67	MEREY-VIEILLEY	75	881 526	2 265 887	19 - (j1-2) - Calc. à oolithes et marno-calc. à entroques de l'Aalénien au Bathonien
68		74	881 558	2 265 742	19 - (j1-2) - Calc. à oolithes et marno-calc. à entroques de l'Aalénien au Bathonien
69	MISEREY-SALINES	77	875 635	2 260 594	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
70		78	875 685	2 260 586	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
71		79	875 667	2 260 566	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
72		80	875 701	2 260 627	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
73		81	875 367	2 260 543	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
74		82	875 355	2 259 897	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
75		76	875 482	2 260 587	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
76		83	874 879	2 260 123	22 - (t7b) - Marnes et grès micacés, Marnes de Levallois (Rhétien)
77	MONCEY	73	885 079	2 268 968	03 - (Fx-y) - Alluvions anciennes
78		71	886 230	2 269 719	03 - (Fx-y) - Alluvions anciennes
79		72	886 195	2 269 774	03 - (Fx-y) - Alluvions anciennes
80	MONTBELIARD	100	935 852	2 288 244	01 - (Fz) - Alluvions récentes
81		101	934 810	2 287 585	08 - (R) - Argiles résiduelles d'altération
82		99	936 596	2 287 439	13 - (j6b) - Marnes et calcaires à Exogyra virgula (Oxfordien sup. - Kim.)
83	NOMMAY	36	939 193	2 291 905	04 - (C) - Colluvions diverses
84		37	938 808	2 291 427	04 - (C) - Colluvions diverses
85	ONANS	86	921 769	2 286 955	01 - (Fz) - Alluvions récentes
86		85	921 881	2 286 947	17 - (j4) - Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée (Callovien)
87		87	921 872	2 286 614	17 - (j4) - Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée (Callovien)
88	PELOUSEY	41	872 495	2 259 478	19 - (j1-2) - Calc. à oolithes et marno-calc. à entroques de l'Aalénien au Bathonien
89		40	872 453	2 259 445	19 - (j1-2) - Calc. à oolithes et marno-calc. à entroques de l'Aalénien au Bathonien
90		42	870 449	2 258 635	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
91		44	870 762	2 259 265	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
92		43	871 256	2 258 706	21 - (l1-3) - Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien
93	PIREY	1	873 953	2 257 064	19 - (j1-2) - Calc. à oolithes et marno-calc. à entroques de l'Aalénien au Bathonien
94		2	873 999	2 257 064	19 - (j1-2) - Calc. à oolithes et marno-calc. à entroques de l'Aalénien au Bathonien
95	ROUTELLE	70	866 558	2 246 934	16 - (j5) - Marnes bleues à ammonites (Oxfordien)
96	SAINT-HIPPOLYTE	102	938 325	2 267 976	04 - (C) - Colluvions diverses
97	SERRE-LES-SAPINS	35	871 554	2 255 129	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
98	SOULCE-CERNAY	84	941 038	2 267 919	01 - (Fz) - Alluvions récentes
99	VAUCHAMPS	93	895 080	2 259 866	15 - (j4-5) - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques (Callovien-Oxfordien)
100	VIEUX-CHARMONT	28	938 875	2 290 240	10 - (e7-g1) - Marnes et calcaires lacustres (Eocène sup.-Oligocène)
101	VILLERS-BUZON	33	866 522	2 253 751	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
102		31	866 350	2 253 656	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)
103		32	866 484	2 253 772	20 - (l4) - Marnes micacées et "schistes cartons" (Toarcien)

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

Service Risques Naturels et stockage du CO_2
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

TERRITOIRE-DE-BELFORT

MONTBELIARD

HAUTE-SAONE

N
W E
S

0 5 km 10 km

BESANCON

SUISSE

PONTARLIER

JURA

Formations argileuses et marneuses

- Fz - Alluvions récentes
- FzL-T - Alluvions lacustres et tourbeuses
- Fx-y - Alluvions anciennes
- C - Colluvions diverses
- OE - Recouvrement limoneux
- FG - Formations fluvio-glaciaires du Pléistocène
- Gx-y - Moraines rissiennes ou würmiennes
- R - Argiles résiduelles d'altération
- p-lV SC - Sables et cailloutis plio-quaternaires (équival. de la Formation sup. de la Forêt de Chaux)
- e7-g1 - Marnes et calcaires lacustres de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène
- n5-6 - Sables verts glauconieux et marnes foncées de l'Aptien-Albien
- n1-3 - Marnes et calcaires du Crétacé inférieur
- j6b - Marnes et calcaires à Exogyra virgula de l'Oxfordien sup. et Kimméridgien
- j5-6 - Calcaires et marnes argileux et gréseux de l'Oxfordien et Kimméridgien
- j4-5 - Marnes et marno-calcaires, calcaires hydrauliques du Callovien à l'Oxfordien
- j5 - Marnes bleues à ammonites de l'Oxfordien
- j4 - Marnes et calcaires argileux, lumachelles et Dalle nacrée du Callovien
- j2-3 - Complexe marno-calcaire du Bajocien supérieur au Bathonien
- j1-2 - Calcaires à oolithes et marno-calcaires à entroques du Jurassique moyen
- l4 - Marnes micacées et "schistes cartons" du Toarcien
- l1-3 - Faciès marneux de l'Hettangien au Pliensbachien
- t7b - Marnes et grès micacés du Rhétien, Marnes de Levallois
- t6-7 - Marnes irisées et dolomies du Keuper

Limite de commune

Carte 1

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

Carte départementale synthétique des formations argileuses et marneuses

échelle 1/125 000

BRGM/RP-57338-FR
septembre 2009

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Direction départementale de l'Équipement et de l'Agriculture
Doubs

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
PRÉFECTURE DE RÉGION FRANCHE-COMTÉ
PRÉFECTURE DU DOUBS

Géosciences pour une Terre durable
brgm

TERRITOIRE-DE-BELFORT

HAUTE-SAONE

MONTBELIARD

BESANCON

SUISSE

PONTARLIER

JURA

N
W E
S

0 5 km 10 km

LÉGENDE

Zone de susceptibilité au retrait-gonflement :

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

Carte 2

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

Carte départementale de susceptibilité au retrait-gonflement des sols argileux

échelle 1/125 000

BRGM/RP-57338-FR
septembre 2009

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Direction départementale de l'Équipement et de l'Agriculture
Doubs

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
PRÉFECTURE DE RÉGION FRANCHE-COMTÉ
PRÉFECTURE DU DOUBS

Géosciences pour une Terre durable
brgm

TERRITOIRE-DE-BELFORT

HAUTE-SAONE

MONTBELIARD

BESANCON

PONTARLIER

SUISSE

JURA

N
W E
S

0 5 km 10 km

LÉGENDE

Zone d'aléa retrait-gonflement :

- Aléa moyen
- Aléa faible
- Zone a priori non argileuse, non sujette au phénomène de retrait-gonflement sauf en cas de lentille ou de placage argileux local non repéré sur les cartes géologiques actuelles
- Sinistre attribué au retrait-gonflement des argiles
- Zones bâties (données BD-Topo IGN ©)
- Limite de commune

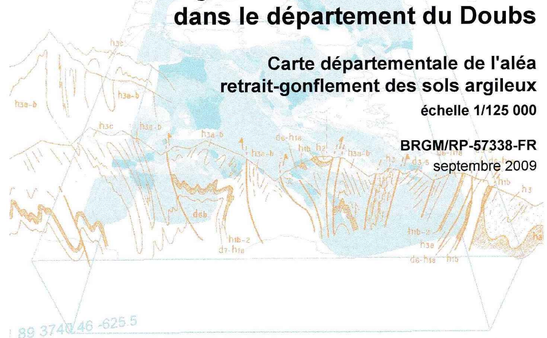
Carte 3

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

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

échelle 1/125 000

BRGM/RP-57338-FR
septembre 2009



Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer
Direction départementale de l'Équipement et de l'Agriculture Doubs
Préfecture de Région Franche-Comté – Préfecture du Doubs
brgm Géosciences pour une Terre durable