

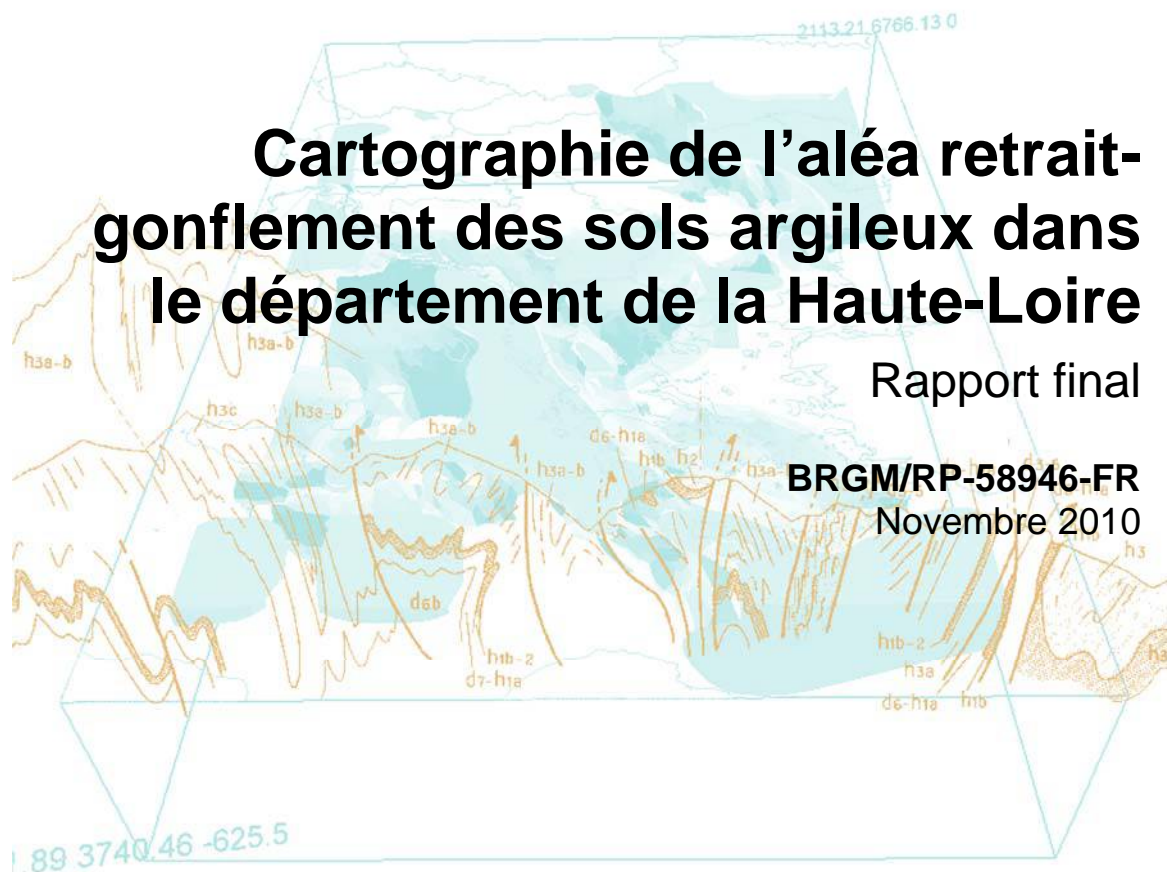


Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Haute-Loire

Rapport final

BRGM/RP-58946-FR

Novembre 2010



Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Haute-Loire

Rapport final

BRGM/RP-58946-FR

Novembre 2010

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 07RISD10

M. Saint martin

Avec la collaboration de

P. Rocher et K. Lechat

Vérificateur :

Nom : Sylvestre LE ROY

Date : 16/11/2010

Signature :



Approbateur :

Nom : Yves SIMEON

Date : 22/11/2010

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008



Mots clés : argiles, marnes, argiles gonflantes, smectites, retrait-gonflement, aléa, risque naturel, sinistre sécheresse, catastrophe naturelle, géotechnique, cartographie, Haute-Loire, Auvergne.

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

Saint Martin M., Rocher P., Lechat K. (2010) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Haute-Loire. Rapport BRGM/RP-58946-FR, 141 p., 42 ill., 6 ann., 3 cartes h.-t.

Synthèse

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

La Haute-Loire fait partie des départements français faiblement touchés par le phénomène, puisque 384 sinistres imputés à la sécheresse y ont été recensés dans le cadre de la présente étude. D'après la base Gaspar, à la date du 20 juillet 2010, 28 communes sur les 260 que compte le département ont été reconnues en état de catastrophe naturelle pour ce phénomène, pour des périodes comprises entre janvier 1995 et septembre 2003, soit un taux de sinistralité de 10,77 %. Le département de la Haute-Loire se classe ainsi à la 58^{ème} place en terme de nombre total d'occurrences (arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle en distinguant par communes et par périodes). En juin 2010, le coût des sinistres dus à la sécheresse, indemnisés en France depuis 1989 au titre du régime des catastrophes naturelles, a été évalué par la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) à 4,5 milliards d'euros, dont 7 417 k€ (estimation de septembre 2008 en coûts actualisés) pour le seul département de la Haute-Loire, ce qui en fait le 48^{ème} département touché en terme de coûts d'indemnisation versée dans ce cadre.

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 de la Haute-Loire, dans le but de délimiter les zones les plus exposées au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux. Cette étude, réalisée par le BRGM dans le cadre de sa mission de Service public sur les risques naturels, s'intègre dans un programme national de cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux qui concernera à terme l'ensemble du territoire métropolitain.

L'étude a été conduite par le Service Géologique Régional Auvergne du BRGM, en collaboration avec son service Risques Naturels et Sécurité du stockage du CO₂ (unité Risques de mouvements de terrain et érosion). Le financement en a été assuré à hauteur de 75 % par le Fonds national de prévention des risques naturels majeurs, le complément ayant été financé par la dotation de Service public du BRGM, dans le cadre d'une convention de cofinancement signée avec la Préfecture de la Haute-Loire.

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 neuf formations ainsi identifiées et cartographiées ont ensuite fait l'objet d'une

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

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

Sur cette carte, les zones d'affleurement des formations à dominante argileuse ou marneuse sont caractérisées par trois niveaux d'aléa (fort, moyen et faible) en appliquant au département de la Haute-Loire la méthodologie mise au point au niveau national :

- 2,67 % de cette surface est ainsi classée en aléa fort ;
- 8,84 % est caractérisée par aléa moyen ;
- 8,00 % par un aléa faible ;
- 80,50 % correspond à des zones *a priori* non concernées par le phénomène.

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

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

Sommaire

1. Introduction	11
2. Méthodologie	13
2.1. FACTEURS INTERVENANT DANS LE RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES	13
2.1.1. Facteurs de prédisposition	14
2.1.2. Facteurs de déclenchement	17
2.2. MÉTHODOLOGIE.....	19
2.2.1. Cartographie des formations argileuses ou marneuses	19
2.2.2. Caractérisation lithologique, minéralogique et géotechnique des formations.....	19
2.2.3. Examen des autres facteurs de prédisposition et de déclenchement	20
2.2.4. Carte de susceptibilité	20
2.2.5. Recensement et localisation géographique des sinistres.....	21
2.2.6. Détermination des densités de sinistres	21
2.2.7. Carte d'aléa	22
3. Présentation du département de la Haute-Loire	23
3.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE.....	23
3.2. CONTEXTE CLIMATIQUE	24
4. Identification et cartographie des formations géologiques à composante argilo-marneuse	27
4.1. DOCUMENTS ET MÉTHODOLOGIE UTILISÉS.....	27
4.1.1. Méthode utilisée	27
4.1.2. Établissement de la carte des formations argileuses au sens large.....	28
4.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE	29
4.2.1. Contexte régional	29
4.2.2. Spécificités départementales.....	31
4.2.3. Les dépôts quaternaires	35
4.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE.....	35

4.4. LITHOSTRATIGRAPHIE DES FORMATIONS ARGILEUSES AU SENS LARGE	39
4.4.2. Les formations continentales tertiaires.....	42
4.4.3. Autres formations continentales.....	44
4.5. REMARQUES SUR LES FORMATIONS NON ARGILEUSES	46
5. Caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique des formations retenues	47
5.1. CRITÈRES DE HIÉRARCHISATION	47
5.1.1. Critères retenus.....	47
5.1.2. Méthode de classification.....	47
5.2. CRITÈRE LITHOLOGIQUE.....	48
5.2.1. Définition du critère lithologique et barème	48
5.2.2. Caractérisation lithologique.....	49
5.3. CRITÈRE MINÉRALOGIQUE	49
5.3.1. Définition du critère minéralogique et barème	49
5.3.2. Caractérisation minéralogique	50
5.4. CRITÈRE GÉOTECHNIQUE	56
5.4.1. Définition du critère géotechnique et barème	56
5.4.2. Teneur en eau (Wn).....	57
5.4.3. Indice de plasticité (Ip)	57
5.4.4. Essais au bleu de méthylène (Vb)	58
5.4.5. Retrait linéaire (RI)	58
5.4.6. Coefficient de gonflement (Cg)	59
5.4.7. Caractérisation géotechnique	60
6. Élaboration de la carte de susceptibilité.....	63
6.1. DÉTERMINATION DU DEGRÉ DE SUSCEPTIBILITÉ.....	63
6.2. SYNTHÈSE	64
6.3. CARTE DE SUSCEPTIBILITÉ	64
7. Analyse de la sinistralité	67
7.1. RECONNAISSANCE DE L'ÉTAT DE CATASTROPHE NATURELLE.....	67
7.1.1. Procédure de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle	67
7.1.2. Identification des communes reconnues CatNat dans la Haute-Loire	68

7.2. PROCEDURE EXCEPTIONNELLE	69
7.3. COLLECTE DES DONNÉES DE SINISTRES	70
7.4. ANALYSE DE LA SINISTRALITE DANS LE DEPARTEMENT	71
7.4.1. Périodes de sinistralité	71
7.4.2. Répartition de la sinistralité	72
7.5. FRÉQUENCE D'OCCURRENCE RAPPORTÉE A LA SURFACE BATIE	74
7.5.1. Détermination de la densité d'urbanisation par formation	75
7.5.2. Détermination du critère densité de sinistres	76
8. Carte d'aléa	79
8.1. DÉTERMINATION DU NIVEAU D'ALÉA	79
8.2. CARTE D'ALÉA	81
8.3. COHERENCE AVEC LES DEPARTEMENTS LIMITROPHES	82
9. Conclusion	85
10. Bibliographie	87

Liste des illustrations

Illustration 1 – Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche	13
Illustration 2 – Localisation du département de la Haute-Loire en France	23
Illustration 3 - Le département de la Haute-Loire et ses principales communes (image extraite du site internet www.1france.fr)	24
Illustration 4 – Caractéristiques climatiques de la station Météo-France du Puy-Chadrac (données Météo-France, site http://france.meteofrance.com)	25
Illustration 5 – Carte géologique simplifiée du département de la Haute-Loire et tableau d'assemblage des cartes géologiques à 1/50 000 (extrait de la carte géologique de France au millionième)	28
Illustration 6 - Carte géologique simplifiée de l'Auvergne (BRGM)	30
Illustration 7 – Carte des ensembles volcaniques du département de la Haute-Loire	33
Illustration 8 - Cartographie des entités hydrogéologiques du département de la Haute-Loire (Bertin, 2007)	35
Illustration 9 – Carte des formations argileuses et marneuses de la Haute-Loire	40
Illustration 10 – Répartition de alluvions, tourbières et formations associées [F]	41

Illustration 11 - Répartition de la formation des alluvions et dépôts fluvio-lacustres [Farg]	41
Illustration 12 – Répartition des formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers [C].....	42
Illustration 13 – Répartition de la formation des produits in situ d'altération météorique - arènes granitiques [A].....	43
Illustration 14 - Répartition des formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène) [e-m]	43
Illustration 15 - Répartition des formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène) [P-B].....	44
Illustration 16 - Répartition des formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène) [e-g]	45
Illustration 17 - Répartition des dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épicastiques (Miocène à Pléistocène) [Lv]	45
Illustration 18 - Répartition des formations continentales paléozoïques (Stéphanien) [h]	46
Illustration 19 – Barème utilisé pour la notation lithologique	48
Illustration 20 - Note lithologique des formations argileuses retenues.....	49
Illustration 21 - Hiérarchisation des formations en fonction du pourcentage de minéraux gonflants	50
Illustration 22 - Données minéralogiques et notation attribuée aux formations à composante argileuse	55
Illustration 23 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de l'indice de plasticité de la formation	58
Illustration 24 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la valeur au bleu de méthylène de la formation.....	58
Illustration 25 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du retrait linéaire de la formation	59
Illustration 26 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du coefficient de gonflement de la formation.....	59
Illustration 27 - Répartition du nombre de données géotechniques selon leur origine	60
Illustration 28 - Synthèse des données géotechniques exploitées et note géotechnique attribuée.....	61
Illustration 29 – Barème d'attribution d'un niveau de susceptibilité d'une formation argileuse	63
Illustration 30 - Susceptibilité des formations argileuses retenues	63
Illustration 31 – Superficie des formations par niveau de susceptibilité.....	64
Illustration 32 - Carte de susceptibilité au retrait-gonflement dans le département de la Haute-Loire	65
Illustration 33 - Arrêtés interministériels et occurrences.....	69
Illustration 34 - Nombre de sinistres recensés hors communes reconnues CATNAT	71

Illustration 35 - Communes concernées par des arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse et nombre de sinistres recensés et localisés	72
Illustration 36 – Répartition géologique des sinistres localisés.....	73
Illustration 37 – Carte des zones bâties sur le département de la Haute-Loire (source des données : BDTopo IGN).....	75
Illustration 38 - Sinistralité et notes de densité de sinistres	76
Illustration 39 – Niveau d'aléa des formations	80
Illustration 40 - Classement des formations en fonction de leur niveau d'aléa.....	80
Illustration 41 – Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement de la Haute-Loire	81
Illustration 42 - Juxtaposition des cartes d'aléa limitrophes de la Haute-Loire.....	82

Liste des annexes

Annexe 1 - Rappels sur le mécanisme de retrait-gonflement des argiles	95
Annexe 2 - Regroupement des formations harmonisées retenues pour chaque formation argileuse.....	99
Annexe 3 - Sinistres localisés et communes reconnues en état de catastrophe naturelle	105
Annexe 4 - Liste et coordonnées des bureaux d'étude et organismes ayant fourni des données géotechniques.....	119
Annexe 5 - Résultats d'analyses des 19 échantillons prélevés pour la minéralogie <i>RAPPORT D'ESSAIS 10-6-029-A</i>	123
Annexe 6 - Résultats d'analyses des valeurs au bleu des 19 échantillons <i>RAPPORT D'ESSAIS N° 10-6-029-B</i>	139

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

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

1. Introduction

Les phénomènes de retrait-gonflement de certains sols argileux provoquent des tassements différentiels qui se manifestent par des désordres affectant 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 en dessous de laquelle les déformations dues au phénomène de retrait-gonflement deviennent peu significatives) 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 juin 2010, le coût des sinistres dus à la sécheresse, indemnisés en France depuis 1989 au titre du régime des catastrophes naturelles, a été évalué par la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) à 4,5 milliards d'euros, ce qui en fait la deuxième cause d'indemnisation, juste derrière les inondations.

La région Auvergne a été inégalement affectée par ce phénomène puisque qu'elle renferme deux des trente-cinq départements qui présentent les coûts d'indemnisation les plus élevés au niveau national (le Puy-de-Dôme, à la 7^{ème} place, et l'Allier à la 31^{ème} place).

Le département de la Haute-Loire a été peu touché par le phénomène : à la date du 1^{er} avril 2004, 35 communes sur les 260 que compte le département (source <http://macommune.prim.net/gaspar/>) ont ainsi été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle sécheresse pour des périodes comprises entre janvier 1995 et septembre 2003, soit un taux de sinistralité de 13,46 %.

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 éventuel de Plans de prévention des risques naturels prenant en compte l'aléa retrait-gonflement), aux communes, aux particuliers et surtout aux maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvre désireux de construire en zone sensible, afin qu'ils prennent, en connaissance de cause, les dispositions constructives qui s'imposent pour que le bâtiment ne soit pas affecté par des désordres ;
- élaboration d'un outil à l'usage des experts pour le diagnostic des futures déclarations de sinistres.

La présente étude a été conduite par avec le Service Géologique Régional Auvergne du BRGM, en collaboration avec son service Risques Naturels et Sécurité du stockage du CO₂ (unité Risques de mouvements de terrain et érosion). Le financement en a été assuré à hauteur de 75 % par le Fonds national de prévention des risques naturels majeurs, le complément ayant été financé par la dotation de Service public du BRGM, dans le cadre d'une convention de cofinancement signée avec la Préfecture de la Haute-Loire le 29 septembre 2006.

Cette étude s'intègre dans un programme national de cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux qui concerne désormais 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.

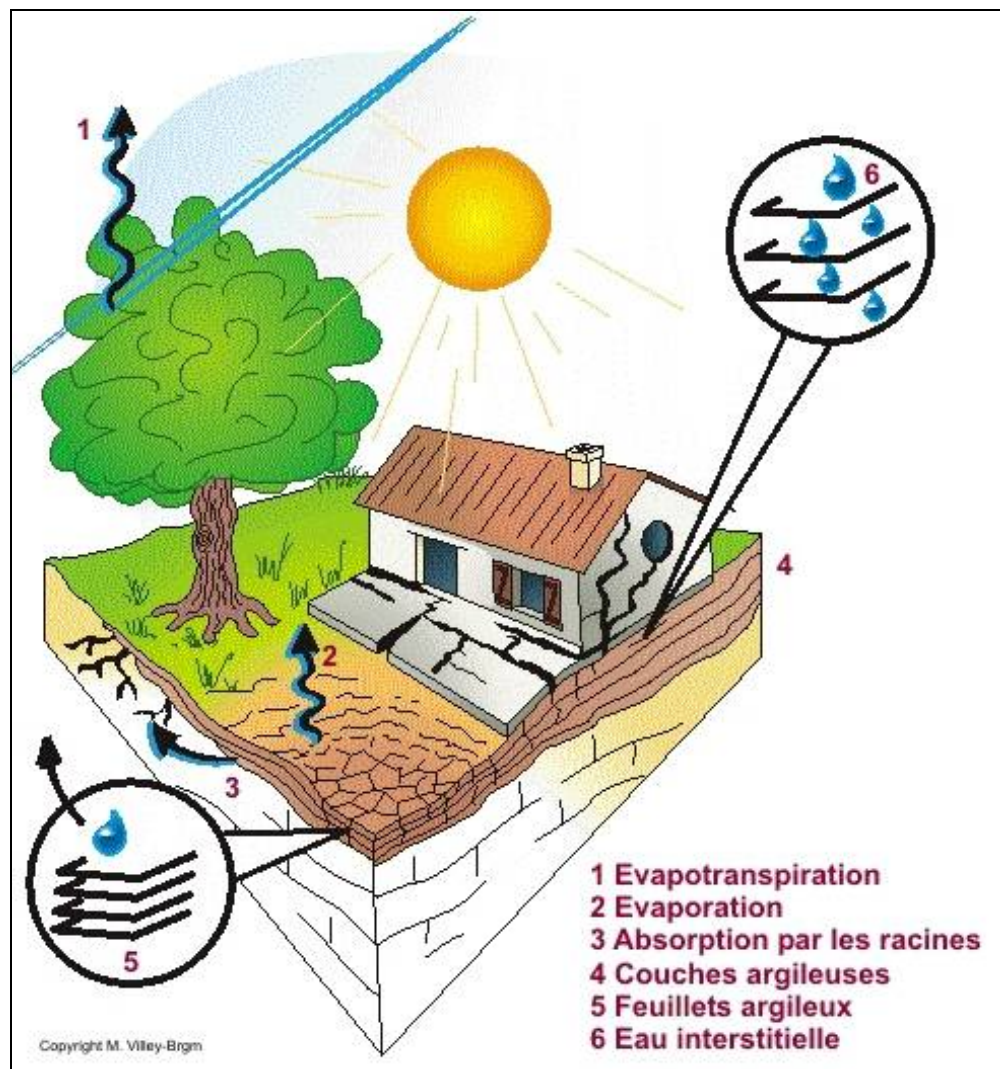


Illustration 1 – Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche

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.

Par exemple, dans le département de la Haute-Loire, certaines formations rhyolitiques sont susceptibles de s'altérer localement ce qui peut se traduire par la présence en surface de placages argileux généralement non identifiés sur les cartes géologiques, mais dont la seule présence suffirait 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 diagenétique (ensemble des processus qui affectent un dépôt sédimentaire initial pour le transformer en roche). On peut donc approcher cette connaissance par une reconstitution des conditions paléogéographiques ayant présidé à la mise en place des différentes formations (dépôt sédimentaire initial). De façon plus quantitative, mais dont la valeur n'est que ponctuelle, la connaissance de la composition minéralogique d'une formation argileuse se détermine directement par des analyses diffractométriques aux rayons X. On peut enfin caractériser, par des essais géotechniques en laboratoire, l'aptitude du matériau à absorber de l'eau, voire mesurer directement sa capacité de retrait ou de gonflement. Ces deux dernières approches (caractérisation minéralogique et évaluation du comportement géotechnique du matériau) présentent l'avantage majeur de fournir des résultats quantitatifs rigoureux, mais exigent un grand nombre de mesures pour caractériser de manière statistique le comportement de chacune des formations qui peuvent être par nature hétérogènes.

Contexte hydrogéologique

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

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

Géomorphologie

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

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

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

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

Végétation

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

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

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

Défauts de construction

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

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

2.1.2. Facteurs de déclenchement

Phénomènes climatiques

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

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

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

Facteurs anthropiques

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

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

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

2.2. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie de cartographie de l'aléa développée par le BRGM a été mise au point à partir d'études similaires menées d'abord dans le département des Alpes de Haute-Provence (Chassagneux *et al.*, 1995 ; Chassagneux *et al.*, 1996) et des Deux-Sèvres (Vincent *et al.*, 1998), puis dans l'Essonne (Prian *et al.*, 2000) et en Seine-Saint-Denis (Donsimoni *et al.*, 2001). Elle a été validée par le Ministère en charge de l'environnement et est désormais appliquée dans le cadre d'un programme qui concernera à terme l'ensemble du territoire métropolitain (Vincent *et al.*, 2008), ce qui permettra d'obtenir des résultats homogènes au niveau national. Les départements voisins de la Loire (Logeais *et al.*, 2009), de l'Ardèche (Plat *et al.*, 2009), de la Lozère (Colas *et al.*, 2010) et du Cantal (Saint Martin *et al.*, 2010) ont déjà fait l'objet d'une telle étude, alors que la cartographie de l'aléa dans le département du Puy-de-Dôme 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 ont fait l'objet d'un travail d'harmonisation préalable afin d'établir une carte géologique départementale harmonisée (Prognon *et al.*, 2009). Ont également été prises en compte des coupes de forage de la Banque des données du sous-sol (BSS) gérée par le BRGM, complétées et actualisées par quelques données ponctuelles issues des rapports d'expertise de sinistres ou d'études géotechniques locales.

Pour cela, toutes les formations argileuses ou marneuses du département, y compris les formations superficielles d'extension locale, ont été inventoriées puis cartographiées. Des regroupements ont été réalisés dans une seconde étape, en considérant que des natures lithologiques voisines laissent supposer des comportements semblables vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Cela a permis d'aboutir à la carte départementale synthétique des formations argileuses au sens large. Cette cartographie a été réalisée à l'échelle 1/50 000 (qui correspond donc à l'échelle de validité de la donnée brute), numérisée, puis synthétisée et présentée hors-texte à l'échelle 1/125 000.

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...) mais également à partir d'analyses laboratoire d'échantillons prélevés dans le département.

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 Préfecture et la Caisse Centrale de Réassurance ainsi que 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 384 sites de sinistres qui ont été localisés sur cartes topographiques de l'IGN à l'échelle 1/25 000. Ils sont répartis dans 35 communes (dont 28 ayant déjà fait l'objet d'une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle) et l'échantillon, bien que probablement non exhaustif, peut donc être considéré comme représentatif de l'occurrence spatiale du phénomène dans le département de la Haute-Loire.

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 BD Topo de l'IGN, mise à disposition par la DDT de la Haute-Loire dans le strict 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 BD Topo.

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

2.2.7. Carte d'aléa

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

3. Présentation du département de la Haute-Loire

3.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

Le département de la Haute-Loire, situé au centre-sud de la France, est un département de montagne essentiellement rural, dans lequel un actif sur sept est un agriculteur. Il s'agit cependant d'une agriculture peu intensive en raison de l'altitude et du climat (sur les 260 communes du département, 249 sont classées en totalité en zone montagne). Il est rattaché administrativement à la région Auvergne (Illustration 2). La Haute-Loire est localisée à l'extrême Sud-Est de la région et est limitrophe des départements du Puy-de-Dôme (région Auvergne), du Cantal (région Auvergne), de la Lozère (région Languedoc-Roussillon), de l'Ardèche (région Rhône-Alpes) et de la Loire (région Rhône-Alpes).



Illustration 2 – Localisation du département de la Haute-Loire en France

D'une superficie de 4 977 km², le département est divisé en 260 communes et 3 arrondissements. Le chef lieu est Le Puy-en-Velay et les deux sous-préfectures sont Brioude et Yssingeaux (Illustration 3). En 2007, la Haute-Loire comprenait 220 437 habitants (données INSEE - 2010) et présentait une densité de population de 44 hab./km², très inférieure à la moyenne nationale.

Située dans la partie orientale du Massif Central, entre les Monts de la Margeride et la bordure du Vivarais, la Haute-Loire est formée essentiellement de l'ancien Velay et, au Sud, de la Basse Auvergne, mais déborde également sur les limites du Vivarais, du Forez et du Gévaudan.

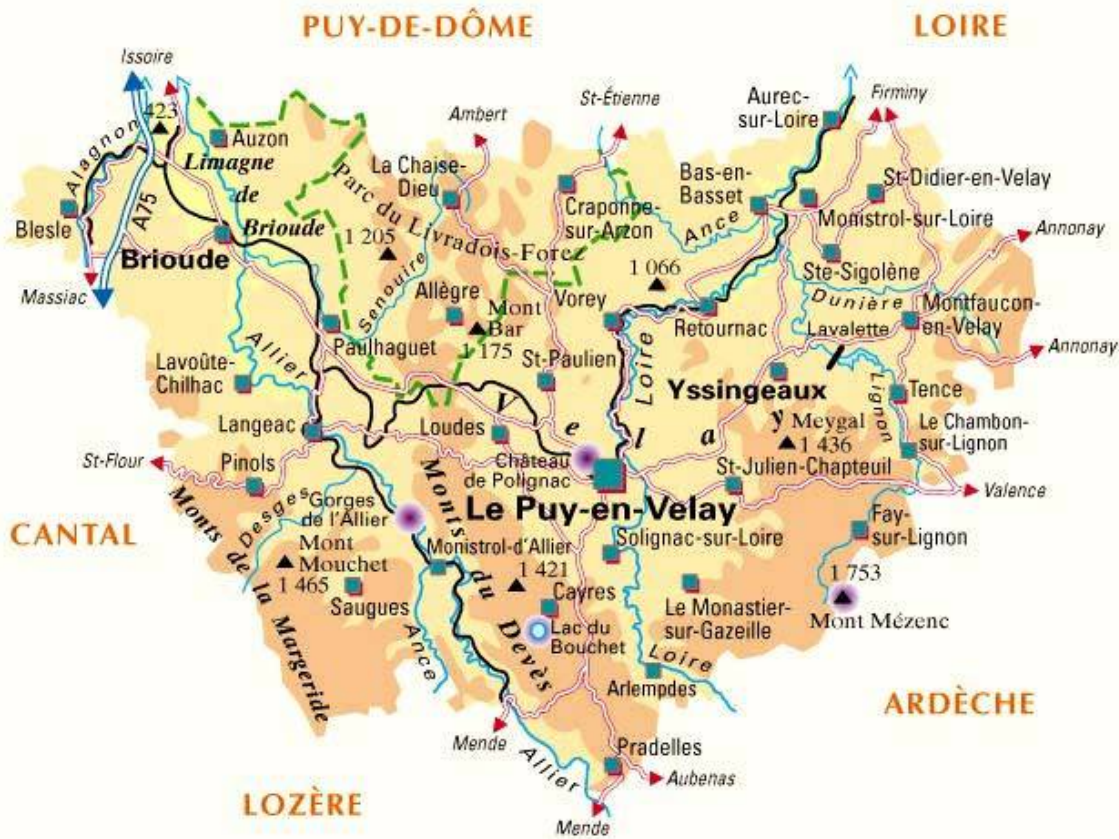


Illustration 3 - Le département de la Haute-Loire et ses principales communes (image extraite du site internet www.1france.fr)

D'un point de vue géologique, le département de la Haute-Loire recèle les différents types de roches (sédimentaires, volcaniques, métamorphiques et plutoniques), organisées au sein d'entités structurales le plus souvent de direction générale Nord-Ouest/Sud-Est.

3.2. CONTEXTE CLIMATIQUE

Alors qu'il est soumis, comme l'ensemble de l'hexagone, à la dominante atlantique, sa position à l'intérieur du Massif Central et la morphologie des bassins fermés confèrent au département un climat d'abri, ayant un relatif effet de continentalité. Bien que présentant des variations notables, sur des distances parfois courtes du fait de l'altitude (contraste saisissant entre la Ribeyre de Lavoûte-Chilhac, ensoleillée, et la

Margeride voisine, froide et pluvieuse), le climat est souvent frais en raison des altitudes élevées (les deux-tiers du territoire sont au-dessus de 800 m).

Les perturbations se déchargent sur les reliefs périphériques (Aubrac, Cantal et Sancy pour celles venant de l'océan ; Cévennes pour celles venant de la Méditerranée). Elles sont atténuées en arrivant sur la Haute-Loire, malgré de fréquents orages de mai à septembre et une certaine réactivation sur les massifs. Les cumuls pluviométriques, faibles à modérés, vont de moins de 600 mm/an en plaine et vallées (Brioude, Langeac, Le Puy, Monistrol-sur-Loire) à 1 200 mm en montagne (Mézenc, Margeride).

Les températures moyennes à 400 mètres d'altitude sont de + 3°C en janvier, + 19,5°C en juillet (le val d'Allier est le secteur le plus chaud). A 1 300 mètres, les températures sont de - 2°C en janvier, + 13°C en juillet, le massif du Mézenc étant le plus froid.

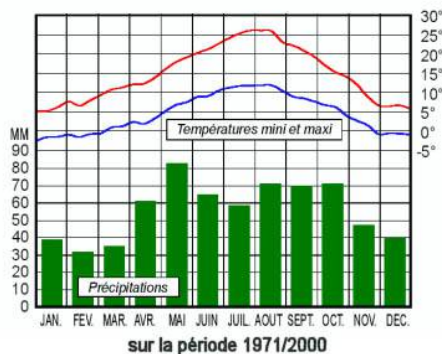
L'enneigement hivernal est plus régulier mais généralement moins abondant que dans les Cévennes ou à l'Ouest de l'Auvergne (la continentalité atténuée à la fois les précipitations et les redoux, donc les variations). La neige est fréquente à partir de novembre et tient au sol plusieurs mois par an au-dessus de 1 000 m. Le vent du Nord (Burle) crée une ambiance glaciale sur les hauts plateaux dénudés, soulevant la neige et l'accumulant en congères. La belle saison revient en mai, couvrant de verdure tout le département.

La végétation résume bien le climat de la Haute-Loire : le pin sylvestre, résistant au froid comme à la sécheresse, est l'arbre dominant des collines et plateaux. En montagne se trouvent hêtres et sapins : ils résistent mieux à la neige et sont plus exigeants en eau. Enfin, la présence de petites vignes dans les vallées témoigne de l'intense chaleur estivale. Certains villages, tels que Chilhac, possèdent en outre une flore d'affinité méditerranéenne, à laquelle s'ajoute des éléments exotiques largement naturalisés (cactus du genre *Opuntia*, communément appelés "figuiers de barbarie"). Tout cela affirmant la diversité qu'offre le département.

LE CLIMAT DE LA HAUTE-LOIRE



Normales de températures et de précipitations au Puy-Chadrac



Quelques records depuis 1961 au Puy-Chadrac

Température la plus basse	-22,7 °C
Jour le plus froid	05/01/1971
Année la plus froide	1963
Température la plus élevée	37,5 °C
Jour le plus chaud	22/07/1983
Année la plus chaude	1997
Hauteur maximale de pluie en 24h	79,1 mm
Jour le plus pluvieux	02/10/1973
Année la plus sèche	1997
Année la plus pluvieuse	1977

Illustration 4 – Caractéristiques climatiques de la station Météo-France du Puy-Chadrac (données Météo-France, site <http://france.meteofrance.com>)

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 de la Haute-Loire, afin d'identifier les zones sujettes au retrait-gonflement.

La première étape a consisté à cartographier, à partir de la carte géologique départementale harmonisée établie spécifiquement dans le cadre de la présente étude (Prognon *et al.*, 2009), 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 de la carte géologique harmonisée du département. Les cartes à 1/50 000, réalisées pour un grand nombre d'entre elles entre 1970 et 2000 (quatre d'entre-elles étant actuellement en cours de levé ou d'édition), avec une représentation répondant aux objectifs de l'époque, peuvent montrer localement des lacunes en ce qui concerne notamment les formations superficielles, et leur fiabilité ponctuelle est parfois limitée. Ces cartes ont été partiellement complétées par la consultation de la Banque des données du Sous-Sol (BSS), gérée par le BRGM dans le cadre de ses missions de Service public au titre de l'application du Code Minier, ainsi que d'études diverses, 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.

L'assemblage (Illustration 5) des cartes géologiques couvrant le département comporte tout ou partie des 20 coupures suivantes, dont les références détaillées figurent en fin de bibliographie : Besse-en-Chandesse (741), Saint-Germain-Lembron (742), Arlanc (743), Firminy (744), Saint-Etienne (745), Massiac (765), Brioude (766), Craponne-sur-Arzon (767), Monistrol-sur-Loire (768), Annonay (769), Langeac (790), Le Puy-en-Velay (791), Yssingeaux (792), Saint-Agrève (793), Saugues (814), Cayres (815), Le-Monastier-sur-Gazeille (816), Saint-Chély-d'Apcher (838), Langogne (839) et Burzet (840).

A 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 localement 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.

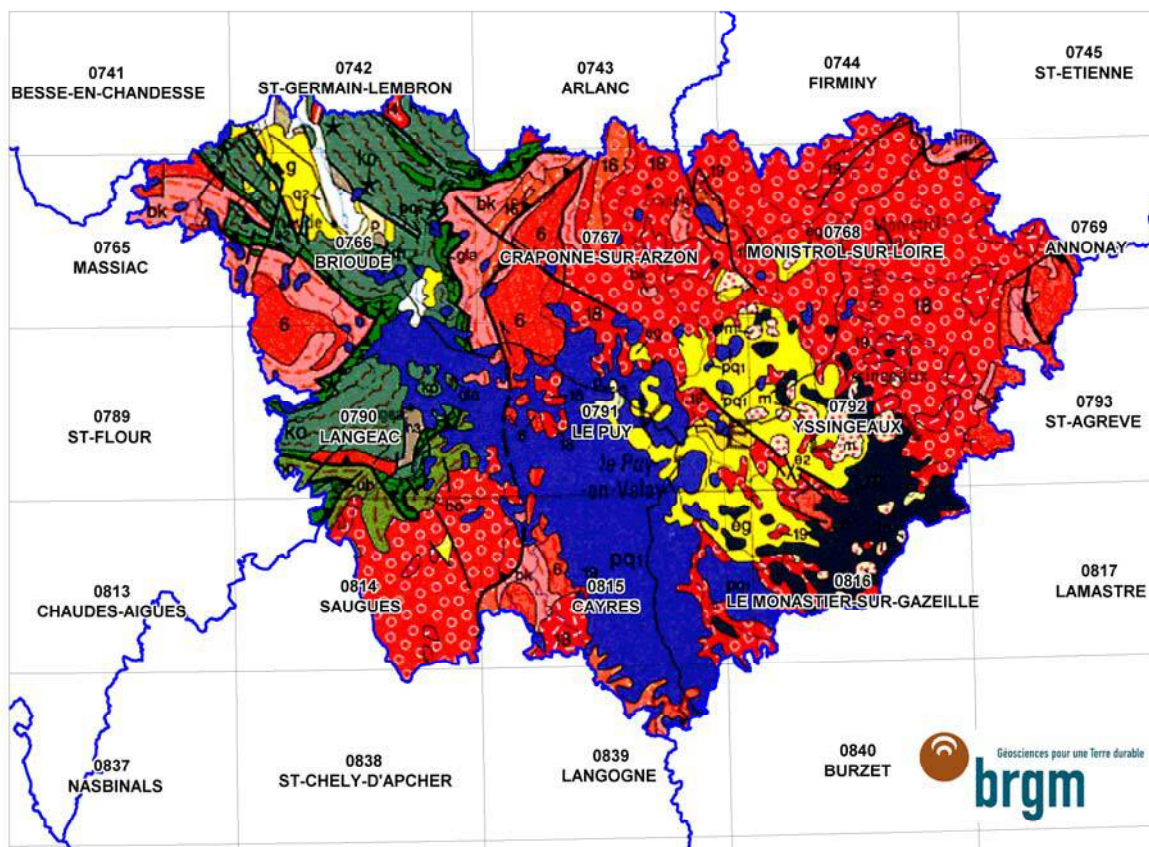


Illustration 5 – Carte géologique simplifiée du département de la Haute-Loire et tableau d'assemblage des cartes géologiques à 1/50 000 (extrait de la carte géologique de France au millionième)

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 "*Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène)*" qui présentent un faciès argileux sur l'essentiel de leur épaisseur. Mais, dans la grande majorité des cas, les formations géologiques argileuses ou marneuses du département de la Haute-Loire 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.

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 de la Haute-Loire 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. Neuf formations sont finalement retenues sur cette carte.

4.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

4.2.1. Contexte régional

L'Auvergne offre une grande diversité géologique (Illustration 6) issue d'une histoire longue et complexe sur plus de 400 millions d'années (Ma), avec plusieurs étapes successives.

La première étape correspond à l'ouverture d'un domaine océanique à l'emplacement actuel du Massif Central. Ce plancher océanique, il y a environ 400 Ma, s'enfonce sous la plaque européenne. L'intense métamorphisme qui en résulte produit des roches dont on retrouve des reliques dans plusieurs régions, notamment dans le Haut Allier.

Il y a environ 380 Ma, la fermeture de l'océan et la collision entre les plaques Afrique et Europe aboutissent à la formation de la chaîne hercynienne, et provoquent de vastes chevauchements des terrains ainsi qu'une intense déformation des roches. Les grands systèmes de failles, qui s'établissent vers 350 Ma, décalent horizontalement l'ensemble de ces terrains métamorphiques et favorisent la mise en place des premiers massifs granitiques.

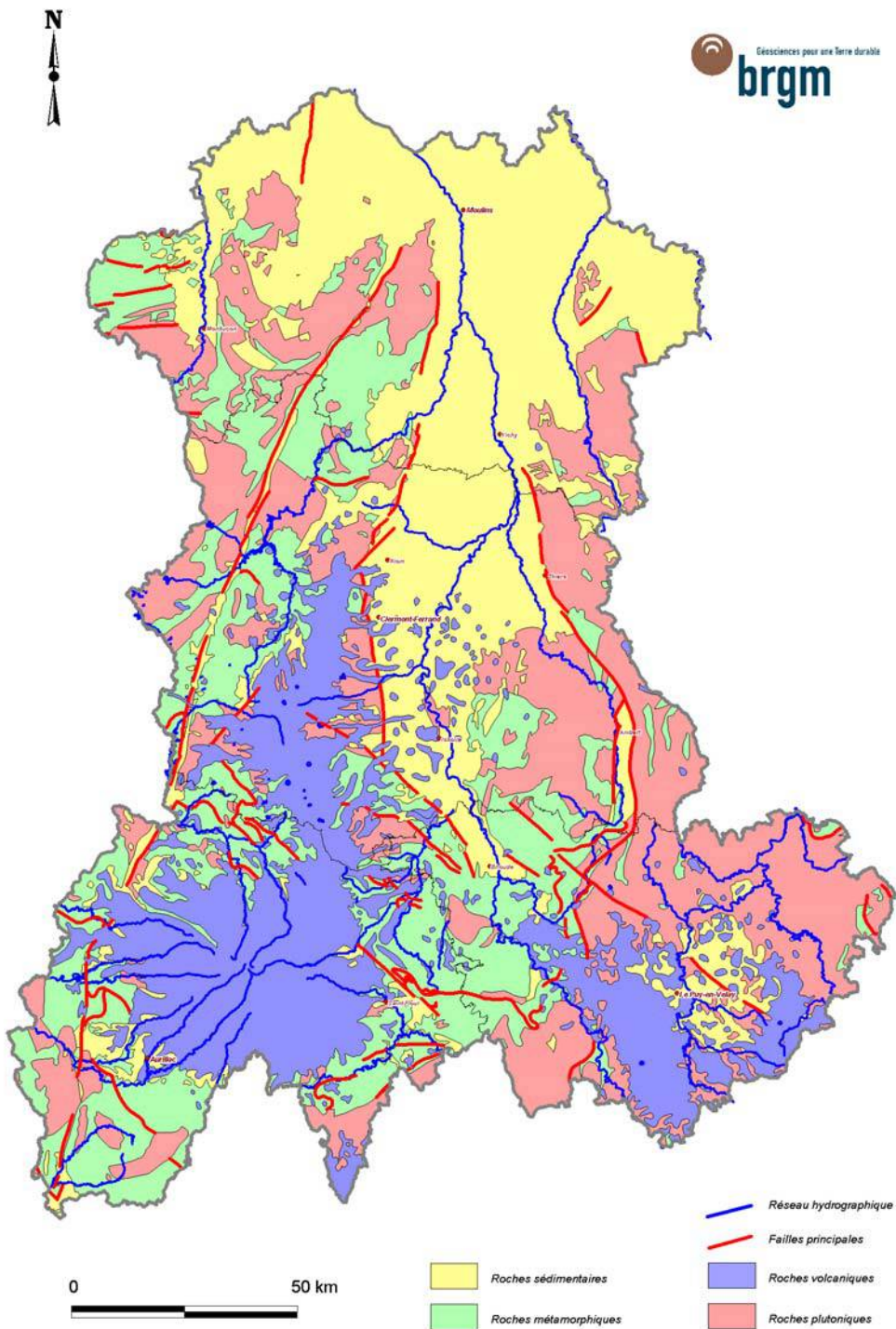


Illustration 6 - Carte géologique simplifiée de l'Auvergne (BRGM)

Cette chaîne est ensuite soumise à une forte érosion qui conduit au passage de l'ensemble des terrains sous le niveau de la mer. Dans les bassins, localisés le long des grandes fractures de l'écorce terrestre, s'accumulent des sédiments riches en débris végétaux, à l'origine des gisements de charbon.

A partir de 250 Ma (début de l'ère secondaire), le Massif central est progressivement envahi par la mer mais les formations sédimentaires qui s'y déposent sont très érodées au cœur du massif et ne subsistent à l'affleurement que dans les grands bassins périphériques. En région Auvergne, elles ne sont observables aujourd'hui que dans son extrémité nord (terminaison méridionale du Bassin de Paris, département de l'Allier).

A l'ère tertiaire, il y a 30 à 40 Ma, intervient un nouveau soulèvement général lié à la genèse des Alpes, s'accompagnant de la formation de grandes failles qui compartimentent le massif et délimitent des bassins d'effondrement. En Auvergne, il s'agit notamment des Limagnes (Limagne d'Allier décomposée, du Nord au Sud, en Limagne Bourbonnaise, grande Limagne, Limagne d'Issoire et de Brioude), des bassins du Cher (région de Montluçon), d'Ambert-Arlanc, d'Aurillac, de Saint-Flour et du Puy-en-Velay. Ces bassins sont le siège d'une sédimentation variée, lacustre ou marine, détritique à l'origine (produits de l'érosion) puis carbonatée, évaporitique et marneuse.

Les 15 derniers millions d'années de cette histoire sont marqués par la mise en place progressive des édifices volcaniques dans le Velay (Velay oriental et Devès), le Cantal (plus vaste stratovolcan d'Europe), l'Aubrac, le Cézallier, les Monts Dore / Sancy (stratovolcan composite) et la Chaîne des Puys. Un volcanisme de moindre importance ou plus dispersé voit également le jour dans le Forez, la vallée de la Sioule, les Limagnes et la Comté.

Les stades les plus récents de l'évolution géologique régionale sont caractérisés par l'érosion des principaux reliefs, processus à l'origine des dépôts glaciaires et périglaciaires en altitude, ainsi que d'alluvions dans les vallées, notamment celles du fleuve Loire et de la rivière Allier.

4.2.2. Spécificités départementales

Le substratum métamorphique et granitique

Il contient les principales unités suivantes, des plus anciennes aux plus récentes :

- **les gneiss du Haut Allier** (à biotite et sillimanite, à sillimanite et anatectiques) caractérisant un métamorphisme de pression et température intermédiaires, parfois associé à des conditions de fusion partielle des roches, marquant la collision des continents (entre 280 et 400 Ma) ;
- cette fusion génère, au Carbonifère, la formation de **magma mis en place sous forme de corps granitiques** de taille variable au sein de ces roches métamorphiques, ce qui est le cas par exemple du vaste complexe du granite de la Margeride, dans le Sud-Ouest du département, et de petits massifs comme celui de La Chaise-Dieu ;

- **le groupe leptyno-amphibolique** constitué à l'origine de roches magmatiques que le métamorphisme a transformées en amphibolites, auxquelles sont associées des péridotites serpentinisées, présents dans la partie nord-ouest du département ;
- **le massif granitique du Velay**, également d'âge carbonifère, rencontré dans l'Est du département, qui marque la dernière période de formation de la chaîne hercynienne et qui résulte d'une augmentation importante de la température de la croûte terrestre, provoquant la fusion des roches.

Ces différentes roches du socle métamorphique et plutonique ont été, à des degrés divers, affectées par une altération climatique parfois intense, à l'origine de la formation, sur des profondeurs pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres, d'horizons d'altération : altérites argileuses en surface et horizons fissurés sous-jacents. L'érosion les a localement préservés.

Les formations sédimentaires

Elles se répartissent en trois principaux ensembles : **les bassins de Langeac et de Sainte-Florine, le bassin du Puy-en-Velay et la Limagne de Brioude.**

Les mouvements extensifs de la croûte terrestre ont conduit à la formation, au Permo-Carbonifère, des bassins d'effondrement de Langeac et de Sainte-Florine dans lesquels vont s'accumuler les produits de destruction des reliefs et des produits issus du volcanisme associé. A côté des schistes houillers, les roches présentes sont des grès, des conglomérats, des coulées de laves et des projections volcaniques.

Les bassins tertiaires, formés consécutivement à l'orogénèse alpine, sont bien représentés dans le département de la Haute-Loire.

Le bassin du Puy-en-Velay est une structure tectonique orientée Nord-Ouest/Sud-Est comblée dans une première phase de sédiments paléogènes, essentiellement éocènes, de nature variée : grès et arkoses, sables, argiles, gypse, marnes et calcaires. Cette dépression a de plus, à la fin du Tertiaire et du Quaternaire, été le siège d'écoulements et d'apports fluviaux de la paléo-Loire et de ses affluents, à l'origine de dépôts de sables, argiles et matériaux volcaniques remaniés.

La Limagne - ou bassin - de Brioude, qui constitue le jalon méridional de la Limagne d'Allier (le prolongement sud de la Grande Limagne et de la Limagne d'Issoire) est essentiellement remplie de paléosols ("Sidérolithique") et de sédiments détritiques et argileux (sables, argiles et marnes) à niveaux carbonatés d'âges éocène à oligocène (53 à 23 Ma).

Le volcanisme

Principalement mis en place au Miocène moyen, à partir de 15 Ma, il peut être subdivisé en trois grandes entités de direction générale Nord-Ouest/Sud-Est, distinctes de par la morphologie structurale, la nature et l'âge des formations (Illustration 7).

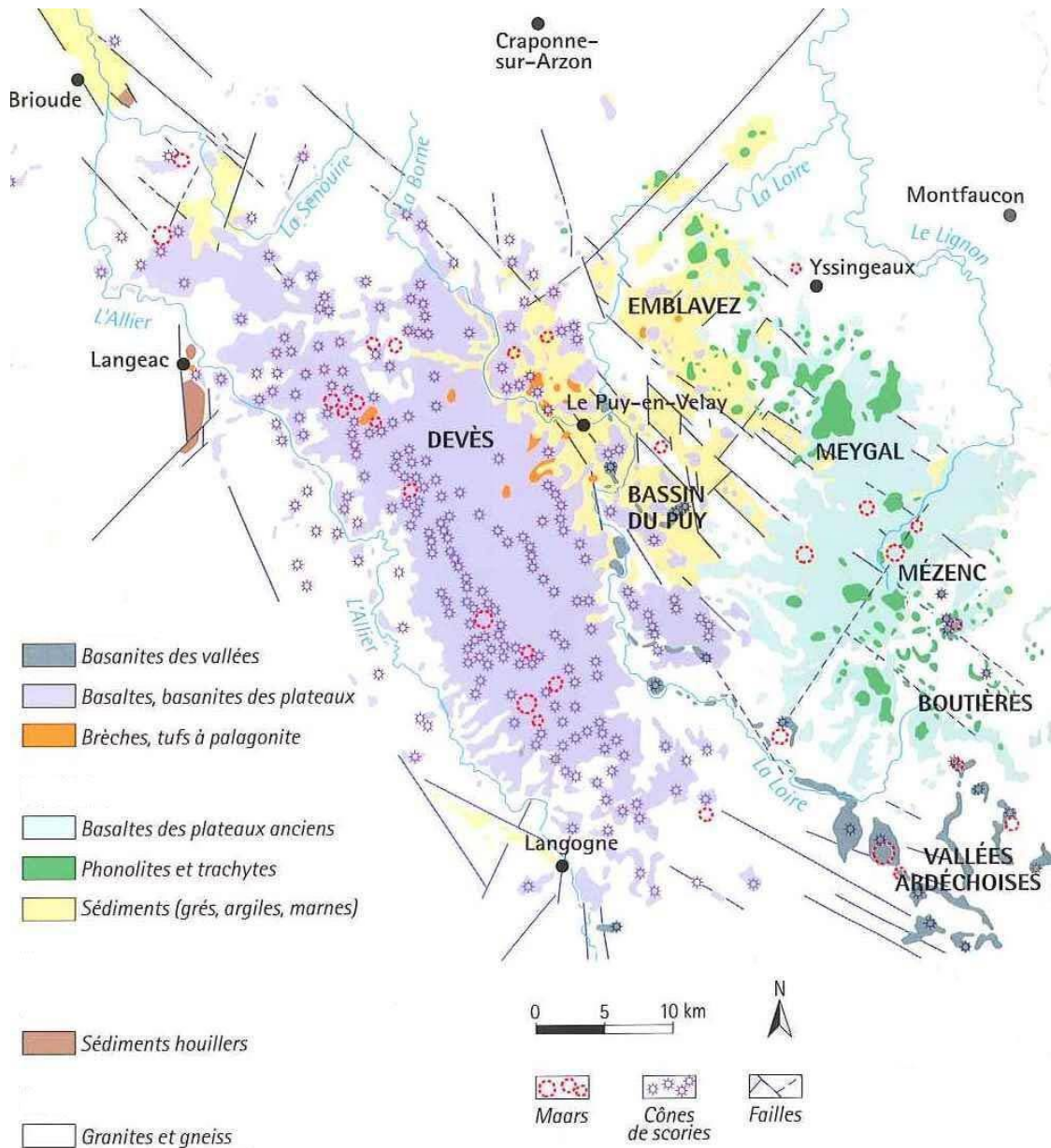


Illustration 7 – Carte des ensembles volcaniques du département de la Haute-Loire
(modifiée d'après « Le volcanisme en Auvergne », édition Chamina, 2003)

La partie centrale du département est marquée, sur plus de 70 kilomètres de longueur, par la **chaîne basaltique du Devès**, dont l'altitude est généralement comprise entre 1 000 et 1 100 m et qui culmine à 1 421 m au Mont Devès. Elle est morphologiquement marquée par la présence de cônes de scories (plus de 150 au total), appareils volcaniques de type strombolien associés à des coulées de laves basaltiques, et d'édifices issus d'éruptions hydromagmatiques, caractérisés par des dépôts de formations pyroclastiques associées à des cratères de type maar. Ces derniers sont le siège de zones humides (narcis, tourbières) et parfois de lacs.

Selon une coupe transversale Est-Ouest, cette chaîne volcanique montre une très nette dissymétrie : sur le flanc occidental, côté rivière Allier, la base des coulées, au contact du socle granito-gneissique, est à une altitude supérieure comparativement au flanc oriental, côté Loire. La surface de ce vaste "plateau volcanique" elle-même décroît en altitude de l'ouest vers l'est, par l'intermédiaire de gradins successifs plurikilométriques allongés eux aussi selon une direction nord-ouest/sud-est.

Dans les vallées de l'Allier et de la Loire, les **coulées de lave les plus récentes**, d'âge pléistocène, se sont répandues en cascades sur les versants pour atteindre les niveaux actuels des cours de cette rivière et de ce fleuve, qu'elles ont suivies et comblées en partie en plusieurs secteurs.

Les très jeunes édifices volcaniques présents au niveau du cours supérieur de la Loire et du haut plateau ardéchois, qui marquent le prolongement du Devès au sud-est, se rattachent au cycle éruptif dit "**du Bas Vivarais**", d'âge pléistocène récent.

La seconde entité volcanique importante du département est représentée au sein du bassin d'effondrement du Puy-en-Velay. L'abondance des apports hydrauliques que cette dépression a connue a conditionné profondément le dynamisme volcanique et favorisé des éruptions hydromagmatiques particulières (volcanisme de type surtseyen). La combinaison entre l'érosion active des versants constitués de formations argilo-marneuses surmontées de basaltes, le déchaussement plus ou moins avancé des substructures volcaniques (anneaux de tufs surtseyens, intrusions volcaniques, cheminées d'alimentation) et la néotectonique explique la morphologie spécifique et très spectaculaire du bassin du Puy-en-Velay. Plusieurs petites structures, géographiquement distinctes et remplies de sédiments tertiaires, se rattachent génétiquement à ce vaste bassin. C'est le cas notamment des fossés de l'Emblavès et de Bas-en-Basset.

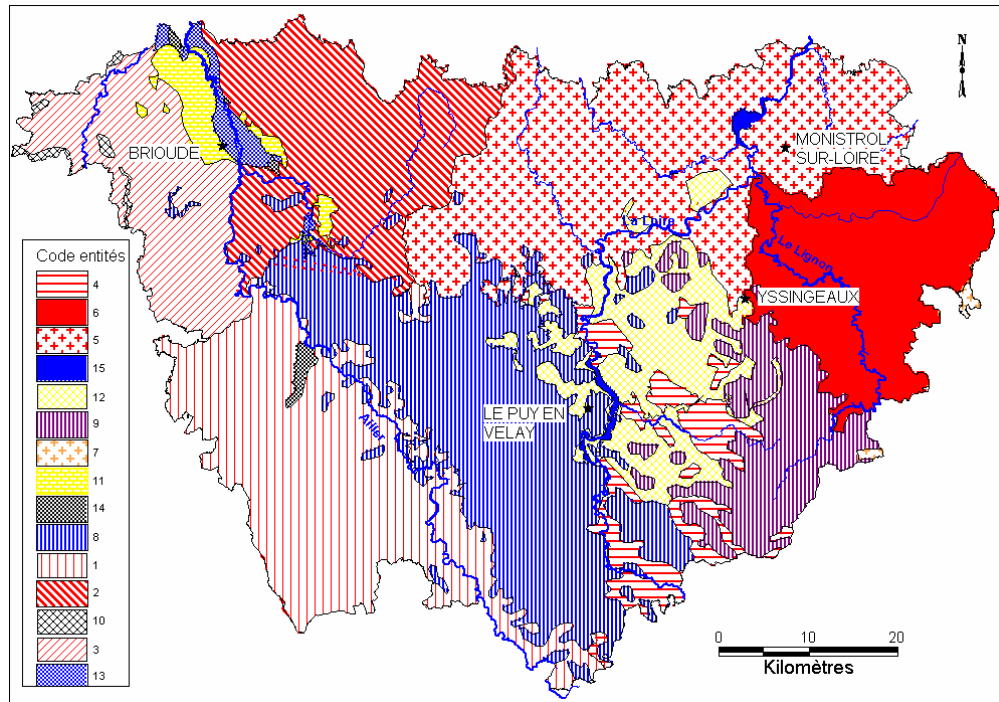
Le troisième ensemble volcanique du département, dénommé génériquement "Velay oriental", se compose à son tour de trois sous-secteurs :

- le "**Pays des Sucs**" au Nord-Ouest, entre le Sud du plateau granitique de Craponne et les limites nord du plateau basaltique de Champclause, au niveau du graben de l'Emblavès, où sont présents les phonolites et de petits plateaux basaltiques ;
- dans la partie médiane, le haut plateau basaltique de Champclause-Saint-Front-Le Monastier-sur-Gazeille, dont les bordures occidentales montrent d'imposantes superpositions de coulées de lave ;
- au Sud-Est, le pays des Boutières constitue l'autre "Pays des Sucs", dominé par le Mont-Mézenc et de direction générale nord-ouest/sud-est. Sa géomorphologie témoigne d'une importante érosion sur les reliefs du versant rhodanien du Massif central et est marquée par la présence de nombreuses structures volcaniques (intrusions, extrusions et protrusions) et de laves différenciées de types trachytes et phonolites.

4.2.3. Les dépôts quaternaires

Ils sont représentés principalement par des alluvions sablo-graveleuses, présentes notamment dans les vallées de l'Allier et de la Loire.

4.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE



Légende : codes entités		1	Aquifère de socle - Allier de sa source à Lavoûte-Chilhac
2	Aquifère de socle - Rive droite de l'Allier de Lavoûte-Chilhac à la confluence avec la Loire	3	Aquifère de socle - Rive gauche de l'Allier de Lavoûte-Chilhac à la Loire
4	Aquifère de socle - Loire de sa source à Solignac sur Loire	5	Aquifère de socle - Loire de Lavoûte/Loire au barrage de Grangent
6	Aquifère de socle - Lignon dans le Massif Central	7	Aquifère de socle - Affluents rive droite du Rhône - Massif Central
8	Massif volcanique du Devès	9	Formations volcaniques du Velay oriental
10	Formations volcaniques du Cézallier	11	Calcaires et marnes de type Limagnes
12	Argiles illitiques avec volcanisme du bassin du Puy en Velay	13	Alluvions du bassin versant de l'Allier à l'amont de sa confluence avec la Loire
14	Sédiments paléozoïques (grès, schistes, charbon)	15	Alluvions du bassin versant de la Loire

Illustration 8 - Cartographie des entités hydrogéologiques du département de la Haute-Loire (Bertin, 2007)

Le thème "socle"

Les diverses entités hydrogéologiques regroupées dans le thème "socle" présentent des caractéristiques communes : les aquifères sont discontinus, de type généralement libre, les eaux captées ont un caractère acide et une faible minéralisation. Localement, des éléments indésirables voire toxiques peuvent être naturellement présents (fer, manganèse, arsenic...).

Le thème "volcanisme"

A la différence des aquifères de socle, les aquifères volcaniques de la Haute-Loire présentent des propriétés très variées et ont souvent une structure complexe. Ils peuvent en effet trouver place au sein de formations très poreuses et/ou au sein de formations fissurées dont le comportement hydrodynamique est très différent : perméabilité de fractures et de fissures (laves) et réserves régulatrices au sein des formations pyroclastiques (projections scoriacées) par exemple. Les eaux souterraines en contexte volcanique sont faiblement minéralisées et de pH proche de la neutralité.

• Le plateau du Devès.

Les précipitations météoriques qui tombent sur le plateau du Devès s'infiltrent à travers les cônes de scories de la zone sommitale et des coulées. Une partie des eaux souterraines peut ressortir dans la partie haute du plateau après un parcours à faible profondeur. Les débits, peu élevés, sont compris entre 10 et 50 l/mn. Une autre fraction s'infiltré lentement dans les coulées. Selon le degré d'altération des formations, l'eau peut percoler jusqu'au substratum imperméable (nappes infra-basaltiques) ou bien elle peut être arrêtée par un niveau imperméable entre les différentes coulées (nappes intra-basaltiques).

• Le Velay oriental (haute chaîne du Meygal-Mézenc)

Les basaltes constituent principalement un plateau étendu entre les grabens de l'Emblavès et des Boutières. Ils sont moins favorables à la constitution de niveaux aquifères que leurs homologues du Devès car il n'existe pas d'alignement de cônes de scories susceptibles de constituer des zones d'alimentation préférentielle, et les coulées de basalte plus anciennes sont plus altérées (argilisées) et présentent donc de moins bonnes propriétés hydrodynamiques. Les maars peuvent contenir localement des réserves hydrologiques importantes : source de Molines, de la plaine d'Echamps, associée aux maars de Borée. Dans les terrains phonolitiques (sucs), plusieurs types de sources peuvent être rencontrés :

- sources alimentées uniquement par le relief phonolitique (faibles débits) ;
- sources d'ensellement qui occupent des sites résultant de la coalescence de plusieurs suc. Alimentées par les différents bassins versants, leurs débits peuvent être plus conséquents que pour les sources précédentes ;
- sources de grands ravins en contrebas des suc qui canalisent les écoulements dans une gouttière topographique préexistante. Leurs débits peuvent excéder 100 l/mn ;

- sources périphériques qui émergent parfois loin des sucs, mais qui sont situées dans la continuité de leurs bassins versants. Leurs débits peuvent être semblables à ceux des précédentes.

Quel que soit le type d'émergence, ces sources liées aux sucs sont extrêmement dépendantes des précipitations météoriques et sont par conséquent affectées d'une forte variabilité saisonnière.

• Les formations volcaniques du Cézallier

Les eaux météoriques qui s'infiltrent dans les coulées basaltiques sont arrêtées dans leur cheminement vertical par le socle gneissique imperméable. Elles donnent naissance à des sources sous-basaltiques.

Le thème "sédimentaire"

Les formations sédimentaires peuvent être subdivisées en deux types.

Les plus anciennes (ère primaire) correspondent aux bassins houillers de Langeac et Brioude, ce dernier n'étant que la terminaison du bassin de Brassac-les-Mines (Puy-de-Dôme). Ces formations ne sont pas réputées pour leurs caractéristiques hydrogéologiques, mais elles peuvent néanmoins contenir des nappes de faible extension, libres ou captives.

Les plus récentes sont les formations tertiaires (Eocène-Oligocène) qui ont comblé des bassins d'effondrement.

Le bassin de Brioude, qui forme avec celui d'Issoire la « Petite Limagne », a été remblayé par des dépôts assez variés : niveaux détritiques (sables et argiles) et carbonatés (marnes et calcaires) atteignant des épaisseurs importantes (jusqu'à 358 m à Cohade). La moitié est occupée par la plaine alluviale de l'Allier et son système de terrasses de nature variée. Les formations argilo-sableuses ou calcaro-sableuses, de perméabilité généralement faible, peuvent receler des nappes de faible extension. Quelques sources de forte minéralisation ont été captées dans le bassin de Brioude. Elles sont à présent abandonnées.

Dans le **bassin du Puy-en-Velay**, le socle granitique fracturé s'est abaissé au début de l'ère tertiaire et a été progressivement recouvert par des sédiments détritiques dès l'Eocène (sables et arkoses) auxquels a succédé une importante série argileuse à concrétions calcaires. Localement, on peut trouver en position sommitale des calcaires, le tout étant surmonté par des sables et graviers et par des épanchements basaltiques. Les ressources aquifères du bassin du Puy-en-Velay sont extrêmement limitées du fait de l'importance de la composante argileuse.

Le thème "alluvial"

Les alluvions peuvent renfermer des nappes d'importance variée. Leur perméabilité est liée aux proportions respectives des galets, graviers, sables et limons qui les

composent. Les nappes alluviales peuvent être alimentées par les précipitations météoriques, par des venues du bassin latéral et par les apports de la rivière lorsque les alluvions bordent un cours d'eau (cas des alluvions récentes). Les forages implantés dans les alluvions récentes ont des débits plus conséquents que ceux situés dans les alluvions anciennes car ils bénéficient de la réalimentation par le cours d'eau. L'essentiel du débit pompé provient alors du cours d'eau riverain.

En Haute-Loire, les plages alluviales sont assez limitées en épaisseur et en largeur. Les deux grands cours d'eau traversent le département sont néanmoins encadrés de dépôts alluviaux.

• L'Allier

Les dépôts ne sont bien représentés qu'à partir du bassin de Brioude. Les alluvions récentes, dont la puissance est comprise en moyenne entre 5 et 8 m reposent sur le substratum argilo-sableux de l'Oligocène ou sur le socle. Elles renferment une nappe libre de transmissivité moyenne. Localement, il peut exister des zones plus productives. Les eaux sont bicarbonatées calciques, légèrement agressives. Les anciennes terrasses alluviales déconnectées des alluvions récentes forment des zones peu favorables à la constitution d'aquifères, d'une part à cause de la présence de sédiments souvent très argileux de faible perméabilité, et d'autre part à cause de l'absence de phénomène de réalimentation induite par la rivière. Des nappes perchées sont toutefois recensées çà et là (sous l'aérodrome de Brioude par exemple). Quelques puits traditionnels permettent de capter ces eaux souterraines, à un faible débit.

• La Loire

Quelques secteurs présentent des épandages alluvionnaires de plusieurs mètres d'épaisseur permettant un stockage significatif d'eau souterraine. Au niveau de Bas-en-Basset, les alluvions du fleuve sont situées dans un bassin d'effondrement d'âge tertiaire remblayé à l'Oligocène par des sédiments argilo-sableux. L'ensemble sédimentaire repose sur le socle granitique primaire. Il est limité par des failles de direction hercynienne (Primaire) ayant rejoué au Tertiaire pour former le bassin oligocène. Les alluvions ont une épaisseur maximale de 7 m, le niveau piézométrique de la nappe se trouve entre 2 et 3 m de profondeur. Le substratum est constitué par les sédiments tertiaires, sauf au niveau du Pont de Gourdon où les alluvions reposent directement sur le granite. Dans le secteur de Brive-Charensac, le substratum des alluvions (anciennes et récentes) est formé par les terrains d'âge éocène comportant des argiles à concrétions calcaires puis des arkoses ou des grès. La nappe est libre.

D'autres rivières présentent également des accumulations locales d'alluvions pouvant être aquifères :

- Les alluvions de la Rance à La Villette (commune de Retournac) contiennent deux aquifères superposés séparés par un niveau argileux (0,8 à 1 m d'épaisseur). L'aquifère inférieur se situe dans un niveau de sables grossiers et gros galets (entre 3,6 et 6 m de profondeur).

- Les alluvions de la Sénouire vers Lavaudieu ont jadis permis l'installation de captages pour alimenter Brioude.
- Une petite nappe alluviale en bordure de l'Arzon serait également exploitée au niveau de Vorez. La terrasse alluviale de 300 m de long et 50 m de large comporte une épaisseur de 1,5 m de sables et blocs.

Non cartographiées ici car sous couverture, les alluvions anté-volcaniques (plio-villafranchiennes) recouvertes par les coulées basaltiques constituent un horizon perméable où les eaux souterraines ayant traversé les basaltes s'accumulent pour donner naissance à des sources infra-basaltiques.

Les eaux minérales

Le département de la Haute-Loire comprend une trentaine de sources d'eau minérale liées à des failles ou à des contacts anormaux. Pour la plupart froides et carbogazeuses, elles se manifestent en général dans les granites ou les roches métamorphiques. Certaines sourdent cependant des marnes ou argiles sanoisiennes (Les Vigneaux à Ceysac, Les Estreys à Polignac) ou des basaltes (Source des Orgues à St-Julien). Par ailleurs, il convient de signaler que toute la vallée de la Loire, entre Arlempdes et Goudet, comporte un alignement de sources de très faibles débits ainsi que des manifestations gazeuses sporadiques.

4.4. LITHOSTRATIGRAPHIE DES FORMATIONS ARGILEUSES AU SENS LARGE

Ce chapitre dresse l'inventaire des formations géologiques à composante argileuse du département de la Haute-Loire identifiées dans le cadre de cette étude et dont l'extension géographique est représentée sur la carte départementale synthétique des formations argilo-marneuses (Illustration 9), également présentée en planche hors-texte à l'échelle 1/125 000.

Une brève description de ces formations est présentée, dans l'ordre stratigraphique, depuis les plus récentes jusqu'aux plus anciennes. Cette description est basée principalement sur les notices des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000. L'annexe 2 présente, pour chaque formation argileuse ou marneuse identifiée, les regroupements effectués à partir de la carte géologique harmonisée du département (Prognon *et al.*, 2009).

4.4.1. Les dépôts quaternaires

1. Alluvions, tourbières et formations associées [F]

Les *Alluvions, tourbières et formations associées* sont bien représentés dans le département (176,67 km², soit 3,48 % du territoire). Elles sont peu argileuses mais la présence d'argiles ne peut être exclue. Les formations alluviales actuelles et anciennes sont composées majoritairement de blocs, galets, graviers et sables arrachés au socle

environnant. Les tourbières sont des dépôts de dépression et de fond de vallons localement argileux et très compressibles de par leur nature (matières organiques).

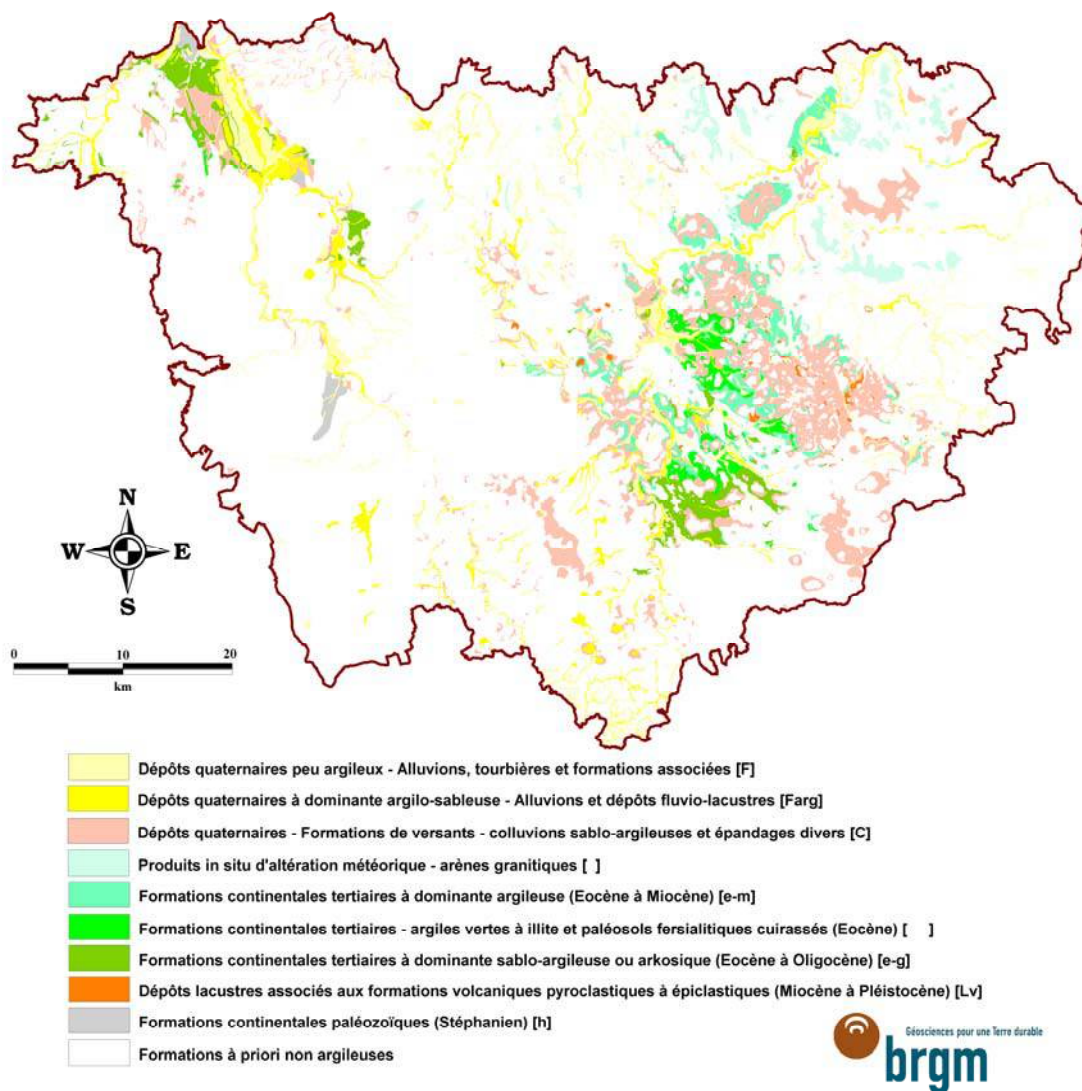


Illustration 9 – Carte des formations argileuses et marneuses de la Haute-Loire

Ces dépôts (Illustration 10) n'excédant le plus souvent pas 1 m d'épaisseur, ils n'ont été représentés que localement, dans les secteurs où ils peuvent être puissants de plusieurs mètres.

2. Alluvions et dépôts fluvio-lacustres [Farg]

Dans cette formation, qui représente 2,80 % du territoire départemental, ont été regroupés les dépôts fluvio-lacustres et les alluvions actuelles à anciennes des fonds de vallées dans lesquelles un terme argileux non prédominant est décrit. Ces

formations ont une granulométrie moindre et sont composées de limons, sables, sables argileux et graviers.

En général d'une épaisseur allant de quelques mètres à localement plusieurs dizaines de mètres, ces formations alluvionnaires et fluvio-lacustres couvrent une surface de 142,04 km² (Illustration 11).

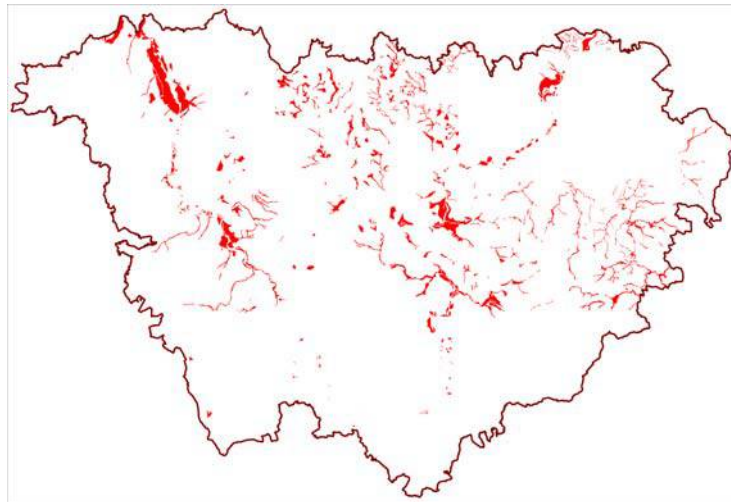


Illustration 10 – Répartition de alluvions, tourbières et formations associées [F]

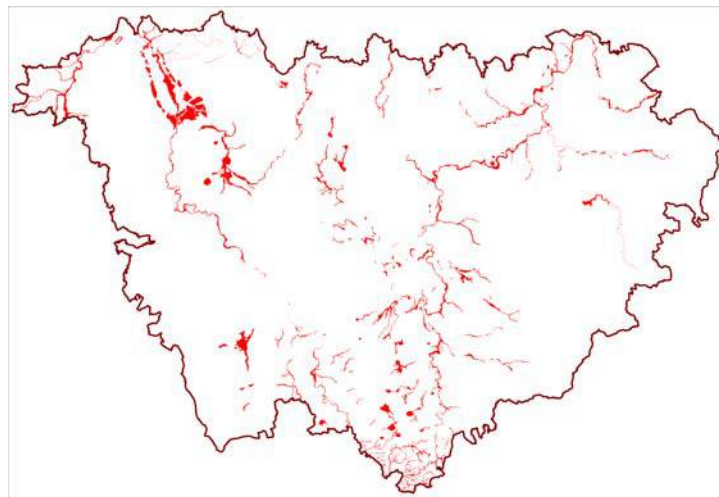


Illustration 11 - Répartition de la formation des alluvions et dépôts fluvio-lacustres [Farg]

3. Formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers [C]

Les *Formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers* réunissent les colluvions indifférenciées, les formations gélifluées, les complexes de colluvions et d'alluvions et des formations en surcharge correspondant aux colluvions sur substrats identifiés.

Cette formation du Quaternaire constitue une surface non négligeable (365,56 km², soit 7,20 %) du département de la Haute-Loire (Illustration 12). Elle est constituée de colluvions généralement à matrice fine (argiles, silts ou sables) enrobant plus ou moins de cailloux ou de blocs suivant le substrat rocheux local (boules de granites, petits blocs de basaltes, etc.). Il s'agit de dépôts de bas de versants généralement fins, mis en place principalement par ruissellement diffus et transportés sur de très faibles distances.

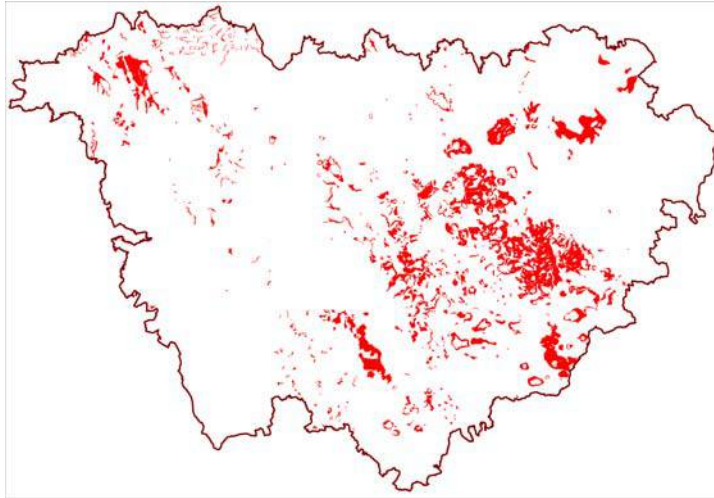


Illustration 12 – Répartition des formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers [C]

4. Produits in situ d'altération météorique - arènes granitiques [A]

Cette formation couvre une surface de 58,81 km², soit 1,16 % de la surface départementale (Illustration 13) et est constituée d'arènes granitiques décrites localement comme pouvant être sableuses ou sablo-argileuses, toutes les transitions existant avec la roche saine.

Elle peut résulter de la mobilisation des formations d'altération sur les pentes, par divers processus, le plus souvent en milieu périglaciaire. L'épaisseur de ces complexes d'arènes déplacées peut atteindre plusieurs mètres et plusieurs niveaux y sont reconnaissables. Localement, elle est à matrice argilo-limoneuse.

4.4.2. Les formations continentales tertiaires

5. Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène) [e-m]

D'âge éocène à miocène, cette série continentale est essentiellement argileuse bariolée et argilo-marneuse et comprend également des passées calcaires et sablo-

argileuses. Elle couvre 94,25 km², soit 1,86 % de la surface départementale (Illustration 14).

Elles peuvent atteindre une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres avec des passées argileuses plurimétriques.

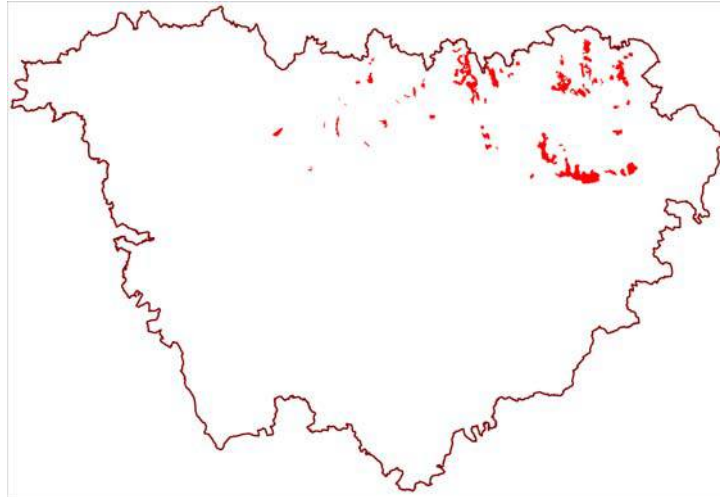


Illustration 13 – Répartition de la formation des produits *in situ* d'altération météorique - arènes granitiques [A]

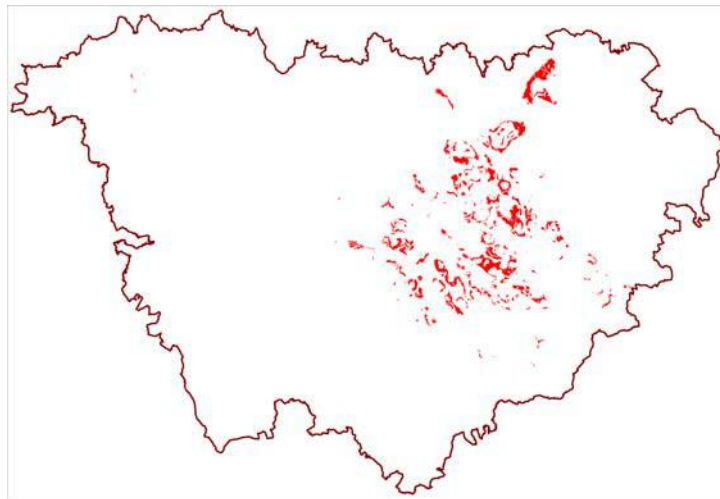


Illustration 14 - Répartition des formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène) [e-m]

6. Formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène) [P-B]

Formation argileuse illitique de 20 à 70 m d'épaisseur, elle est aussi appelée "argiles à illite", "argiles vertes à illite" ou même, improprement, "Marnes du Puy". Au-dessus des

couches inférieures de transition, argileuses à niveaux rougeâtres, sans nodules carbonatés, souvent un peu sableuses (quelques mètres), s'installe l'épaisse formation argileuse rubanée, souvent riche en nodules calcaires.

Les argiles vertes à illite d'âge éocène occupent une surface restreinte (0,78 %, soit 39,99 km² - Illustration 15).

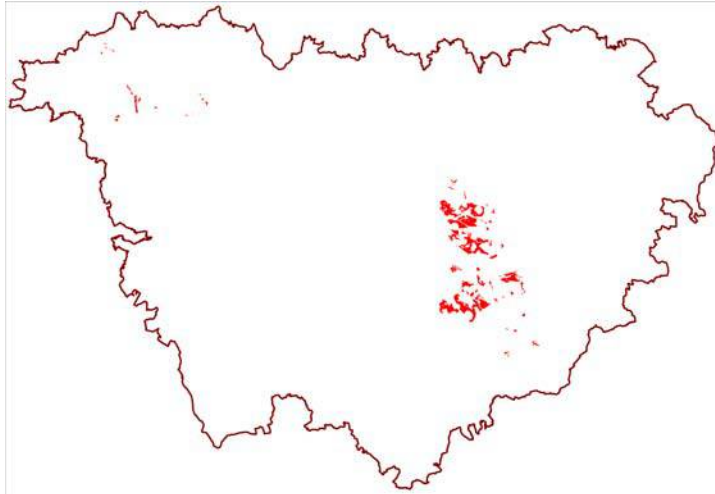


Illustration 15 - Répartition des formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène) [P-8]

7. Formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène) [e-g]

Ces formations à termes argileux non prédominants sont peu représentées dans le département de la Haute-Loire (Illustration 16), avec une superficie atteignant 76,95 km², soit 1,54 %. Il s'agit d'argiles sableuses et de sables à passées arkosiques et calcaréo-gréseuses plus rarement.

4.4.3. Autres formations continentales

8. Dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épicyclastiques (Miocène à Pléistocène) [Lv]

Ces dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épicyclastiques sont des remplissages de "maar" et autres dépressions fermées. D'une épaisseur pouvant atteindre 200 m, ils sont composés de tufs et tufs bréchiques argilisés et de dépôts lacustres rouges composés d'argiles, de sables et de sables grossiers.

Cette formation représente une superficie de 7,62 km² soit 0,15 % de la surface départementale (Illustration 17).

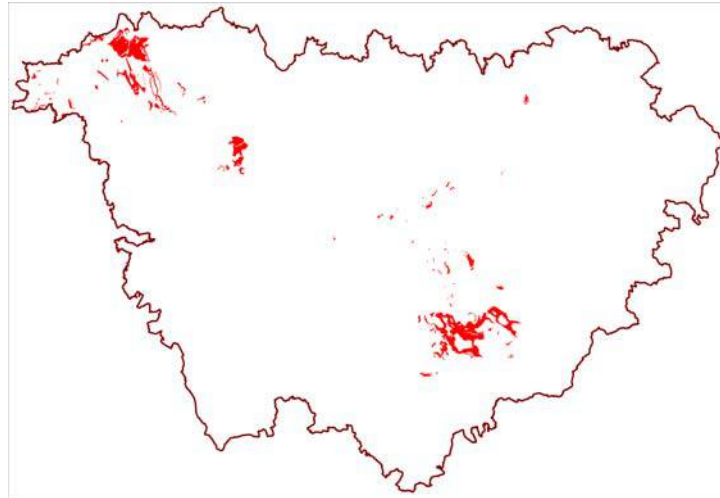


Illustration 16 - Répartition des formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène) [e-g]

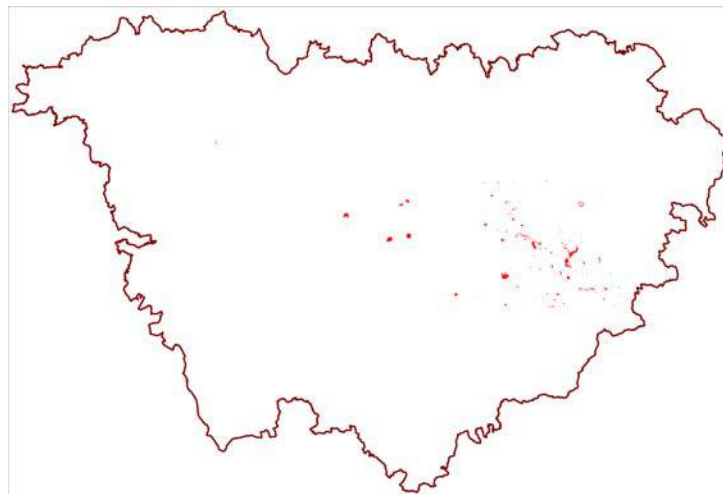


Illustration 17 - Répartition des dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épicyclastiques (Miocène à Pléistocène) [Lv]

9. Formations continentales paléozoïques (Stéphanien) [h]

Les *Conglomérats, grès et schistes du Stéphanien* représentent un peu plus de 15 km², soit 0,31 % de la surface départementale (Illustration 18).

La nature argileuse de ces dépôts n'est pas certaine dans la mesure où les notices des cartes géologiques les définissent comme "niveaux terrigènes", en citant toutefois des niveaux argileux d'épaisseur non définie.

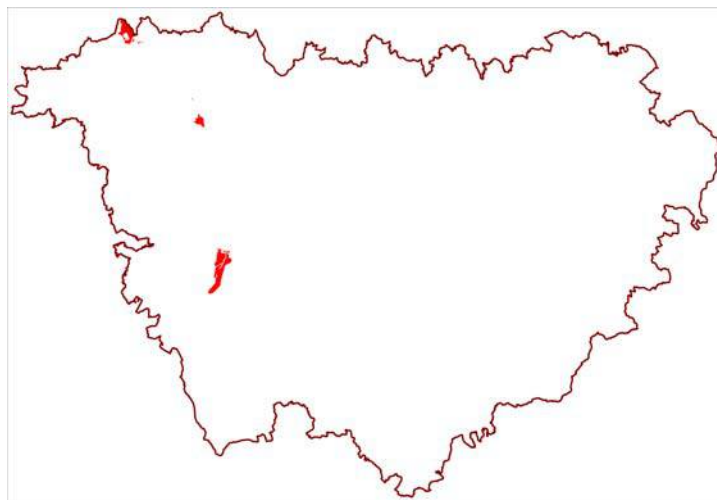


Illustration 18 - Répartition des formations continentales paléozoïques (Stéphanien) [h]

4.5. 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 non identifiée sur les cartes géologiques. Elles n'ont pas été prises en compte à l'échelle de la cartographie départementale.

D'autres formations, comme les formations détritiques datant du Viséen par exemple, comportent localement des passées argileuses, mentionnées dans les notices des cartes géologiques à 1/50 000 de la Haute-Loire, mais leur faible proportion en argile ne justifie pas de les retenir dans cette étude même si localement, ces lentilles ou poches argileuses peuvent être à l'origine de quelques sinistres.

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 9 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 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 9 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 19) :

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 19 – Barème utilisé pour la notation lithologique

5.2.2. Caractérisation lithologique

Sur la base de ces critères, le tableau de l'illustration suivante (Illustration 20) permet de synthétiser les différentes notes lithologiques attribuées aux neuf formations potentiellement sujettes au retrait-gonflement, à partir des descriptions issues des notices des cartes géologiques à 1/50 000 et de l'expertise du géologue régional.

Num	Notation	Nom de la formation	Note Litho
1	F	Dépôts quaternaires peu argileux - Alluvions, tourbières et formations associées	1
2	Farg	Dépôts quaternaires à dominante argilo-sableuse - Alluvions et dépôts fluvio-lacustres	2
3	C	Dépôts quaternaires - Formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers	3
4	\mathcal{A}	Produits in situ d'altération météorique - arènes granitiques	1
5	e-m	Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène)	4
6	$\mathcal{P-B}$	Formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène)	4
7	e-g	Formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène)	3
8	Lv	Dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épicyclastiques (Miocène à Pléistocène)	1
9	h	Formations continentales paléozoïques (Stéphanien)	1

Illustration 20 - Note lithologique des formations argileuses retenues

5.3. CRITÈRE MINÉRALOGIQUE

5.3.1. Définition du critère minéralogique et barème

Les phénomènes de retrait-gonflement s'expriment préférentiellement en présence des minéraux argileux appartenant au groupe des smectites (montmorillonite, beidellite, nontronite, saponite, hectorite, sauconite), 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.

Ce critère minéralogique a du cependant être adapté au cas spécifique de la Haute-Loire. En effet, ce département recèle, dans le bassin du Puy-en-Velay, des argiles illitiques d'un genre particulier, décrites dans la littérature comme des « illites désorientées » présentes dans les formations argileuses les plus épaisses, dites de la « série moyenne de la zone centrale » (Gabis, 1973). Dans cette série, où coexistent

kaolinite et illite, cette dernière est toujours dominante et peut même être le seul minéral argileux présent dans les argiles vertes qui alternent avec les bancs marneux. Or cette illite possède des propriétés absorbantes reconnues qui justifient son exploitation, dans le bassin du Puy-en-Velay, pour la production de litières animales en particulier. D'autre part, on notera que deux échantillons de matériaux argileux prélevés dans cette série du bassin du Puy-en-Velay dans le cadre de la présente étude (6A09RG43 et 5A12RG43), dans lesquels l'illite prédomine nettement (% d'illite respectivement de 71 et 80 %, cf. Annexe 5), présentent des valeurs au bleu de méthylène particulièrement fortes pour cette espèce minérale (4,49 et 5,94 respectivement, cf. Annexe 6). Ces échantillons sont représentatifs des formations argileuses dites « Formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène) » et « Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène) » respectivement.

Compte tenu de ces considérations, les minéraux argileux de type illite présents dans les formations sédimentaires du bassin du Puy-en-Velay ont été considérés comme des minéraux gonflants.

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 ci-après (Illustration 21).

% 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 21 - Hiérarchisation des formations 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, donnent parfois des indications sur la nature minéralogique des argiles mais 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 la Haute-Loire

proviennent de 19 analyses effectuées par le BRGM sur des échantillons prélevés dans le cadre de la présente étude (Annexe 5).

Enfin, quelques données recueillies dans des départements voisins lors de la réalisation des cartes d'aléa sont également mentionnées pour les formations d'extension régionale. Ceci concerne les départements voisins de la Loire (Logeais *et al.*, 2009), de l'Ardèche (Plat *et al.*, 2009), de la Lozère (Colas *et al.*, 2010) et du Cantal (Saint Martin *et al.*, 2010).

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 exploitables pour les différentes formations à composante argileuse sont résumées ci-après (Illustration 22), sachant que le nombre d'échantillons analysés n'est pas toujours clairement exprimé dans la bibliographie scientifique consultée.

Numéro	Notation	Formation	Données sur le département	Données sur les départements limitrophes	Note minéralogique
1	F	Dépôts quaternaires peu argileux - Alluvions, tourbières et formations associées	<p>Analyses BRGM : Echantillon 1A18RG43 : La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par : - interstratifié vermiculite/chlorite + vermiculite :~4% - illite et/ou micas :~66% - kaolinite :~30%</p> <p>Echantillon 1B03RG43 : La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par : - interstratifié smectite/chlorite :~10% - illite et/ou micas :~55% - kaolinite :~35%</p> <p>Echantillon 1C10RG43 : La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par : - vermiculite :~5% - illite et/ou micas :~61% - kaolinite :~34%</p> <p>Analyse BRGM (projet BAMACAU) 51% illite, 37% kaolinite, 12% smectite</p>	<p>Loire : • analyse BRGM : interstratifié smectite/chlorite (10%), illite et/ou micas (20%), kaolinite (70%) • analyse BRGM : interstratifié smectite/chlorite (5%), vermiculite (3%), illite et/ou micas (69%), kaolinite (23%)</p> <p>Lozère : • 1 - Kaolinite (50%), Illite (25%), Smectites et interstratifiés (25%) • 2 - Illite (50%), Smectites et interstratifiés (50%) • 3 - Kaolinite (100%) • 4 - Kaolinite (20%), Illite (60%), Smectites et interstratifiés (20%) • 5 - Kaolinite (50%), Illite (20%), Smectites et interstratifiés (30%) • 6 - Kaolinite (16%), Illite (17%), Smectites et interstratifiés (34%), autres (33%) • 7 - Kaolinite (63%), Illite (19%), autres (18%) • 8 - Kaolinite (16%), Illite (13%), Chlorite (8%), Smectites et interstratifiés (13%), autres (51%) • 9 - Kaolinite (30%), Illite (12%), autres (58%) • 10 - Kaolinite (28%), Illite (20%), autres (52%) • 11 - Kaolinite (65%), autres (35%) • 12 - Kaolinite (72%), autres (28%) • 13 - Smectites et interstratifiés (100%) • 14 - Illite (33%), Smectites et interstratifiés (67%)</p>	1
2	Farg	Dépôts quaternaires à dominante argilo-sableuse - Alluvions et dépôts fluvio-lacustres	<p>Analyses BRGM : Echantillon 2A17RG43 : La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par : - interstratifié smectite/chlorite :~2% - illite et/ou micas :~5% - kaolinite :~93%</p> <p>Echantillon 2B14RG43 : La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par : - interstratifié smectite/chlorite + vermiculite + interstratifié vermiculite/chlorite possible :~6% - illite et/ou micas :~68% - kaolinite :~26%</p> <p>Echantillon 2C13RG43 : La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par : - vermiculite + interstratifié vermiculite/chlorite :~39% - illite et/ou micas :~23% - kaolinite :~38%</p> <p>Analyse BRGM (projet BAMACAU) 76% illite, 13% kaolinite, 7% chlorite, 4% smectite</p>	<p>Ardèche : • analyse BRGM : interstratifié smectite/chlorite (93%), illite et/ou micas (7%), kaolinite probable (<1%) • analyse BRGM : interstratifié smectite/chlorite (37%) , illite et/ou micas (28%), kaolinite (35%)</p>	1

3	C	Dépôts quaternaires - Formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers	<p>Analyses BRGM : <u>Echantillon 3A19RG43 :</u> La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - interstratifié smectite/chlorite :~11% - illite et/ou micas :~45% - kaolinite :~44% <p><u>Echantillon 3B04RG43 :</u> La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - vermiculite + interstratifié vermiculite/chlorite possible :~43% - illite et/ou micas :47% - kaolinite :10% <p><u>Echantillon 3C07RG43 :</u> La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - illite et/ou micas :~8% - kaolinite :92% <p>Analyse BRGM (projet BAMACAU) 27% kaolinite, 73% (mica et/ou) illite</p>	<p>Ardèche : • <i>analyse</i> : interstratifié smectite/chlorite : 72%, illite et/ou micas : 5%, kaolinite : 23% Notice feuille 889 : fraction argileuse composée essentiellement de chlorites et montmorillonites</p> <p>Lozère : • <i>22 analyses en bibliographie (moyenne)</i> : kaolinite (20%), illite (60%), smectite et inter (20%). • <i>analyse</i> : kaolinite (16%), illite 17(%), autres (33%), smectite et inter (34%). • <i>analyse</i> : kaolinite (63%), illite (19%), autres (18%). • <i>analyse</i> : kaolinite (16%), illite (13%), chlorite (8%), autres (51%), smectite et inter (13%). • <i>analyse</i> : kaolinite (30%), illite (12%), autres (58%). • <i>analyse</i> : kaolinite (28%), illite (20%), autres (52%). • <i>analyse</i> : kaolinite (65%), autres (35%). • <i>analyse</i> : kaolinite (72%), autres (28%). • <i>analyse</i> : illite (33%), smectite et inter (67%).</p>	2
4	ℳ	Produits in situ d'altération météorique - arènes granitiques	<p>Analyses BRGM : <u>Echantillon 4A01RG43 :</u> La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - vermiculite et interstratifié vermiculite/chlorite probable :~41% - sépiolite :~15% - illite et/ou micas :~17% - kaolinite ~27% <p><u>Echantillon 4B02RG43 :</u> La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - vermiculite et interstratifié vermiculite/chlorite :~36% - illite et/ou micas :~41% - kaolinite : ~23% <p><u>Echantillon 4C05RG43 :</u> La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - vermiculite + interstratifié vermiculite/chlorite possible :~34% - illite et/ou micas :~18% - kaolinite :~48% 	<p>Loire : <i>Analyse BRGM</i> : interstratifié smectite/chlorite (41%), illite et/ou micas (36%), kaolinite (23%) <i>Echantillon Etape 10c (iA, 0,7 m)</i> <i>Analyse BRGM</i> : • interstratifié smectite/chlorite + vermiculite (86%), illite et/ou micas (8%), kaolinite (6%)</p>	2
5	e-m	Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène)	<p>Analyse BRGM : <u>Echantillon 5A12RG43 :</u> La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - illite et/ou micas :~80% - kaolinite :~20% 	<p>Cantal : <i>Analyse BRGM</i> : interstratifié smectite/chlorite (48%), illite et/ou micas (10%), kaolinite (42%)</p> <p>Ardèche : <i>Analyse BRGM</i> : interstratifié smectite/chlorite (80%), illite et/ou micas (20%), kaolinite probable (1%) <i>Analyse BRGM</i> : interstratifié smectite/chlorite (65%), illite et/ou micas (22%), kaolinite (13%) <i>Analyse BRGM</i> : interstratifié smectite/chlorite (75%), illite et/ou micas (10%), kaolinite (15%)</p>	3

6	Ⓐ-Ⓑ	Formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène)	<p>Analyse BRGM : Echantillon 6A09RG43 : La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - illite et/ou micas :~71% - kaolinite :~29% 		3
7	e-g	Formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène)		<p>Aveyron : Analyse BRGM : interstratifié smectite /chlorite (84%), illite et/ou mica (2%), kaolinite (14%) Analyse BRGM : interstratifié smectite/chlorite (81%), illite et/ou mica (4%), kaolinite (15%) Analyse BRGM : interstratifié smectite/chlorite (79%), illite et/ou mica (11%), kaolinite (10%)</p> <p>Lozère :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 - Kaolinite (100%) • 2 - Kaolinite (50%), Smectites et interstratifiés (50%) • 3 - Kaolinite (50%), Smectites et interstratifiés (50%) • 4 - Kaolinite (20%), Smectites et interstratifiés (80%) • 5 - Kaolinite (50%), Smectites et interstratifiés (50%) • 6 - Illite (20%), Smectites et interstratifiés (80%) • 7 - Kaolinite (80%), Smectites et interstratifiés (20%) • 8 - Kaolinite (80%), Smectites et interstratifiés (20%) • 9 - Kaolinite (100%) • 10 - Kaolinite (100%) • 11 - Kaolinite (34%), Illite (26%), autres (40%) • 12 - Kaolinite (50%), Illite (50%) 	3
8	Lv	Dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épicycliques (Miocène à Pléistocène)	<p>Analyses BRGM : Echantillon 8A08RG43 : La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - interstratifié smectite/chlorite :~96% - illite et/ou micas :~4% <p>Echantillon 8B06RG43 : La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - interstratifié smectite/chlorite :39% - illite et/ou micas :~12% - kaolinite :~49% <p>Echantillon 8C11RG43 : La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - illite et/ou micas :~78% - kaolinite :~22% - interstratifié possible non identifiable 		3

9	h	Formations continentales paléozoïques (Stéphanien)	<p>Analyses BRGM : <u>Echantillon 9A16RG43 :</u> La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par : - illite et/ou micas :~28% - kaolinite :~72% - vermiculite possible en traces</p> <p><u>Echantillon 9B15RG43 :</u> La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par : - illite et/ou micas :~71% - kaolinite :~29%</p>	<p>Aveyron : • analyse : illite-mica (40%), kaolinite (25%), vermiculite (31%) et inter (4%). • analyse : illite-mica (46%), kaolinite (24%), vermiculite (23%) et inter (7%). • analyse : illite-mica (99%), kaolinite (1%).</p>	1
---	---	--	--	---	---

Illustration 22 - Données minéralogiques et notation attribuée aux formations à composante argileuse

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 ont été ici utilisés pour caractériser le comportement géotechnique du matériau vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement sont la valeur de bleu et l'indice de plasticité, aucune valeur de retrait linéaire n'ayant été trouvée lors du dépouillement des données du département. 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 23) :

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, voire 20 et 30..

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

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 24).

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 24 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la valeur au bleu de méthylène de la formation

5.4.5. Retrait linéaire (RI)

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

par sa désaturation. La teneur en eau correspondant à ce palier est appelée limite de retrait. Plus cette valeur est faible, plus la variation de volume peut être importante et plus le tassement induit en cas de dessiccation sera grand.

Les coupures suivantes ont été proposées (Mastchenko, 2001) pour caractériser le potentiel de retrait avec ce paramètre (Illustration 25).

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

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

Illustration 25 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du retrait linéaire de la formation

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 26).

Aucune valeur de ce paramètre n'a pu être obtenue dans la Haute-Loire.

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

Illustration 26 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du coefficient de gonflement de la formation

5.4.7. Caractérisation géotechnique

Les sources des données ici présentées proviennent principalement de dossiers de bureaux d'études qui nous ont aimablement permis de consulter leurs archives (cf. Illustration 27). Nous remercions donc pour leur précieuse collaboration ces organismes dont les coordonnées sont précisées en Annexe 4.

Organismes	Nb données	Pourcentage
BRGM	19	7,14 %
CEBTP SOLEN	6	2,26 %
CFEG	3	1,13 %
FONDASOL	89	33,46 %
HYDRO-GEOTECHNIQUE SUD EST	14	5,26 %
LRPC de Clermont-Ferrand	46	17,29 %
SIC INFRA 63	7	2,63 %
SOL SOLUTION	81	30,45 %
Autre	1	0,38 %
TOTAL	266	

Illustration 27 - Répartition du nombre de données géotechniques selon leur origine

Quelques autres résultats nous ont été fournis par les communes en retour de courrier d'enquête et par la Préfecture. Ces analyses sont aussi principalement issues des bureaux d'étude cités ci-dessus.

Toutes les valeurs géotechniques recueillies pour les formations argileuses retenues ont été synthétisées dans le tableau de l'illustration 28.

Sur l'ensemble du département, compte-tenu de la faible surface occupée par les formations identifiées comme argileuses, la majorité des données recueillies ne peut être attribuée à ces formations. Au final, les données recueillies et attribuées à des formations argileuses se répartissent ainsi :

- indice de plasticité : 60 données ont été obtenues à partir des réponses des communes et des bureaux d'études. Ces données ont été complétées par 305 valeurs d'indices de plasticité recueillies dans les départements limitrophes dans le cadre d'études similaires (Ardèche, Cantal, Loire et Lozère) ;
- valeur de bleu : 166 données ont été obtenues pour le département de la Haute-Loire. Ces données ont été complétées par 558 valeurs de bleu recueillies dans les départements limitrophes dans le cadre d'études similaires (Ardèche, Cantal, Loire et Lozère).

Ces données ne nous permettant pas de caractériser la totalité des formations, 26 analyses de valeur de bleu ont été effectuées dans le cadre de cette étude par le service Métrologie, Monitoring, Analyses du BRGM (Annexe 6).

L'ensemble de ces données a permis de caractériser la totalité des formations argileuses du département de la Haute-Loire.

N°	Formation lithologique	Dept 43						Autres Dept (15, 48, 07, 42)						Note géotechnique				
		Indice de plasticité			Valeur au bleu			Indice de plasticité			Valeur au bleu							
		Nb	Ip min	Ip max	Ip moy	Nb	Vb min	Vb max	Vb moy	Nb	Ip min	Ip max	Ip moy		Nb	Vb min	Vb max	Vb moy
1	Dépôts quaternaires peu argileux - Alluvions, tourbières et formations associées	16	11,00	58,00	30,50	42	0,08	13,79	2,53	81	3,40	32,90	12,87	114	0,02	8,61	1,11	2
2	Dépôts quaternaires à dominante argilo-sableuse - Alluvions et dépôts fluviolacustres	1	39,00	39,00	39,00	14	0,15	12,82	3,58	109	3,40	46,00	14,31	151	0,02	8,61	1,12	2
3	Dépôts quaternaires - Formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers	26	21,00	54,00	31,92	55	0,47	13,00	5,05	44	5,00	56,00	17,32	151	0,06	11,87	1,94	2
4	Produits in situ d'altération météorique - arènes granitiques					3	0,13	1,22	0,72					21	0,21	1,50	0,62	1
5	Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène)	11	32,00	55,00	44,63	23	2,70	10,17	5,96									3
6	Formations continentales tertiaires - argilles vertes à illite et paléosols ferrallitiques cuirassés (Eocène)	1	33,00	33,00	33,00	4	4,49	8,77	6,63									3
7	Formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène)	5	17,00	27,00	20,20	19	0,44	7,00	3,19	4	14,00	64,00	41,40	6	0,60	3,50	2,13	2
8	Dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épiciastiques (Miocène à Pléistocène)					3	1,56	3,84	2,99									2
9	Formations continentales paléozoïques (Stéphanien)					3	0,45	0,80	0,62	67	1,10	25,40	9,18	115	0,09	6,33	0,97	1

Illustration 28 - Synthèse des données géotechniques exploitées et note géotechnique attribuée

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 29) :

Note moyenne	Degré de susceptibilité
valeur ≤ 2	faible
$2 < \text{valeur} \leq 3$	moyen
valeur > 3	fort

Illustration 29 – Barème d'attribution d'un niveau de susceptibilité d'une formation argileuse

Moyennant ce traitement, les notes de susceptibilité attribuées aux 9 formations retenues comme argileuses sont les suivantes (Illustration 30) :

N°	Notation	Nom de la formation	Litho	Minéralo	Géotech	Moyenne	Niveau de susceptibilité
1	F	Dépôts quaternaires peu argileux - Alluvions, tourbières et formations associées	1	1	2	1.33	1
2	Farg	Dépôts quaternaires à dominante argilo-sableuse - Alluvions et dépôts fluvio-lacustres	2	1	2	1.66	1
3	C	Dépôts quaternaires - Formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers	3	2	2	2.33	2
4	\mathcal{A}	Produits in situ d'altération météorique - arènes granitiques	1	2	1	1.33	1
5	e-m	Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène)	4	3	3	3.33	3
6	$\mathcal{A}-\mathcal{C}$	Formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène)	4	3	3	3.33	3
7	e-g	Formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène)	3	3	2	2.66	2
8	Lv	Dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épicalastiques (Miocène à Pléistocène)	1	3	2	2	1
9	h	Formations continentales paléozoïques (Stéphanien)	1	1	1	1	1

Illustration 30 - Susceptibilité des formations argileuses retenues

6.2. SYNTHÈSE

Deux formations argileuses apparaissent ainsi comme fortement susceptibles dans le département de la Haute-Loire, celle des "*Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène)*" et les "*Formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène)*", alors que deux formations sont jugées moyennement susceptibles, et cinq faiblement susceptibles. Au final, 2,67 % de la superficie départementale est donc classé en susceptibilité forte vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement, 8,84 % en susceptibilité moyenne, et environ 8 % en susceptibilité faible. Le reste, soit 80,50 % de la surface départementale, est donc considéré comme *a priori* non argileux, et donc en principe non exposé à ce risque (Illustration 31).

N°	Notation	Nom de la formation	Superficie (km²)	% du département	Niveau de susceptibilité
5	e-m	Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène)	94.25	1.88%	3
6	⊗-⊘	Formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène)	39.40	0.79%	3
Total formation en susceptibilité forte			133.65	2.67%	
3	C	Dépôts quaternaires - Formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers	365.56	7.30%	2
7	e-g	Formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène)	76.95	1.54%	2
Total formation en susceptibilité moyenne			442.51	8.84%	
1	F	Dépôts quaternaires peu argileux - Alluvions, tourbières et formations associées	176.67	3.53%	1
2	Farg	Dépôts quaternaires à dominante argilo-sableuse - Alluvions et dépôts fluvio-lacustres	142.04	2.84%	1
4	⌘	Produits in situ d'altération météorique - arènes granitiques	58.81	1.17%	1
8	Lv	Dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épicastiques (Miocène à Pléistocène)	7.62	0.15%	1
9	h	Formations continentales paléozoïques (Stéphanien)	15.33	0.31%	1
Total formation en susceptibilité faible			400.47	8.00%	
Total de formations argileuses			976.63	19.50%	
Total de formations à priori non argileuses			4030.62	80.50%	
Total départemental			5007.27	100,00%	

Illustration 31 – Superficie des formations par niveau de susceptibilité

6.3. CARTE DE SUSCEPTIBILITÉ

L'illustration 32 représente la carte départementale de susceptibilité au phénomène de retrait-gonflement, réalisée d'après les résultats présentés dans le tableau de

l'illustration 30. 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 carte hors-texte à l'échelle 1/125 000. Les formations sont représentées par trois couleurs (jaune, orange et rouge) 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.

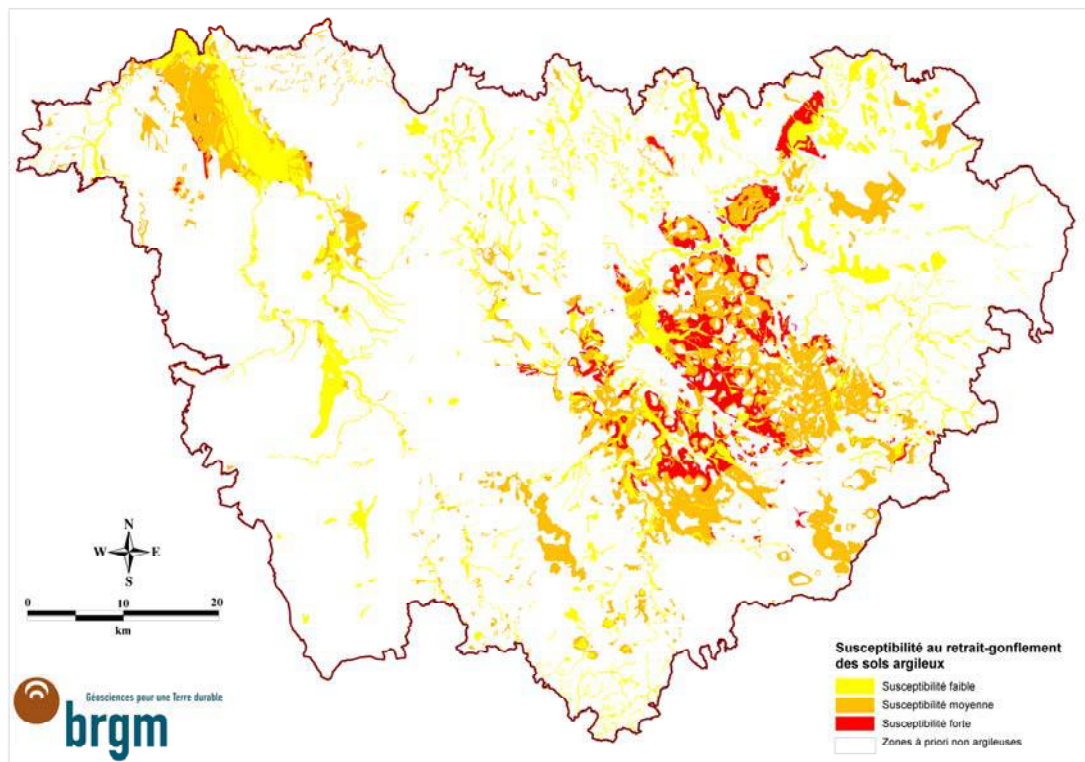


Illustration 32 - Carte de susceptibilité au retrait-gonflement dans le département de la Haute-Loire

7. Analyse de la sinistralité

7.1. RECONNAISSANCE DE L'ÉTAT DE CATASTROPHE NATURELLE

7.1.1. 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. Il est également à noter que, depuis une circulaire du 23 janvier 2008 du Ministère de l'Intérieur, de l'Outre-Mer et des Collectivités Territoriales, la présence potentielle de sols argileux dans la commune peut être déduite des cartes d'aléa retrait-gonflement publiées sur le site www.argiles.fr lorsqu'elles sont disponibles.

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.

7.1.2. Identification des communes reconnues CatNat dans la Haute-Loire

Au 20 juillet 2010, 28 des 260 communes du département ont 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 relativement modeste de 10,77 %. 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 28 dans le département, chaque commune n'ayant été reconnue que pour une seule période.

Les périodes reconnues correspondent à l'été 2003 pour 27 de ces communes, celle de Cussac-sur-Loire étant la seule commune du département à avoir été reconnue pour une période antérieure à l'été 2003 (de janvier 1995 à décembre 1997).

A ce jour (20 juillet 2010), 8 arrêtés interministériels successifs reconnaissant l'état de catastrophe naturelle sécheresse ont été pris dans le département de la Haute-Loire, dont les dates s'échelonnent entre le 26 mai 1998 et le 2 mars 2006. L'illustration 33 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 J.O.	Nombre de communes reconnues
26/05/1998	11/06/1998	1
25/08/2004	26/08/2004	5
11/01/2005	01/02/2005	2
27/05/2005	31/05/2005	8
22/11/2005	13/12/2005	8
09/01/2006	22/01/2006	1
06/02/2006	14/02/2006	1
02/03/2006	11/03/2006	2

Illustration 33 - Arrêtés interministériels et occurrences

D'après les données disponibles sur le site internet www.prim.net du ministère chargé de l'environnement, ce nombre d'occurrences reconnues place la Haute-Loire à la 48^{ème} position des départements français les plus touchés, loin derrière certains du sud-ouest (1 412 occurrences reconnues en Haute-Garonne, 1 253 dans le Gers, 1 072 en Dordogne, par exemple).

La liste des communes concernées est présentée en Annexe 3, ainsi que les dates des arrêtés interministériels et les dates de leur parution au Journal Officiel.

7.2. PROCEDURE EXCEPTIONNELLE

Face aux nombreuses demandes de reconnaissance CatNat insatisfaites pour l'été 2003, une procédure exceptionnelle a été prévue par l'article 110 de la loi de finance pour 2006, au profit des sinistrés des 3 300 communes non reconnues CatNat (sur 8 000 communes concernées).

Elle consiste en une enveloppe initialement d'un montant de 180 millions (dont 30 millions affectés aux communes limitrophes des communes reconnues Cat Nat), au titre de la solidarité nationale. Le montant de l'enveloppe a été porté à 218,5 millions d'euros par l'article 142 de la loi de finances rectificative pour 2006 afin d'augmenter les aides au profit des communes non limitrophes de communes reconnues CatNat.

Les dossiers éligibles concernaient les désordres survenus sur les bâtiments à usage d'habitation principale, et situés dans une commune ayant formulé une demande reconnaissance CatNat avant le 1^{er} juin 2005, et n'ayant pas été reconnue, avec pour objectif de prendre en charge les mesures de confortement nécessaires au rétablissement de l'intégralité de la structure, du clos et du couvert, sans notion esthétique.

Au final, 2 370 communes ont été concernées dans 71 départements, avec 19 000 demandeurs pour 12 079 bénéficiaires (soit les 2/3), et seulement 356 recours. Pour le département de la Haute-Loire, 15 dossiers ont été reconnus éligibles sur 46 déposés, pour une indemnité totale d'environ 336 k€ (source : rapport interministériel "Boutin", 2007).

Les neuf communes de la Haute-Loire concernées par ces procédures exceptionnelles sont Bournoncle-Saint-Pierre, Brioude, Cohade, Frugères-Les-Mines, Lempdes-Sur-Allagnon, Le Monastier-Sur-Gazeille, Saint-Julien-Chapteuil, Saint-Pierre-Eynac et Vezézoux.

7.3. COLLECTE DES DONNÉES DE SINISTRES

Le recensement des sinistres a été réalisé à partir de sources d'information qui se complètent mutuellement, à savoir une enquête systématique auprès de l'ensemble des communes du département, la consultation des dossiers archivés tant auprès de la Préfecture de la Haute-Loire que de la Caisse centrale de réassurance (CCR), et enfin le recueil des données auprès de bureaux d'études géotechniques (Illustration 27). Tous les sinistres recensés ont pu être localisés avec une précision suffisante pour l'étude.

L'enquête effectuée auprès de l'ensemble des communes du département s'est faite par envoi d'un courrier aux maires de chacun des 260 communes. Un courrier de relance a ensuite été envoyé à toutes les communes n'ayant pas encore répondu, et une relance téléphonique ciblée sur les communes reconnues en état de catastrophe naturelle ou situées dans des secteurs potentiellement sujets au retrait-gonflement a été effectuée. Le taux de réponse final atteint plus de 98 % (255 communes sur 260). Chacune des 28 communes reconnues à ce jour en état de catastrophe naturelle a effectivement répondu à l'enquête en nous transmettant des dossiers complets avec localisation des sinistres recensés et études de sol. De nombreux sinistres supplémentaires ont été recensés via des bureaux d'étude.

En définitive, ce sont 384 sites de sinistres, répartis dans 35 communes, qui ont été recensés et localisés. Ce résultat, relativement exhaustif, peut être considéré comme représentatif de la sinistralité du département.

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 envoyés par les communes ou figurant dans les dossiers préfectoraux et les rapports d'études

géotechniques, ainsi que par la consultation des sites internet www.cadastre.gouv.fr, www.viamichelin.fr, www.geoportail.fr et www.pagesjaunes.fr/.

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

7.4. ANALYSE DE LA SINISTRALITE DANS LE DEPARTEMENT

7.4.1. Périodes de sinistralité

Sur les 28 communes reconnues en état de catastrophe naturelle, une seule (celle de Cussac-sur-Loire) avait fait l'objet d'un arrêté de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour les tassements différentiels liés à la sécheresse avant 2003, et ce pour une période allant de janvier 1995 à fin décembre 1997.

Toutes les autres communes ont fait l'objet d'un arrêté de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour les tassements différentiels liés à la sécheresse de 2003, et ce pour une période allant du 1^{er} juillet 2003 à fin septembre 2003. On peut également noter que la quasi-totalité des sinistres localisés a été signalée comme étant due à la sécheresse de l'été 2003.

On peut également constater que la plupart des sinistres recensés lors de cette étude sont localisés dans des communes déjà reconnues en état de catastrophe naturelle. En effet, au total, seuls 62 sinistres recensés sont localisés hors des communes ayant obtenu une reconnaissance en état de catastrophe naturelle. Pour ces communes, soit une demande est en cours, soit une demande a été faite et refusée. Le récapitulatif de ces sinistres figure dans l'illustration ci-après. (Illustration 34).

INSEE commune	Nom Commune	Nombre de sinistres recensés
43038	Bournoncle-Saint-Pierre	4
43040	Brioude	11
43070	Chilhac	1
43074	Cohade	7
43119	Lavoute-sur-Loire	2
43120	Lempdes-sur-Allagnon	10
43135	Le Monastier-sur-Gazeille	3
43173	Saint-Christophe-d'Allier	3
43200	Saint-Julien-Chapteuil	8
43204	Saint-Julien-Molhesabate	1
43218	Saint-Pierre-Eynac	9
43261	Vezezoux	3
TOTAL		62

Illustration 34 - Nombre de sinistres recensés hors communes reconnues CATNAT

7.4.2. Répartition de la sinistralité

La carte de l'illustration 35 permet de visualiser le nombre de sinistres par commune, recensés dans le cadre de la présente étude, ainsi que les 28 communes qui ont fait l'objet d'un arrêté de reconnaissance à ce jour.

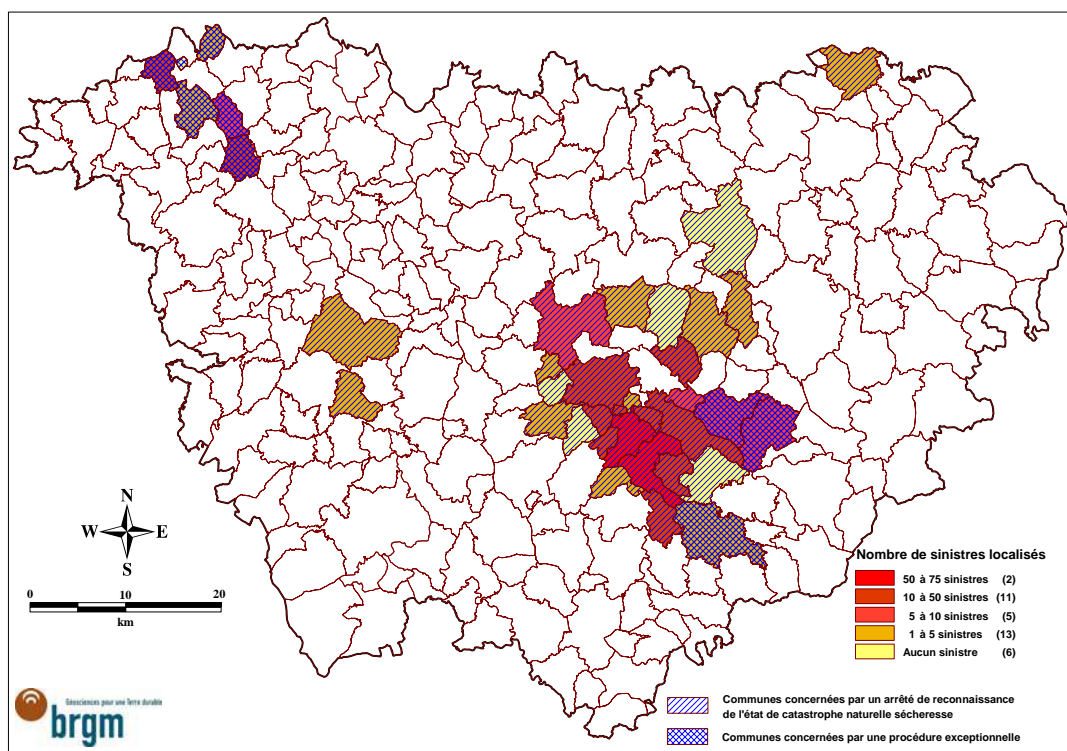


Illustration 35 - Communes concernées par des arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse et nombre de sinistres recensés et localisés

Le nombre de sinistres par commune peut être important comme pour les communes du Puy-en-Velay (59 sinistres) ou de Coubon (75 sinistres). Certaines des communes ayant fait l'objet d'un arrêté de reconnaissance n'ont pas signalé de sinistres ou ont renvoyé des documents trop imprécis pour être traités dans le cadre de la présente étude.

Seuls 322 sinistres sur les 384 recensés sont effectivement localisés dans les communes reconnues en état de catastrophe naturelle, alors que les 62 restants se répartissent dans 12 communes qui n'ont encore jamais été reconnues en état de catastrophe naturelle sécheresse (demande en cours ou demande refusée).

L'examen des données recueillies indique que 85 % des sinistres localisés (325 sinistres) sont répartis sur les formations argilo-marneuses retenues comme étant sujettes au phénomène de retrait-gonflement, ces dernières n'occupant que 19,51 % de la surface du département (Illustration 36). 59 sinistres se situent sur des formations

volcaniques en dehors des zones d'affleurement de formations retenues comme *a priori* argilo-marneuses.

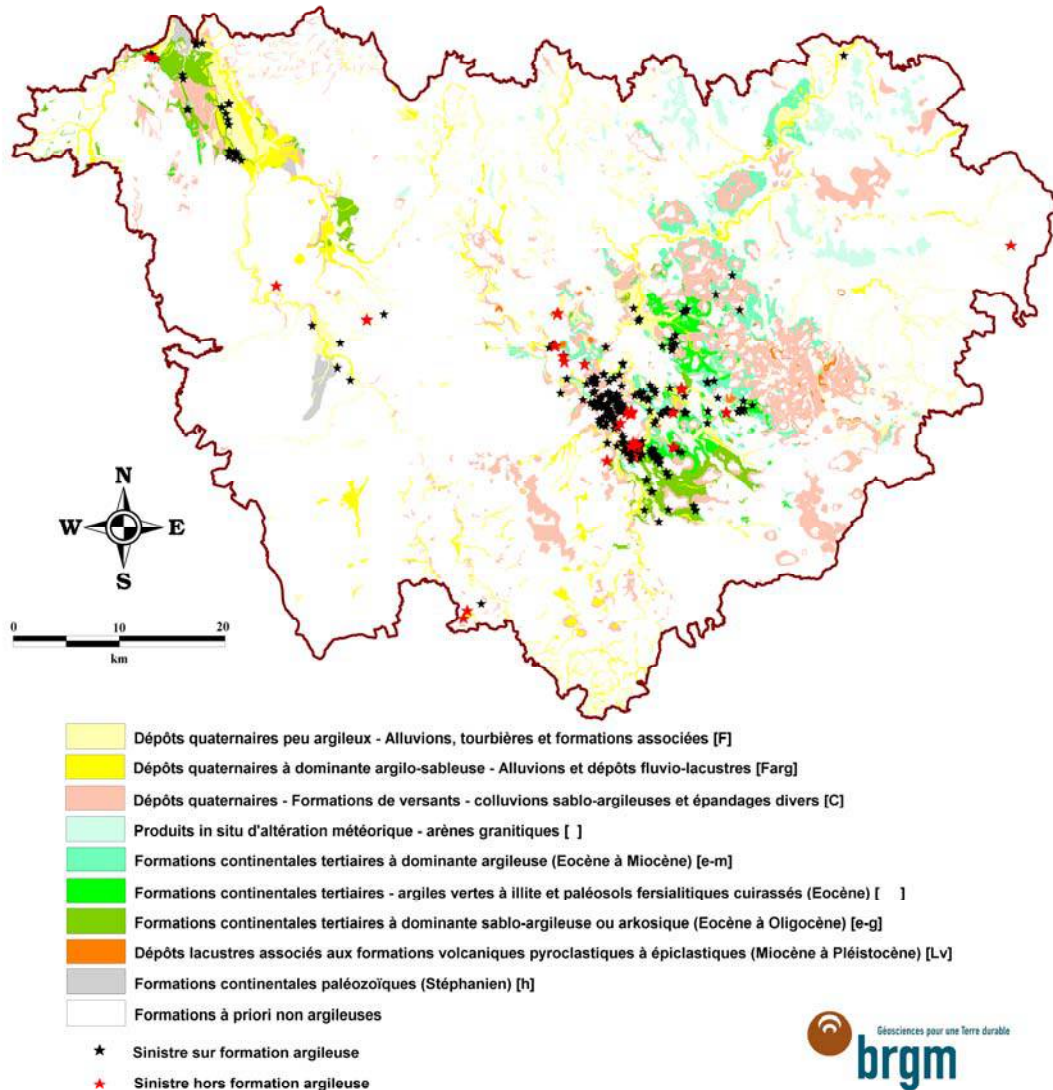


Illustration 36 – Répartition géologique des sinistres localisés

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 magmatiques ou métamorphiques. Par ailleurs, il peut arriver que des sinistres attribués au retrait-gonflement des argiles soient dus en réalité à d'autres phénomènes (affaissement liés à des cavités souterraines, tassement de remblais ou de sols compressibles, fluages sur des colluvions instables, défauts de construction, choc thermique sur les enduits de façade, etc.). Enfin, il n'est pas exclu que certains

contours de formations géologiques puissent être localement inexacts ou que des sinistres soient mal localisés.

Parmi les 9 formations retenues comme argileuses au sens large, 6 se distinguent par un nombre de sinistres supérieur ou égal à 10 :

- les "*Dépôts quaternaires peu argileux - Alluvions, tourbières et formations associées (F)*" avec 42 sinistres ;
- les "*Dépôts quaternaires à dominante argilo-sableuse - Alluvions et dépôts fluvio-lacustres (Farg)*" avec 11 sinistres ;
- les "*Dépôts quaternaires - Formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers (C)*" avec 163 sinistres ;
- les "*Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène) (e-m)*" avec 51 sinistres ;
- les "*Formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène) (p-é)*" avec 25 sinistres ;
- les "*Formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène) (e-g)*" avec 33 sinistres.

Il faut cependant noter que les formations quaternaires affleurent assez largement sur le département (près de 690 km² cumulés pour 216 sinistres), ce qui modère en réalité la densité de sinistres de ces formations. Les formations continentales tertiaires affleurent moins (près de 210 km² cumulés pour 109 sinistres), ce qui en fait des formations relativement sinistrées.

Parmi les 9 formations argilo-marneuses retenues, 3 ne comptent aucun sinistre recensé à ce jour. Il s'agit des "*Produits in situ d'altération météorique - arènes granitiques (A)*", des "*Dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épicastiques (Miocène à Pléistocène) (Lv)*" et des "*Formations continentales paléozoïques (Stéphanien) (h)*".

Cette absence de sinistres peut en partie s'expliquer par des surfaces d'affleurement relativement réduites, seule une de ces formations affleure sur plus de 50 km², les autres affleurant sur moins de 20 km², ce qui induit un faible nombre de constructions exposées.

7.5. FRÉQUENCE D'OCCURRENCE RAPPORTÉE A LA SURFACE BATIE

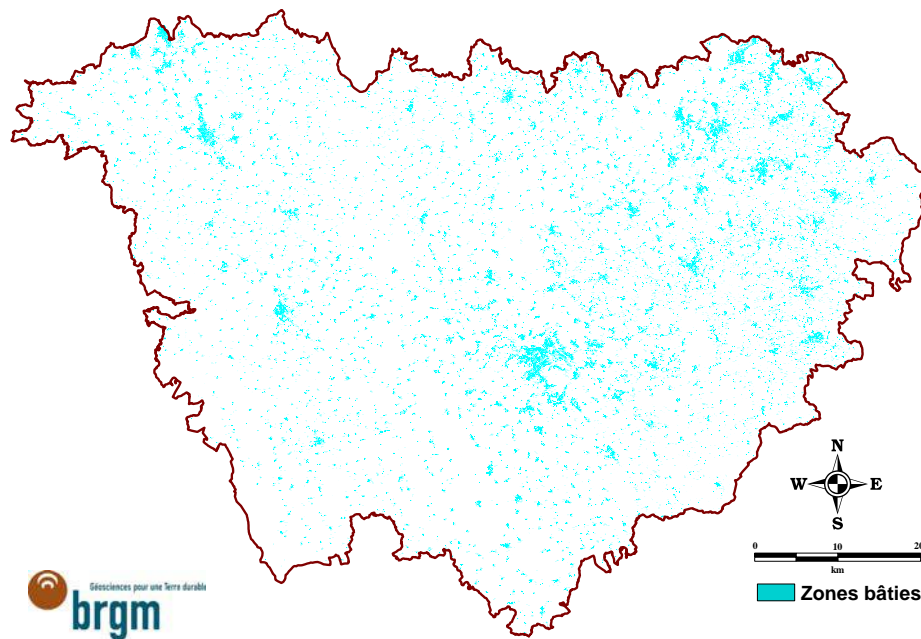
Étant donné que les surfaces d'affleurement des différentes formations géologiques sont extrêmement variables, il est important de raisonner sur les densités de sinistres par formation géologique (ramenées à 100 km² de surface d'affleurement).

Cependant, il faut garder à l'esprit que l'urbanisation n'est pas uniforme sur l'ensemble du département et cela pourrait donc biaiser l'analyse sur les densités de sinistres par formation. En effet, une formation géologique s'étendant principalement en milieu rural peu bâti sera nécessairement moins touchée qu'une formation aussi susceptible mais très urbanisée. C'est pourquoi les densités de sinistres par formation géologique ont

été rapportées à 100 km² de surface effectivement bâtie, conformément à la méthodologie retenue au niveau national.

7.5.1. Détermination de la densité d'urbanisation par formation

Les contours des zones bâties (Illustration 37) du département sont issus des données de la couche « bâti » de la BDTopo de l'IGN, mise à disposition par la DREAL Auvergne dans le cadre de cette étude.



**Illustration 37 – Carte des zones bâties sur le département de la Haute-Loire
(source des données : BDTopo IGN)**

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.

La surface totale des zones bâties du département a été ainsi estimée à environ 28,50 km², soit 0,57 % de la superficie départementale.

La superposition de la carte synthétique des formations argileuses et marneuses avec celle des zones bâties permet d'estimer la surface totale occupée par les zones bâties dans les formations retenues comme argileuses à 10,26 km², soit près de 0,61 % 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 38.

N°	Notation	Nom de la formation	Surface d'affleurement		Densité de sinistres		Densité de sinistres ramenés à la surface		Note de densité de sinistre
			Superficie (km ²)	% de superficie	Nb sinistres	Sinistres pour 100 km ² d'affleurement	Surface bâtie (km ²)	Nb de sinistres pour 100 km ² de surface bâtie	
1	F	Dépôts quaternaires peu argileux - Alluvions, tourbières et formations associées	176,67	3,53%	42	23,77	2,50	1680,00	1
2	Farg	Dépôts quaternaires à dominante argilo-sableuse - Alluvions et dépôts fluviolacustres	142,04	2,84%	11	7,74	1,02	1078,43	1
3	C	Dépôts quaternaires - Formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers	365,56	7,30%	163	44,59	3,31	4924,47	3
4	Æ	Produits in situ d'altération météorique - arènes granitiques	58,81	1,17%	0	0	0,58	0,00	1
5	e-m	Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène)	94,25	1,88%	51	54,11	1,34	3805,97	2
6	⊗-⊘	Formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène)	39,40	0,79%	25	63,45	0,44	5681,82	3
7	e-g	Formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène)	76,95	1,54%	33	42,88	0,88	3750,00	2
8	Lv	Dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épicastiques (Miocène à Pléistocène)	7,62	0,15%	0	0	0,03	0,00	NS
9	h	Formations continentales paléozoïques (Stéphanien)	15,33	0,31%	0	0	0,30	0,00	1
Total formations argileuse			976,63	19,50%	325	33,28	10,39	3125	
Formations a priori non argileuse			4030,62	80,50%	59	1,46	18,11	325,97	
Total département			5007,25	100,00%	384	7,67	28,50	1347,37	

Illustration 38 - Sinistralité et notes de densité de sinistres

7.5.2. Détermination du critère densité de sinistres

Les éléments décrits dans la méthodologie permettent de calculer des densités de sinistres par formation géologique, en prenant en compte la surface 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 38). La densité moyenne ainsi obtenue pour les formations argileuses est de l'ordre de 3 125 sinistres pour 100 km² d'affleurement réellement bâti.

Il est important de noter que pour 1 des 9 formations considérées, le critère de sinistralité ne peut être jugé comme significatif (noté N.S. sur l'illustration 38) en raison de la trop faible surface bâtie qu'elle présente. Il s'agit des *Dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épicastiques (Miocène à Pléistocène)* (0 sinistre pour 0,03 km² bâtis).

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 faible à moyenne, voire forte.

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. Les coupures utilisées pour l'attribution de notes caractérisant la sinistralité sont les suivantes :

- *note 1 : moins de 2 000 sinistres pour 100 km² de surface bâtie dans la formation ;*
- *note 2 : entre 2 000 et 4 000 sinistres pour 100 km² de surface bâtie dans la formation ;*
- *note 3 : plus de 4 000 sinistres pour 100 km² de surface bâtie dans la formation.*

Les notes de sinistralité ainsi attribuées sont précisées dans le tableau de l'illustration 38. Deux formations présentent une sinistralité particulièrement élevée matérialisée par plus de 4 000 sinistres pour 100 km² d'affleurement bâti, soit le double de la densité moyenne :

- *les dépôts quaternaires - Formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers*
- *les formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène)*

Deux formations obtiennent une note de densité de sinistres moyenne de 2 :

- *les formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène)*
- *les formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène)*

Les formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène) et les formations continentales tertiaires (argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés d'âge éocène) sont des formations par ailleurs affectées d'une susceptibilité forte.

Il est à noter que ce niveau de sinistralité reste faible par rapport à celui obtenu jusqu'à présent dans une soixantaine 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 souvent été évaluée avec d'autres outils, moins précis). Toutefois, cette densité moyenne de sinistres reste inférieure à celle obtenue de la même manière dans des départements comme la Drôme, les Landes, la Loire ou la Loire-Atlantique, caractérisés également par une sinistralité modérée. Elle est naturellement très inférieure à celle calculée dans plusieurs départements de la région Ile-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 une valeur de 1, 2 ou 3.

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 pour laquelle cette grandeur 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 densité de sinistres et le double de la note de susceptibilité. La valeur ainsi obtenue est un entier potentiellement compris entre 3 et 9. Les formations sont ensuite hiérarchisées (Illustration 39) 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.

Lorsque la note de densité de sinistres a été jugée non significative, elle n'entre pas en compte dans ce calcul et le niveau d'aléa est égal à la note de susceptibilité.

Deux formations sont ainsi classées en aléa fort vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement des argiles, les "*Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène)*" et les "*Formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène)*", et ceci par comparaison avec d'autres départements couverts précédemment selon la même méthodologie et en appliquant les mêmes critères de hiérarchisation (le critère de sinistralité restant quant à lui déterminé à l'échelle départementale). Ces formations couvrent 2,67 % de la superficie départementale (Illustration 40).

N°	Notation	Nom de la formation	Superficie (km ²)	Note lithologique	Note minéralogique	Note géotechnique	Note de susceptibilité	Sinistralité	Indice d'aléa	Niveau d'aléa
1	F	Dépôts quaternaires peu argileux - Alluvions, tourbières et formations associées	176,67	1	1	2	1	1	3	1
2	Farg	Dépôts quaternaires à dominante argilo-sableuse - Alluvions et dépôts fluvio-lacustres	142,04	2	1	2	1	1	3	1
3	C	Dépôts quaternaires - Formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers	365,56	3	2	2	2	3	7	2
4	ℳ	Produits in situ d'altération météorique - arènes granitiques	58,81	1	2	1	1	1	3	1
5	e-m	Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène)	94,25	4	3	3	3	2	8	3
6	ℳ-ℳ	Formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène)	39,40	4	3	3	3	2	9	3
7	e-g	Formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène)	76,95	3	3	2	2	2	6	2
8	Lv	Dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épicycliques (Miocène à Pléistocène)	7,62	1	3	2	1	NS	3	1
9	h	Formations continentales paléozoïques (Stéphanien)	15,33	1	1	1	1	1	3	1

Illustration 39 – Niveau d'aléa des formations

N°	Notation	Nom de la formation	Superficie (km ²)	% du département	Niveau d'aléa
5	e-m	Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène)	94,25	1,88%	3
6	ℳ-ℳ	Formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène)	39,40	0,79%	3
Total formation en niveau d'aléa fort			133,65	2,67%	
3	C	Dépôts quaternaires - Formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers	365,56	7,30%	2
7	e-g	Formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène)	76,95	1,54%	2
Total formation en niveau d'aléa moyen			442,51	8,84%	
1	F	Dépôts quaternaires peu argileux - Alluvions, tourbières et formations associées	176,67	3,53%	1
2	Farg	Dépôts quaternaires à dominante argilo-sableuse - Alluvions et dépôts fluvio-lacustres	142,04	2,84%	1
4	ℳ	Produits in situ d'altération météorique - arènes granitiques	58,81	1,17%	1
8	Lv	Dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épicycliques (Miocène à Pléistocène)	7,62	0,15%	1
9	h	Formations continentales paléozoïques (Stéphanien)	15,33	0,31%	1
Total formation en niveau d'aléa faible			400,47	8,00%	
Total de formations argileuses			976,63	19,50%	
Total de formations à priori non argileuses			4030,62	80,50%	
Total départemental			5007,25	100,00%	

Illustration 40 - Classement des formations en fonction de leur niveau d'aléa

Deux formations présentent un aléa moyen, résultant d'une susceptibilité moyenne et d'une sinistralité moyenne, il s'agit des "Dépôts quaternaires - Formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers" et des "Formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène)". Ces formations couvrent 8,84 % de la superficie départementale.

Par ailleurs, cinq formations, couvrant 8,00 % de la superficie départementale sont considérées comme présentant un aléa faible vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Elles résultent d'une susceptibilité faible assortie d'une sinistralité faible.

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 41 et en carte hors-texte à l'échelle 1/125 000 (où les sinistres, les zones urbanisées et les contours des communes sont également reportés). Son échelle de validité est le 1/50 000, puisque les contours sont issus des cartes géologiques à cette même échelle.

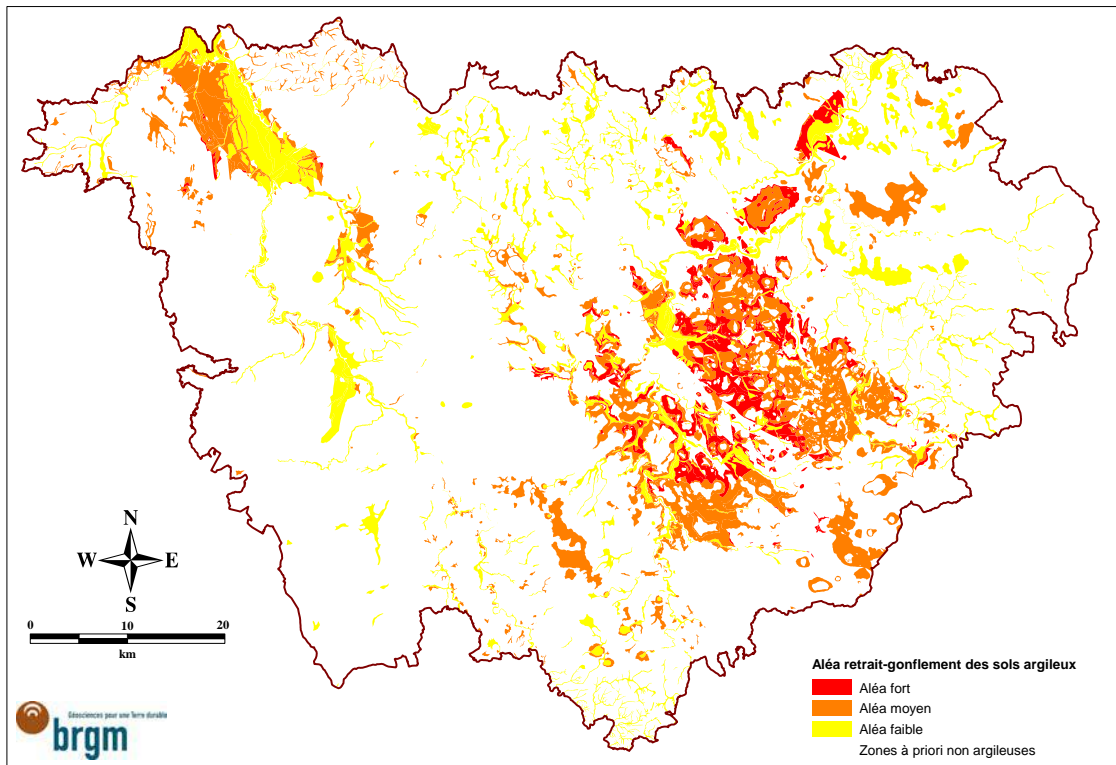


Illustration 41 – Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement de la Haute-Loire

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

Les zones blanches de la carte correspondent aux formations *a priori* non argileuses, et donc théoriquement dépourvues de tout aléa. Elles couvrent 80,50 % de la superficie départementale.

Il n'est toutefois pas exclu que, sur ces derniers secteurs considérés d'aléa *a priori* nul, se trouvent localement des zones argileuses d'extension limitée, notamment dues à l'hétérogénéité de certaines formations essentiellement sableuses ou à l'altération localisée de formations primaires.

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.

8.3. COHERENCE AVEC LES DEPARTEMENTS LIMITOPHES

Parmi les départements limitrophes de la Haute-Loire, seuls trois disposent d'ores-et-déjà d'une carte d'aléa publiée. Il s'agit des départements de la Lozère (48), de l'Ardèche (07) et de la Loire (42). L'illustration 42 juxtapose ces 3 cartes d'aléa, ainsi que celle établie pour le Cantal (publication en cours), à celle de la Haute-Loire. La carte d'aléa du dernier département limitrophe, le Puy-de-Dôme (63) est en cours de finalisation.

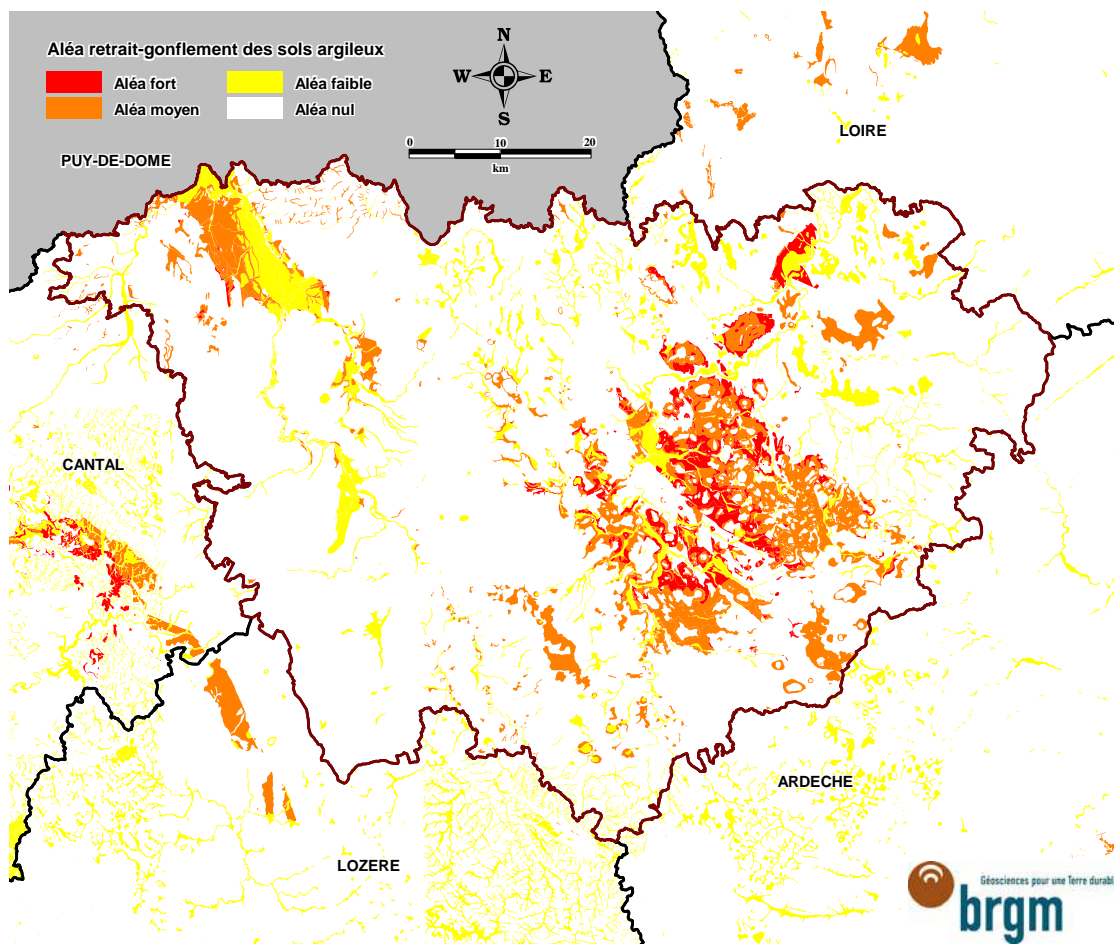


Illustration 42 - Juxtaposition des cartes d'aléa limitrophes de la Haute-Loire

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

Par rapport aux départements du Cantal, de la Lozère, de l'Ardèche et de la Loire, il n'apparaît pas de discontinuités significatives, et seuls quelques polygones changent de niveau d'aléa à l'interface entre les départements, ce qui s'explique principalement soit par quelques différences d'interprétation lors de l'harmonisation, soit par des variations latérales de faciès.

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 de la Haute-Loire. La démarche retenue est fondée essentiellement sur une interprétation de la carte géologique et sur la synthèse d'un grand nombre d'informations concernant la susceptibilité au phénomène des formations à dominante argileuse, ainsi que sur la localisation des sinistres liés aux mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols.

Cette démarche s'inscrit dans le cadre d'une méthodologie générale développée par le BRGM à la demande du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer et de la profession des assureurs. Mise au point lors d'études similaires menées dans les Alpes de Haute-Provence et les Deux-Sèvres, elle a ensuite été appliquée à plus de 80 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 9 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, vermiculites et interstratifiés smectites/illite, voire illites) 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

bâtie, ceci afin de permettre des comparaisons fiables entre elles. Au total, 384 sinistres répartis dans 35 communes du département ont ainsi été recensés et localisés. Cet échantillon, bien qu'assurément non exhaustif, paraît largement représentatif du phénomène tel qu'il a été observé à ce jour dans le département.

En appliquant au département de la Haute-Loire la méthodologie mise au point au niveau national, trois niveaux d'aléa (fort, moyen et faible) ont été distingués afin de caractériser les formations argileuses ou marneuses vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Sur une superficie départementale totale de 5 007 km²,

- 2,67 % de cette surface est ainsi classée en aléa fort ;
- 8,84 % est caractérisée par aléa moyen ;
- 8,00 % par un aléa faible ;
- 80,50 % correspond à des zones *a 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 de la Haute-Loire, dont l'échelle de validité est le 1/50 000 et qui est présentée sous forme de planche hors-texte à l'échelle 1/125 000, pourra servir de base à des actions d'information préventive dans les communes les plus touchées par le phénomène. Elle constitue également le préalable à l'élaboration de Plans de prévention des risques naturels (PPRN), en vue d'attirer l'attention des constructeurs et maîtres d'ouvrages sur la nécessité de respecter certaines règles constructives préventives dans les zones soumises à l'aléa retrait-gonflement, en fonction du niveau de celui-ci. Cet outil réglementaire devra insister sur l'importance d'une étude géotechnique à la parcelle comme préalable à toute construction nouvelle dans les secteurs concernés par les formations géologiques à aléa moyen ou faible, notamment en raison de la forte hétérogénéité des formations du département. A défaut, il conviendra de mettre en 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.

Bertin C., collab. **Rouzaire D.** (2007) - Synthèse des données bibliographiques sur les eaux souterraines du département de la Haute-Loire. Rapport BRGM/RP-55441-FR. 34 p.

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.

Chamina Edition, (2003) - Le volcanisme en Auvergne, Guide Chamina n°901

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

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

Colas B., collab. **Le Strat P.** (2010) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de la Lozère. Rapport BRGM/RP-57711-FR. 94 p., 47 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t..

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

Gabis V. (1963) - Etude minéralogique et géochimique de la série sédimentaire oligocène du Velay. *Bull. Soc. franç. Minér. Crist.*, LXXXVI, p. 315-354.

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

Logeais P., Plat E., collab. **Imbault M.** (2009) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Loire. Rapport BRGM/RP-57391-FR, 131 p., 48 ill., 5 ann., 3 cartes h.-t.

Plat E., Logeais P., Elineau S., M. Blondin, collab. **Saint Martin M. et Imbault M.** (2009) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de l'Ardèche. Rapport BRGM/RP-57688-FR, 176 p., 53 ill., 5 ann., 3 cartes h.-t.

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

Prognon P., Chèvremont P., Rocher P., Nehlig P., Jaques E. (2009) - Carte géologique harmonisée du département de la Haute-Loire (43) - Notice géologique. *Rapport BRGM/RP- 56860-FR*, 234 p., 9 Fig., 3 tab., 1 pl. h.-t.

Saint Martin M., Rocher P., K. Lechat (2010) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Cantal. *Rapport BRGM/RP-58889-FR*, 140 p., 45 ill., 6 ann., 3 cartes h.-t.

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

Vincent M., Le Nindre Y.M., Meisina C., Chassignol A.L. (1998) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département des Deux-Sèvres. *Rapport BRGM R 39967*, 89 p.

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

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

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

Autres références thématiques

- AFNOR** (1995 a) - Géotechnique. Essais de reconnaissance des sols. AFNOR, T1.
- AFNOR** (1995 b) - Essai de gonflement à l'oedomètre. Norme française XP P94-091.
- AFNOR** (1997) - Essai de dessiccation : détermination conventionnelle de la limite de retrait sur le passant à 400 µm d'un matériau. Norme française XP P94-060-1.
- Alba J.M., Dufor M.** (1993) - Phénomènes de gonflement-retrait dans les sols marno-argileux. *Ann. Inst. Tech. BTP.*, Sols et Fondations, 514 p.
- Audiguier M., Geremew Z., Laribi S., Cojean R.** (2007) - Caractérisation au laboratoire de la sensibilité au retrait-gonflement des sols argileux. *Revue Française de Géotechnique* n° 120-121, 4^{ème} trim. 2007, pp. 67-82.
- Belantour N., Tacherifet S., Pakzad M.** (1997) - Étude des comportements mécanique, thermo-mécanique et hydro-mécanique des argiles gonflantes et non gonflantes fortement compactées. *Rev. Fr. Géotech.*, 78, pp. 31-50.
- Biddle P.G.** (1983) - Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils. *Géotechnique*. Vol. XXXIII, pp. 107-126.
- Bigot G. et Zerhouni M.** (2000) - Retrait, gonflement et tassement des sols fins. *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 229, pp. 105-114.
- Bordes M., Després R.** (2008) - Exemples concrets et illustrés des effets des périodes de sécheresse prolongée sur des constructions situées sur des sols argileux à fort aléa. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008*, éd. du LCPC, Paris, pp. 367-375.
- Bozozuk M.** (1962) - Soil shrinkage damages shallow foundations at Ottawa, Canada. *Division of Building Research NRCC Canada*, Research paper 63.
- Bréda N., Granier A., Aussenac G.** (2004) - La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Rev. For. LVI*, février 2004, pp. 109-131.
- Caillère S., Hénin, S., Rautureau M.** (1989) - Les argiles. *Éd. Septima*, Paris.
- Carrière M., Chevalier M., Toulemont M., Verdier M.** (1996) - Sécheresse et catastrophe naturelle. Aspects techniques, juridiques et administratifs. « Le comportement des sols et des ouvrages pendant et après les périodes de sécheresse ». Journées d'étude de l'École des Ponts, Paris, 11-12/12/1996.
- Choisnel E., Noilhan J.** (1995) - La prévention des sécheresses. *La Recherche*, 272, vol. 26, p. 34-40.
- Coquet Y.** (1995) - Étude *in situ* des phénomènes de retrait-gonflement des sols. Application à deux sols tropicaux peu gonflants. Thèse Univ. d'Orléans.
- Cui M.** (1996) - Les apports de la mécanique des sols non saturés. « Le comportement des sols et des ouvrages pendant et après les périodes de sécheresse ». Journées d'étude de l'École des Ponts, Paris, 11-12/12/1996.
- Driscoll R.** (1983) - The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain. *Geotechnique*. Vol. XXXIII, pp. 93-105.

- Dumas P., Chavarot A., Legrand H., Macaire A., Dimitrov C., Martin X., Queffelec C.** (2005) - Rapport particulier sur les risques de subsidence dus à la sécheresse – Mission d'enquête sur le régime d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles. *Inspection générale des Finances* n° 2005-M-020-07, *Conseil général des Ponts et Chaussées* n° 2004-0304-01, *Inspection générale de l'Environnement* n° IGE/05/006.
- Filliat G.** (1981) - La pratique des sols et fondations – Éditions du Moniteur. N°/ISBN : 2-86282-162-4.
- Fityus SG., Smith DW., Allman MA.** (2004) - An expansive soil test site near Newcastle. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(7), pp. 686-695.
- Flavigny E.** (1992) - Discussion de l'article « Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie ». *Rev. Fr. Géotech.*, n° 57, 59, pp. 75-78.
- Gillot J.S.** (1987) - Clay in engineering geology. In Elsevier (Éd.): *Developments in Geological Engineering*, 41, 469 p.
- Gouvenot D., Modaresi A.** (2007) - L'état de sécheresse exceptionnelle et ses conséquences sur l'habitat. *Experts*, n° 75, juin 2007, pp. 54-58.
- Havard M.** (1996) - Travaux de terrassements et ouvrages en terre. « Le comportement des sols et des ouvrages pendant et après les périodes de sécheresse ». Journées d'Étude de l'École des Ponts, Paris, 11/12/1996.
- Holtzapffel T.** (1985) - Les minéraux argileux : préparation, analyse diffractométrique et détermination. *Mém. Soc. Géol. Nord*, 12, 136 p.
- Kert C.** (1999) - Les techniques de prévision et de prévention des risques naturels en France. Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. N° 1540 Assemblée Nationale, n° 312 Sénat, avril 1999.
- Jacquard C.** (2007) - Pathologie des fondations superficielles sur sols argileux. Retour d'expérience en Midi-Pyrénées. *Revue Française de Géotechnique* n° 120-121, 4^{ème} trim. 2007, pp. 155-164.
- Lautrin D.** (1989) - Utilisation pratiques des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, 160, pp. 29-41.
- Madsen M.T., Müller-Vonmoos M.** (1989). The swelling behaviour of clays. In Elsevier (Éd.) : *Applied Clay Science*, 4, pp. 143-156.
- Madiou H., Lechani M., Hannachi N.** (1997) - Patholex : un système expert pour la pathologie dans la construction. Le cas de la sécheresse. *Sécheresse*, 3, 8, pp. 201-206.
- Magnan D.** (1993) - Caractérisation *in situ* des sols gonflants : l'essai expansol. Thèse de doctorat Univ. Joseph Fourier, Grenoble 1.
- Magnan J.P. et Youssefian G.** (1989) - Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols. *Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées*, 159, pp. 93-104.
- Mantho A.T.** (2005) - Échanges sol – atmosphère : application à la sécheresse. *Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées*, 250 p.

- Meisina C., Chassagneux D., Leroi E., Mouroux P.** (1998) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux. Proposition de méthodologie. Article et présentation au 8^e Congrès de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur et de l'environnement.
- Millot G.** (1964) - Géologie des argiles. Masson, Paris, 499 p.
- Ministère de l'Environnement, Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques, Délégation aux Risques majeurs** (1993) - Sécheresse et Construction. *Guide de Prévention*. Édit. La Documentation Française, Paris.
- Mouroux P., Margron P., Pinte J.C.** (1988) - La construction économique sur sols gonflants. *Manuel et méthodes* n°14, 125 p., BRGM Éditeur.
- Mariotti M.** (1976) - Le gonflement des sols argileux surconsolidés (aspects du phénomène, influence sur les structures, précautions à envisager). *Mines et Géologie*, 39, pp. 13-28.
- Noël C.** (1991) - Tassement de sols d'assise de fondations consécutifs à la sécheresse. L'expertise dans le cadre de la garantie « catastrophes naturelles ». SNEIC-INFO, 4.
- Norie A., Vincent M.** (2000) - Établissement de Plans de Prévention des Risques Naturels prévisibles : « mouvements différentiels de terrain liés au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux » - Approche méthodologique dans le département des Deux-Sèvres. *Rapport BRGM/RP-50591-FR*, 14 p., 4 fig., 4 ann.
- Philipponnat G.** (1978) - Désordres dus à la présence de sols gonflants dans la région parisienne. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, n° 364, p. 1-15.
- Philipponnat G.** (1991) - Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie. *Rev. Fr. Géotech.*, 57, pp. 5-22.
- Philipponnat G.** (1987) - Sols expansifs en France. Identification et recommandations pour les fondations. 6^e Int. Conf. Exp. Soils, 7-10, New Delhi.
- Plat E., Vincent M., Le Roy S., Fleureau J.-M., Masroui F., Pantet A.** (2008) - Suivi expérimental des profils hydriques et des déformations dans deux sols argileux sujets au retrait-gonflement. *Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris*, pp. 195-201.
- Plat E., Le Roy S., Vincent M.**, collab. **Sulcas E., Lecat L., Hemmati S., Surdyk N., Dubus I.** (2008) - Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique. Rapport final de phase 3. Rapport BRGM/RP-56886-FR, 111 p., 98 ill.
- Rapport interministériel "Boutin" (2007)** – Rapport du gouvernement au parlement sur l'indemnisation des dommages aux bâtiments causés par la sécheresse survenue durant l'été 2003, 66 p.
- Richards B.G., Peter P., Emerson W.W.** (1983) - The effects of vegetation on the swelling and shrinking of soils in Australia. *Geotechnique. Vol. XXXIII*, pp. 127-139.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vincent M. (2005) - Prévention du risque sécheresse : cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement des argiles et établissement de plans de prévention des

risques. Géologues (revue officielle de l'Union Française des Géologues), 146, septembre 2005, pp.43-47.

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

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

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

Cartes géologiques à 1/50 000 du BRGM

TITRE	AUTEUR(S)	DATE
<i>Feuille 741 - Besse-en-Chandesse</i>		<i>A paraître</i>
<i>Feuille 742 - Saint-Germain-Lembron</i>		<i>A paraître</i>
<i>Feuille 743 - Arlanc</i>	<i>Kornprobst J., Bouiller R., D'Arcy D., Bambier A.</i>	1983
<i>Feuille 744 - Firminy</i>		<i>A paraître</i>
<i>Feuille 745 - Saint-Etienne</i>	<i>Chenevoy M.</i>	1970
<i>Feuille 765 - Massiac</i>	<i>Thonat A., Le Garrec M.J., Mathonnat M., Sawadogo A., Teyssier C., Périchaud J.J.</i>	2006
<i>Feuille 766 - Brioude</i>	<i>Lasnier B., Marchand J., Cornen G., et al.</i>	1981
<i>Feuille 767 - Craponne-sur-Arzon</i>	<i>Ledru P., Vitel G., Marchand J., Maurien G., Mercier F., Turland M., Elitcher B., Dautria J.M., Liotard J.M.</i>	1994
<i>Feuille 768 - Monistrol-sur-Loire</i>	<i>Vitel G., Garcia M., Turland M., Gonord H., Elitcher B., Chafchafi A.</i>	2000
<i>Feuille 769 - Annonay</i>	<i>Chenevoy M., Ledru P., Feybesse J.L., Jauffret D., Elitcher B.</i>	1998
<i>Feuille 790 - Langeac</i>	<i>Marchand J. (coord.), Bouiller R., Cornen G., Burg J.P., Lasnier B.</i>	1986
<i>Feuille 791 - Le Puy-en-Velay</i>	<i>Girod M., Bouiller R.</i>	1979
<i>Feuille 792 - Yssingeaux</i>	<i>Feybesse J.L., Turland M., Nehlig P., Alsac C., Mercier-Batard F., Perichaud J.J., Vialaron C., De Bayle des Hermens R.,</i>	1998
<i>Feuille 793 - Saint-Agrève</i>	<i>Chenevoy M.</i>	1995
<i>Feuille 814 - Saugues</i>	<i>Couturié J.P.</i>	1972
<i>Feuille 815 - Cayres</i>	<i>Kornprobst J., Bouiller R., Couturié J.P., Feraud J.</i>	1978
<i>Feuille 816 - Le-Monastier-sur-Gazeille</i>		<i>A paraître</i>
<i>Feuille 838 - Saint-Chély-d'Apcher</i>	<i>Couturié J.P.</i>	1974
<i>Feuille 839 - Langogne</i>	<i>Choubert B., Girod M.</i>	1974
<i>Feuille 840 - Burzet</i>	<i>Bambier A., Berger E.T., Mergoïl J., Vadalas B., Veyret Y., Weisbrod A.</i>	1985

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Annexe 2 - Regroupement des formations harmonisées retenues pour chaque formation argileuse

NUM	NOTATION	NOM	NOTATION HARMO	DESCRIPTION HARMO	SUPERFICIE (km ²)
1	F	Dépôts quaternaires peu argileux - Alluvions, tourbières et formations associées	J	Formations alluviales - matériaux de déjection: sables et graviers, localement avec blocs	7,2782
			T	Formations alluviales - tourbières	0,9446
			FzT	Formations alluviales - alluvions modernes souvent tourbeuses	2,3241
			Fy-z	Formations alluviales - alluvions anciennes et modernes indifférenciées	36,7885
			Fy	Formations alluviales - alluvions anciennes de basse terrasse (Würm)	48,6832
			Fx	Formations alluviales - alluvions anciennes de moyenne terrasse (Riss)	12,0396
			RF	Formations alluviales - alluvions anciennes indifférenciées	9,4592
			FC	Formations alluviales - alluvions et colluvions indifférenciées	58,9235
			Fu	Formations alluviales - alluvions du Pliocène terminal	0,1421
			Fs	Formations alluviales - alluvions pliocènes	0,0878
2	Farg	Dépôts quaternaires à dominante argilo-sableuse - Alluvions et dépôts fluvio-lacustres	Fz	Formations alluviales - alluvions modernes	114,4248
			Fw	Formations alluviales - alluvions anciennes de haute terrasse	11,5130
			Fv	Formations continentales plio-quaternaires - sables argileux fluvio-lacustres à éléments volcaniques remaniés (Pliocène - Villafranchien)	16,1025
3	C	Dépôts quaternaires - Formations de versants - colluvions sablo-argileuses et épandages divers	CΦ	Formations de versants - colluvions, épandages et formations gélifluées de matériaux volcaniques acides à intermédiaires	76,1683
			Cβ	Formations de versants - colluvions, épandages et formations gélifluées de matériaux volcaniques basaltiques	89,3984
			Cv	Formations de versants - colluvions, épandages et formations gélifluées de matériaux volcaniques mixtes ou indifférenciés	43,2920
			Cγ	Formations de versants - colluvions, épandages et arènes colluvionnées de matériaux granitiques ou gneissiques	51,8736
			Cc	Formations de versants - colluvions sablo-argileuses, parfois marneuses, de matériaux sédimentaires tertiaires	28,2309
			C	Formations de versants - colluvions et épandages indifférenciées	76,5960
4	Ar	Produits in situ d'altération météorique - arènes granitiques	Ar	Produits in situ d'altération météorique - arènes granitiques indifférenciées	58,8140
5	e-m	Formations continentales tertiaires à dominante argileuse (Eocène à Miocène)	m	Formations continentales tertiaires - dépôts sablo-argileux, à niveaux de lignite (Miocène probable)	1,4570
			g-m	Formations continentales tertiaires - dépôts sablo-argileux indifférenciés (Oligocène et Miocène)	0,9669
			gM	Formations continentales tertiaires - marnes vertes du Bassin de Brioude (séquence 1) (Oligocène)	0,1979
			g1	Formations continentales tertiaires - sables argileux grossiers de la Laussone (Oligocène inférieur - Stampien inférieur)	58,6417

NUM	NOTATION	NOM	NOTATION HARMO	DESCRIPTION HARMO	SUPERFICIE (km ²)
			<i>e-gM</i>	Formations continentales tertiaires - marnes et calcaires avec gypse accessoire de Ronzon: Oligocène inférieur et moyen (Oligocène inférieur - Sannoisien)	2,7837
			<i>eAv</i>	Formations continentales tertiaires - sables argileux verts à kaolinite (Eocène terminal - Ludien)	14,7940
			<i>eA</i>	Formations continentales tertiaires - sables argileux bariolés à kaolinite (Eocène terminal - Ludien)	15,2582
			<i>eC</i>	Formations continentales tertiaires - dépôts argilo-calcaires indifférenciés (Eocène)	0,1550
6	φ - \varnothing	Formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite et paléosols fersialitiques cuirassés (Eocène)	φ	Formations continentales tertiaires - paléosols fersialitiques cuirassés (Sidérolithique)	2,0406
			\varnothing	Formations continentales tertiaires - argiles vertes à illite, à nodules calcaires (Eocène terminal - Ludien)	37,3579
7	<i>e-g</i>	Formations continentales tertiaires à dominante sablo-argileuse ou arkosique (Eocène à Oligocène)	<i>gS2</i>	Formations continentales tertiaires - argiles sableuses rouges et sables argileux du Bassin de Brioude (séquence 2) (Oligocène)	0,6998
			<i>gSC</i>	Formations continentales tertiaires - sables argileux à nodules calcaires du Bassin de Brioude (séquence 1) (Oligocène)	4,0852
			<i>gS1</i>	Formations continentales tertiaires - argiles rouges, argiles sableuses bariolées et sables argileux du Bassin de Brioude (séquence 1) (Oligocène)	31,2346
			<i>gSi</i>	Formations continentales tertiaires - dépôts sablo-argileux indifférenciés, localement à conglomérats associés (Oligocène)	1,9761
			<i>gS</i>	Formations continentales tertiaires - sables supérieurs, avec concrétions calcaires (Oligocène)	31,2106
			<i>eS</i>	Formations continentales tertiaires - sables inférieurs rouges localement grésifiés (Eocène supérieur probable)	5,1077
			<i>eK</i>	Formations continentales tertiaires - arkoses de Blavozy, d'Auteyrac, de Brives et de Noustoulet (Eocène moyen - Lutétien)	2,6380
8	<i>Lv</i>	Dépôts lacustres associés aux formations volcaniques pyroclastiques à épicastiques (Miocène à Pléistocène)	<i>Pv</i>	Formations volcaniques pyroclastiques miocènes - projections volcaniques indéterminées	5,0737
			<i>LvM</i>	Formations épicastiques pléistocènes - dépôts lacustres de maar	1,5622
			<i>LvM(1)</i>	Formations épicastiques pliocènes - dépôts lacustres de maar	0,0520
			<i>LvR</i>	Formations volcaniques épicastiques miocènes - dépôts rouges	0,0187
			<i>LvS</i>	Formations épicastiques pléistocènes - dépôts lacustres fossilifères de Sénèze ("brèche de Sénèze")	0,0840
			<i>Lv</i>	Formations volcaniques épicastiques miocènes - dépôts lacustres indifférenciés	0,2841
			<i>T$\tau$$\varnothing$E</i>	Formations volcaniques pyroclastiques miocènes - Complexe de Saint-Pierre-Eynac: tufs bréchiques trachytiques et phonolitiques de maar (et dykes phonolitiques associés)	0,5481

NUM	NOTATION	NOM	NOTATION HARMO	DESCRIPTION HARMO	SUPERFICIE (km ²)
9	h	Formations continentales paléozoïques (Stéphanien)	<i>h5</i>	<i>Formations continentales paléozoïques - Grès, conglomérats et schistes houillers (Stéphanien)</i>	15,0739
			<i>h5e</i>	<i>Formations continentales paléozoïques - Brèches de la Fouillouse : débris flow et diamicite fluvio-glaciaire, brèche de pente (Bassin Houiller de Saint-Étienne, Stéphanien supérieur)</i>	0,0538
			<i>h5f</i>	<i>Formations continentales paléozoïques - Dépôts fluviatiles, type réseau en tresse à dominante de grès grossier arkosique (Bassin Houiller de Saint-Étienne, Stéphanien supérieur)</i>	0,0142
			<i>h5t</i>	<i>Formations continentales paléozoïques - Dépôts de plaine d'inondation : grès fins en remplissage de chenaux et shales carbonées à plantes et nodules (Bassin Houiller de Saint-Étienne, Stéphanien supérieur)</i>	0,1836

Annexe 3 - 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 01 avril 2010) :

- Communes reconnues en état de catastrophe naturelle « sécheresse », dates des arrêtés et de leurs parutions au Journal Officiel
- Nombre de sinistres localisés par commune
- Liste des sinistres localisés et formations géologiques concernées

Reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle au titre des mouvements de terrain
différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols

(données www.prim.net)

NUMERO INSEE	NOM COMMUNE	DATE DEB CatNat	DATE FIN CatNat	DATE ARRETE CatNat	DATE JO
43002	Aiguilhe	01-juil-03	30-sept-03	27-mai-05	31-mai-05
43010	Arsac-en-Velay	01-juil-03	30-sept-03	27-mai-05	31-mai-05
43012	Aurec-sur-Loire	01-juil-03	30-sept-03	02-mars-06	11-mars-06
43021	Beaulieu	01-juil-03	30-sept-03	02-mars-06	11-mars-06
43032	Blavozy	01-juil-03	30-sept-03	27-mai-05	31-mai-05
43036	Borne	01-juil-03	30-sept-03	22-nov-05	13-déc-05
43041	Brives-Charensac	01-juil-03	30-sept-03	11-janv-05	01-févr-05
43045	Ceyssac	01-juil-03	30-sept-03	27-mai-05	31-mai-05
43046	Chadrac	01-juil-03	30-sept-03	22-nov-05	13-déc-05
43047	Chadron	01-juil-03	30-sept-03	09-janv-06	22-janv-06
43056	Chanteuges	01-juil-03	30-sept-03	22-nov-05	13-déc-05
43078	Coubon	01-juil-03	30-sept-03	25-août-04	26-août-04
43084	Cussac-sur-Loire	01-janv-95	31-déc-97	26-mai-98	11-juin-98
43089	Espaly-Saint-Marcel	01-juil-03	30-sept-03	25-août-04	26-août-04
43113	Lantriac	01-juil-03	30-sept-03	22-nov-05	13-déc-05
43126	Malrevers	01-juil-03	30-sept-03	27-mai-05	31-mai-05
43132	Mazeyrat-d'Allier	01-juil-03	30-sept-03	11-janv-05	01-févr-05
43152	Polignac	01-juil-03	30-sept-03	22-nov-05	13-déc-05
43157	Puy-en-Velay	01-juil-03	30-sept-03	27-mai-05	31-mai-05
43162	Retournac	01-juil-03	30-sept-03	06-févr-06	14-févr-06
43165	Rosières	01-juil-03	30-sept-03	22-nov-05	13-déc-05
43190	Saint-Germain-Laprade	01-juil-03	30-sept-03	25-août-04	26-août-04
43203	Saint-Julien-du-Pinet	01-juil-03	30-sept-03	22-nov-05	13-déc-05
43216	Saint-Paulien	01-juil-03	30-sept-03	25-août-04	26-août-04
43229	Saint-Vidal	01-juil-03	30-sept-03	22-nov-05	13-déc-05
43230	Saint-Vincent	01-juil-03	30-sept-03	27-mai-05	31-mai-05
43233	Sanssac-l'Eglise	01-juil-03	30-sept-03	27-mai-05	31-mai-05
43251	Vals-près-le-Puy	01-juil-03	30-sept-03	25-août-04	26-août-04

Nombre de sinistres localisés par commune

INSEE	COMMUNE	Nombre de sinistres
43002	Aiguilhe	10
43010	Arsac-en-Velay	26
43012	Aurec-sur-Loire	1
43032	Blavozy	5
43036	Borne	2
43038	Bournoncle-Saint-Pierre	4
43040	Brioude	11
43041	Brives-Charensac	14
43046	Chadrac	1
43047	Chadron	10
43056	Chanteuges	2
43070	Chilhac	1
43074	Cohade	7
43078	Coubon	75
43084	Cussac-sur-Loire	1
43089	Espaly-Saint-Marcel	20
43126	Malrevers	13
43132	Mazeyrat-d'Allier	4
43152	Polignac	27
43157	Puy-en-Velay	59
43165	Rosières	4
43190	Saint-Germain-Laprade	24
43203	Saint-Julien-du-Pinet	3
43216	Saint-Paulien	5
43230	Saint-Vincent	1
43233	Sanssac-l'Eglise	1
43251	Vals-près-le-Puy	14
43119	Lavoute-sur-Loire	2
43120	Lempdes-sur-Allagnon	10
43135	Le Monastier-sur-Gazeille	3
43176	Saint-Christophe-D'Allier	3
43200	Saint-Julien-Chapteuil	8
43204	Saint-Julien-Molhesabate	1
43218	Saint-Pierre-Eynac	9
43261	Vezezoux	3
TOTAL		384

Liste des sinistres localisés

INSEE	Communes	Identifiant sinistre	X (lambert II étendu, m)	Y (lambert II étendu, m)	Code formation argileuse	Nom formation argileuse
43002	Aiguille	1	721 780	2 007 211	3	C
		2	722 463	2 007 175	3	C
		3	722 733	2 006 914	3	C
		4	721 858	2 006 537	5	e-m
		5	722 006	2 006 698	1	F
		6	721 978	2 006 593	5	e-m
		7	722 312	2 006 943	3	C
		8	722 462	2 007 172	3	C
		9	721 971	2 006 773	1	F
		10	721 569	2 007 341	3	C
43010	Arsac-en-Velay	11	728 458	2 001 426	0	
		12	728 476	2 001 459	0	
		13	729 368	2 000 922	6	ρ - \mathcal{E}
		14	729 030	2 001 028	6	ρ - \mathcal{E}
		15	727 951	1 998 530	3	C
		16	727 913	1 998 573	7	e-g
		17	727 696	1 998 972	7	e-g
		18	726 456	2 001 214	6	ρ - \mathcal{E}
		19	726 176	2 001 323	6	ρ - \mathcal{E}
		20	726 243	2 001 121	6	ρ - \mathcal{E}
		21	726 020	2 001 027	6	ρ - \mathcal{E}
		22	726 101	2 000 802	6	ρ - \mathcal{E}
		23	726 263	2 000 519	3	C
		24	726 287	2 000 793	6	ρ - \mathcal{E}
		25	726 448	2 000 748	3	C
		26	726 579	2 000 667	3	C
		27	726 668	2 000 628	3	C
		28	726 746	2 000 447	3	C
		29	726 740	2 000 372	3	C
		30	726 827	2 000 307	7	e-g
		31	727 024	2 000 303	6	ρ - \mathcal{E}
		32	726 634	2 000 164	7	e-g
		33	726 971	1 999 979	7	e-g
		34	726 984	1 999 973	7	e-g
		35	727 022	1 999 807	7	e-g
		36	728 629	2 001 341	0	
43012	Aurec-sur-Loire	37	746 508	2 043 114	1	F
43032	Blavozy	38	729 644	2 006 930	5	e-m
		39	728 098	2 007 814	1	F

INSEE	Communes	Identifiant sinistre	X (lambert II étendu, m)	Y (lambert II étendu, m)	Code formation argileuse	Nom formation argileuse
		40	729 415	2 007 589	0	
		41	729 316	2 007 596	0	
		42	729 345	2 007 808	0	
43036	Borne	43	715 673	2 012 429	2	Farg
		44	715 319	2 012 071	3	C
43038	Bournoncle-Saint-Pierre	45	676 959	2 037 304	7	e-g
		46	676 469	2 040 993	7	e-g
		47	676 543	2 040 565	7	e-g
		48	677 111	2 037 319	7	e-g
43040	Brioude	49	682 134	2 032 897	7	e-g
		50	681 417	2 032 962	3	C
		51	682 189	2 032 681	7	e-g
		52	681 347	2 032 338	6	g-g
		53	681 482	2 032 883	3	C
		54	681 580	2 032 851	3	C
		55	681 876	2 032 740	7	e-g
		56	682 686	2 031 923	2	Farg
		57	682 289	2 032 504	2	Farg
		58	681 935	2 032 128	3	C
		59	682 249	2 032 396	2	Farg
43041	Brives-Charensac	60	724 958	2 007 223	5	e-m
		61	724 959	2 007 206	5	e-m
		62	724 962	2 007 191	5	e-m
		63	725 000	2 007 198	5	e-m
		64	725 049	2 007 225	3	C
		65	725 014	2 007 133	3	C
		66	724 996	2 007 068	3	C
		67	725 200	2 006 686	1	F
		68	725 793	2 006 781	3	C
		69	725 846	2 006 533	5	e-m
		70	725 763	2 006 527	3	C
		71	724 371	2 007 013	1	F
		72	725 962	2 005 384	1	F
		73	724 972	2 007 141	3	C
43046	Chadrac	74	722 998	2 008 057	3	C
43047	Chadron	75	726 125	1 996 841	7	e-g
		76	725 580	1 998 115	7	e-g
		77	725 601	1 998 098	7	e-g
		78	725 618	1 998 078	7	e-g
		79	725 632	1 998 051	7	e-g
		80	725 643	1 998 027	7	e-g
		81	726 935	1 993 634	3	C

INSEE	Communes	Identifiant sinistre	X (lambert II étendu, m)	Y (lambert II étendu, m)	Code formation argileuse	Nom formation argileuse
		82	725 384	1 994 881	7	e-g
		83	727 918	1 994 895	3	C
		84	726 244	1 996 776	7	e-g
43056	Chanteuges	85	692 866	2 009 978	3	C
		86	694 245	2 008 698	1	F
43070	Chilhac	87	686 433	2 018 550	0	
43074	Cohade	88	681 275	2 036 198	1	F
		89	681 390	2 035 648	1	F
		90	681 364	2 037 999	1	F
		91	681 430	2 037 929	1	F
		92	680 658	2 037 484	1	F
		93	680 629	2 037 603	1	F
		94	681 057	2 036 826	1	F
43078	Coubon	95	724 830	2 001 705	3	C
		96	724 840	2 001 726	3	C
		97	724 808	2 001 721	3	C
		98	724 883	2 001 748	3	C
		99	724 874	2 001 720	3	C
		100	724 792	2 001 638	3	C
		101	724 785	2 001 620	3	C
		102	724 803	2 001 617	3	C
		103	724 688	2 001 619	0	
		104	724 669	2 001 585	0	
		105	724 654	2 001 555	0	
		106	724 652	2 001 535	0	
		107	724 716	2 001 588	0	
		108	724 731	2 001 602	0	
		109	724 701	2 001 569	0	
		110	724 693	2 001 557	0	
		111	724 764	2 001 633	0	
		112	724 760	2 001 621	0	
		113	724 755	2 001 608	0	
		114	724 736	2 001 562	0	
		115	724 743	2 001 581	0	
		116	724 687	2 001 517	0	
		117	724 877	2 001 579	3	C
118	724 859	2 001 551	3	C		
119	724 850	2 001 507	3	C		
120	724 970	2 001 471	3	C		
121	724 745	2 001 615	0			
122	724 945	2 001 485	3	C		
123	724 471	2 001 410	0			

INSEE	Communes	Identifiant sinistre	X (lambert II étendu, m)	Y (lambert II étendu, m)	Code formation argileuse	Nom formation argileuse
		124	724 170	2 001 502	0	
		125	723 498	2 001 567	3	C
		126	723 359	2 001 566	3	C
		127	724 212	2 001 928	0	
		128	724 456	2 001 677	0	
		129	723 289	2 001 660	3	C
		130	723 445	2 001 662	3	C
		131	723 508	2 001 700	3	C
		132	723 647	2 001 480	3	C
		133	723 752	2 001 577	3	C
		134	723 849	2 001 467	3	C
		135	722 478	2 001 620	3	C
		136	724 909	2 000 387	7	e-g
		137	724 123	2 001 594	0	
		138	724 375	2 001 436	0	
		139	723 166	2 001 072	3	C
		140	723 172	2 001 106	3	C
		141	723 195	2 001 097	1	F
		142	723 191	2 001 126	3	C
		143	724 356	2 001 177	3	C
		144	724 547	2 001 709	0	
		145	724 635	2 001 423	0	
		146	724 666	2 001 395	0	
		147	724 711	2 001 229	3	C
		148	725 137	2 002 125	3	C
		149	726 606	2 004 372	1	F
		150	723 102	2 001 893	3	C
		151	725 207	2 000 711	1	F
		152	723 586	2 000 854	3	C
		153	723 927	2 000 927	3	C
		154	723 978	2 000 447	7	e-g
		155	724 296	2 000 402	0	
		156	726 416	2 004 056	5	e-m
		157	724 688	2 001 282	3	C
		158	723 498	2 000 958	3	C
		159	723 946	2 000 174	7	e-g
		160	724 017	2 000 970	3	C
		161	724 727	2 000 866	1	F
		162	724 018	2 001 531	0	
		163	722 998	2 002 032	3	C
		164	724 721	2 001 228	3	C
		165	724 653	2 001 221	3	C

INSEE	Communes	Identifiant sinistre	X (lambert II étendu, m)	Y (lambert II étendu, m)	Code formation argileuse	Nom formation argileuse
		166	724 732	2 001 235	3	C
		167	724 958	2 001 501	3	C
		168	724 807	2 001 652	3	C
		169	724 815	2 001 689	3	C
43084	Cussac-sur-Loire	170	721 471	2 000 042	0	
43089	Espaly-Saint-Marcel	171	720 527	2 005 839	5	e-m
		172	720 714	2 006 744	3	C
		173	720 682	2 006 793	3	C
		174	720 163	2 006 301	3	C
		175	720 575	2 006 335	3	C
		176	720 478	2 006 404	3	C
		177	721 061	2 005 730	3	C
		178	720 620	2 005 791	5	e-m
		179	720 078	2 005 778	3	C
		180	720 125	2 007 459	3	C
		181	720 144	2 007 429	3	C
		182	720 921	2 006 117	3	C
		183	719 934	2 007 281	3	C
		184	720 611	2 005 767	5	e-m
		185	718 893	2 006 540	3	C
		186	720 701	2 006 045	5	e-m
		187	720 588	2 005 749	5	e-m
		188	720 001	2 006 270	3	C
		189	719 663	2 006 209	3	C
		190	720 867	2 006 875	3	C
43119	Lavoute-sur-Loire	191	724 725	2 014 914	1	F
		192	724 898	2 015 068	1	F
43120	Lempdes-sur-Allagnon	193	673 302	2 043 188	1	F
		194	673 175	2 042 795	3	C
		195	673 414	2 042 862	3	C
		196	673 360	2 042 943	3	C
		197	673 360	2 042 918	3	C
		198	673 700	2 042 575	7	e-g
		199	673 585	2 042 756	0	
		200	673 109	2 043 244	1	F
		201	672 858	2 042 866	0	
		202	673 432	2 042 835	3	C
43126	Malrevers	203	728 307	2 012 966	6	\mathcal{P} - \mathcal{G}
		204	728 715	2 012 427	3	C
		205	728 433	2 012 363	6	\mathcal{P} - \mathcal{G}
		206	728 392	2 012 313	1	F
		207	728 353	2 012 103	3	C

INSEE	Communes	Identifiant sinistre	X (lambert II étendu, m)	Y (lambert II étendu, m)	Code formation argileuse	Nom formation argileuse
		208	728 274	2 011 815	6	ρ-℘
		209	728 417	2 012 327	1	F
		210	728 299	2 011 805	6	ρ-℘
		211	728 265	2 011 852	6	ρ-℘
		212	728 284	2 012 978	6	ρ-℘
		213	728 379	2 012 273	1	F
		214	727 289	2 012 200	1	F
		215	728 679	2 013 438	6	ρ-℘
43132	Mazeyrat-d'Allier	216	697 816	2 015 540	1	F
		217	690 218	2 014 423	3	C
		218	693 185	2 012 558	1	F
		219	696 019	2 014 928	0	
43135	Le Monastier-sur-Gazeille	220	730 774	1 994 871	7	e-g
		221	730 598	1 995 273	7	e-g
		222	730 798	1 994 832	7	e-g
43152	Polignac	223	716 867	2 011 219	5	e-m
		224	716 825	2 011 055	0	
		225	716 947	2 010 519	0	
		226	723 098	2 010 435	2	Farg
		227	723 086	2 010 302	2	Farg
		228	721 298	2 007 110	3	C
		229	721 628	2 008 583	5	e-m
		230	719 271	2 008 279	3	C
		231	719 757	2 008 786	3	C
		232	719 863	2 008 524	3	C
		233	720 276	2 008 476	3	C
		234	720 247	2 008 821	3	C
		235	721 031	2 009 277	3	C
		236	721 095	2 009 283	3	C
		237	719 107	2 010 250	0	
		238	722 146	2 008 910	5	e-m
		239	722 124	2 008 961	5	e-m
		240	722 741	2 009 252	5	e-m
		241	721 296	2 012 122	3	C
		242	717 185	2 008 830	5	e-m
		243	721 141	2 009 365	3	C
		244	720 121	2 008 452	3	C
		245	720 058	2 008 354	3	C
246	720 221	2 008 379	3	C		
247	720 051	2 009 000	3	C		
248	720 221	2 008 925	3	C		
249	716 843	2 011 228	5	e-m		

INSEE	Communes	Identifiant sinistre	X (lambert II étendu, m)	Y (lambert II étendu, m)	Code formation argileuse	Nom formation argileuse
43157	Le Puy-En-Velay	250	721 525	2 006 134	3	C
		251	721 390	2 006 045	5	e-m
		252	721 646	2 005 623	3	C
		253	721 664	2 005 300	3	C
		254	721 354	2 005 551	5	e-m
		255	721 501	2 005 955	3	C
		256	721 234	2 005 849	5	e-m
		257	721 308	2 005 874	5	e-m
		258	721 643	2 005 421	5	e-m
		259	721 653	2 005 442	3	C
		260	721 592	2 005 250	5	e-m
		261	722 806	2 006 093	3	C
		262	722 467	2 006 532	3	C
		263	722 443	2 006 485	3	C
		264	722 638	2 005 804	3	C
		265	722 529	2 005 601	3	C
		266	722 833	2 005 655	3	C
		267	722 696	2 005 394	3	C
		268	722 701	2 005 413	3	C
		269	722 648	2 005 519	3	C
		270	722 638	2 005 527	3	C
		271	722 874	2 005 428	3	C
		272	723 011	2 005 739	3	C
		273	723 096	2 005 811	3	C
		274	723 048	2 005 799	3	C
		275	723 035	2 005 789	3	C
		276	723 060	2 005 751	3	C
		277	722 999	2 005 761	3	C
		278	722 983	2 006 093	3	C
		279	723 093	2 006 047	3	C
		280	722 865	2 005 943	3	C
281	722 823	2 005 861	3	C		
282	723 327	2 005 632	3	C		
283	723 590	2 005 187	0			
284	723 951	2 005 204	0			
285	724 026	2 005 240	0			
286	724 107	2 005 166	0			
287	723 881	2 005 023	0			
288	723 980	2 004 967	0			
289	723 064	2 002 830	2	Farg		
290	723 122	2 002 484	3	C		
291	723 153	2 002 513	3	C		

INSEE	Communes	Identifiant sinistre	X (lambert II étendu, m)	Y (lambert II étendu, m)	Code formation argileuse	Nom formation argileuse
		292	722 517	2 003 623	2	Farg
		293	722 195	2 003 530	5	e-m
		294	722 564	2 003 766	0	
		295	721 481	2 001 923	2	Farg
		296	721 464	2 001 910	2	Farg
		297	722 392	2 005 869	3	C
		298	722 570	2 006 297	1	F
		299	723 513	2 005 167	0	
		300	721 853	2 004 568	5	e-m
		301	721 828	2 004 560	5	e-m
		302	721 846	2 004 614	5	e-m
		303	722 006	2 004 637	5	e-m
		304	722 952	2 005 342	3	C
		305	722 313	2 004 015	5	e-m
		306	722 869	2 004 040	0	
		307	722 207	2 004 782	3	C
		308	721 788	2 005 203	1	F
		43165	Rosières	309	729 845	2 016 113
310	729 713			2 015 864	1	F
311	729 493			2 015 769	1	F
312	729 871			2 015 998	1	F
43173	Saint-Christophe-d'Allier	313	706 263	1 983 280	0	
		314	708 111	1 984 930	3	C
		315	706 665	1 984 139	0	
43190	Saint-Germain-Laprade	316	726 263	2 007 726	7	e-g
		317	726 171	2 007 799	7	e-g
		318	726 013	2 008 136	3	C
		319	726 538	2 007 303	7	e-g
		320	724 888	2 007 359	1	F
		321	725 295	2 007 369	5	e-m
		322	727 096	2 005 029	7	e-g
		323	727 164	2 005 065	5	e-m
		324	727 647	2 005 277	3	C
		325	727 662	2 005 300	3	C
		326	727 700	2 005 360	3	C
		327	727 713	2 005 426	3	C
		328	727 760	2 005 390	3	C
		329	727 779	2 005 379	3	C
		330	727 899	2 005 503	3	C
331	727 775	2 005 441	3	C		
332	728 441	2 005 349	5	e-m		
333	728 490	2 005 324	5	e-m		

INSEE	Communes	Identifiant sinistre	X (lambert II étendu, m)	Y (lambert II étendu, m)	Code formation argileuse	Nom formation argileuse
		334	728 482	2 005 104	0	
		335	729 592	2 005 242	3	C
		336	729 675	2 005 183	5	e-m
		337	729 822	2 005 187	5	e-m
		338	732 044	2 004 080	5	e-m
		339	726 526	2 007 702	3	C
43200	Saint-Julien-Chapteuil	340	735 998	2 005 551	6	ρ - \emptyset
		341	735 975	2 005 541	6	ρ - \emptyset
		342	736 831	2 005 943	6	ρ - \emptyset
		343	735 782	2 005 342	6	ρ - \emptyset
		344	735 648	2 005 626	6	ρ - \emptyset
		345	735 652	2 005 544	6	ρ - \emptyset
		346	735 639	2 005 577	6	ρ - \emptyset
		347	735 313	2 005 284	6	ρ - \emptyset
43203	Saint-Julien-du-Pinet	348	732 966	2 017 663	3	C
		349	735 460	2 015 995	3	C
		350	734 687	2 019 752	5	e-m
43204	Saint-Julien-Molhesabate	351	764 246	2 022 865	0	
43216	Saint-Paulien	352	715 924	2 012 164	0	
		353	715 993	2 012 183	0	
		354	715 926	2 012 199	0	
		355	716 265	2 015 602	0	
		356	716 173	2 015 535	0	
43218	Saint-Pierre-Eynac	357	734 044	2 005 114	5	e-m
		358	734 095	2 005 168	0	
		359	732 040	2 008 405	3	C
		360	732 053	2 008 526	3	C
		361	732 095	2 008 491	3	C
		362	735 873	2 006 431	3	C
		363	733 163	2 006 750	5	e-m
		364	732 114	2 005 355	3	C
		365	732 757	2 008 625	5	e-m
43230	Saint-Vincent	366	724 250	2 016 194	1	F
43233	Sanssac-l'Eglise	367	716 519	2 007 241	2	Farg
43251	Vals-Près-Le-Puy	368	721 551	2 005 163	5	e-m
		369	721 463	2 005 020	5	e-m
		370	721 294	2 004 876	5	e-m
		371	721 742	2 005 039	1	F
		372	721 609	2 004 938	3	C
		373	720 967	2 004 611	5	e-m
		374	720 625	2 004 118	3	C
		375	720 823	2 004 538	5	e-m

INSEE	Communes	Identifiant sinistre	X (lambert II étendu, m)	Y (lambert II étendu, m)	Code formation argileuse	Nom formation argileuse
		376	720 586	2 004 462	3	C
		377	721 251	2 003 782	3	C
		378	721 367	2 004 176	1	F
		379	721 367	2 004 176	1	F
		380	721 563	2 005 170	5	e-m
		381	720 860	2 003 854	3	C
43261	Vezezoux	382	677 838	2 044 331	1	F
		383	678 551	2 044 418	1	F
		384	677 967	2 044 249	1	F

Annexe 4 - Liste et coordonnées des bureaux d'étude et organismes ayant fourni des données géotechniques

BRGM - SGR AUVERGNE

12, avenue des Landais
63170 AUBIERE

Tél. : 04 73 15 23 00
Fax : 04 73 15 23 10

CEBTP

11, rue Louis Rosier
63000 CLERMONT FERRAND

Tél. : 04.73.27.72.00
Fax : 04.73.27.74.57

Compagnie Française d'Etudes Géotechniques (CFEG)

46 rue Marcel Girardin
69330 MEYZIEU

Tél. : 04 78 31 64 30
Fax : 04 78 31 41 21

FONDASOL

290, rue des Galoubets
84140 MONTFAVET

Tél. : 04.90.31.23.96
Fax : 04.90.32.59.83

HYDROGÉOTECHNIQUE

Direction Auvergne

6, rue Ampère
63960 VEYRE MONTON

Tel : 04.73.24.00.51
Fax : 04.73.24.59.95

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC)

8, rue Bernard Palissy
63100 CLERMONT FERRAND

Tel : 04.73.42.10.10

SIC INFRA 63

267 Chemin de la Gondole
63115 MEZEL

Tél : 04.73.83.58.25
Fax : 04.73.83.29.06

SOL SOLUTION

Rue Gershwin
ZAC Portes de Riom
BP 178
63204 RIOM CEDEX

Tél : 04.73.64.74.84
Fax : 04.73.64.74.80

Annexe 5 - Résultats d'analyses des 19 échantillons prélevés pour la minéralogie

RAPPORT D'ESSAIS 10-6-029-A

Coordonnées des échantillons

N°	X L2E (m)	Y L2E (m)	Commune
4A01RG43	729 945	2 035 633	TIRANGES
4B02RG43	733 623	2 036 523	VALPRIVAS
1B03RG43	740 673	2 036 460	BAS-EN-BASSET
3B04RG43	748 886	2 028 570	SAINTE-SIGOLENE
4C05RG43	745 036	2 022 298	GRAZAC
8B06RG43	744 805	2 009 824	ARAULES
3C07RG43	744 244	2 007 834	ARAULES
8A08RG43	734 640	2 006 814	SAINT-PIERRE-EYNAC
6A09RG43	730 281	2 014 203	ROSIERES
1C10RG43	725 584	2 015 066	LAVOUTE-SUR-LOIRE
8C11RG43	718 033	2 012 764	BLANZAC
5A12RG43	719 523	2 013 417	BLANZAC
2C13RG43	706 779	1 983 786	SAINT-CHRISTOPHE-D'ALLIER
2B14RG43	694 472	1 996 094	SAUGUES
9B15RG43	691 206	2 009 539	LANGÉAC
9A16RG43	687 874	2 031 124	LAVAUDIEU
2A17RG43	686 531	2 032 102	FONTANNES
1A18RG43	683 096	2 033 680	LAMOTHE
3A19RG43	678 267	2 038 029	BOURNONCLE-SAINT-PIERRE

Nature de l'essai :

La fraction cristallisée des échantillons est déterminée par diffractométrie des rayons X à partir de leur diagramme de poudre. Cette technique est surtout qualitative et ne peut donner qu'une indication semi-quantitative. Le seuil de détection est de l'ordre de 5 %, mais peut largement varier en fonction de la nature des différentes phases.

Appareillage et conditions expérimentales :

Appareillage : Diffractomètre SIEMENS D5000 automatisé

Conditions expérimentales :

- Balayage de 2 à 36°2 θ
- Vitesse de balayage de 0,02°2 θ /seconde
- Temps de comptage : 1 seconde par pas
- Echantillon fixe
- Tube au Cobalt (λ K α 1 \approx 1,789 Å)

Traitement des diagrammes : Logiciel DIFFRAC^{plus}

Résultats d'analyse

Echantillon 4A01RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- vermiculite et interstratifié vermiculite/chlorite probable :~41%
- sépiolite :~15%
- illite et/ou micas :~17%
- kaolinite ~27%

Echantillon 4B02RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- vermiculite et interstratifié vermiculite/chlorite :~36%
- illite et/ou micas :~41%
- kaolinite : ~23%

Echantillon 1B03RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- interstratifié smectite/chlorite :~10%
- illite et/ou micas :~55%
- kaolinite :~35%

Echantillon 3B04RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- vermiculite + interstratifié vermiculite/chlorite possible :~43%
- illite et/ou micas :47%
- kaolinite :10%

Echantillon 4C05RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- vermiculite + interstratifié vermiculite/chlorite possible :~34%
- illite et/ou micas :~18%
- kaolinite :~48%

Echantillon 8B06RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- interstratifié smectite/chlorite :39%
- illite et/ou micas :~12%
- kaolinite :~49%

Echantillon 3C07RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- illite et/ou micas :~8%
- kaolinite :92%

Echantillon 8A08RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- interstratifié smectite/chlorite :~96%
- illite et/ou micas :~4%

Echantillon 6A09RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- illite et/ou micas :~71%
- kaolinite :~29%

Echantillon 1C10RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- vermiculite :~5%
- illite et/ou micas :~61%
- kaolinite :~34%

Echantillon 8C11RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- illite et/ou micas :~78%
- kaolinite :~22%
- interstratifié possible non identifiable

Echantillon 5A12RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- illite et/ou micas :~80%
- kaolinite :~20%

Echantillon 2C13RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- vermiculite + interstratifié vermiculite/chlorite :~39%
- illite et/ou micas :~23%
- kaolinite :~38%

Echantillon 2B14RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- interstratifié smectite/chlorite + vermiculite + interstratifié vermiculite/chlorite possible :~6%
- illite et/ou micas :~68%
- kaolinite :~26%

Echantillon 9B15RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- illite et/ou micas :~71%
- kaolinite :~29%
-

Echantillon 9A16RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- illite et/ou micas :~28%
- kaolinite :~72%
- vermiculite possible en traces

Echantillon 2A17RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- interstratifié smectite/chlorite :~2%
- illite et/ou micas :~5%
- kaolinite :~93%

Echantillon 1A18RG43 :

La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

- interstratifié vermiculite/chlorite + vermiculite :~4%
- illite et/ou micas :~66%
- kaolinite :~30%

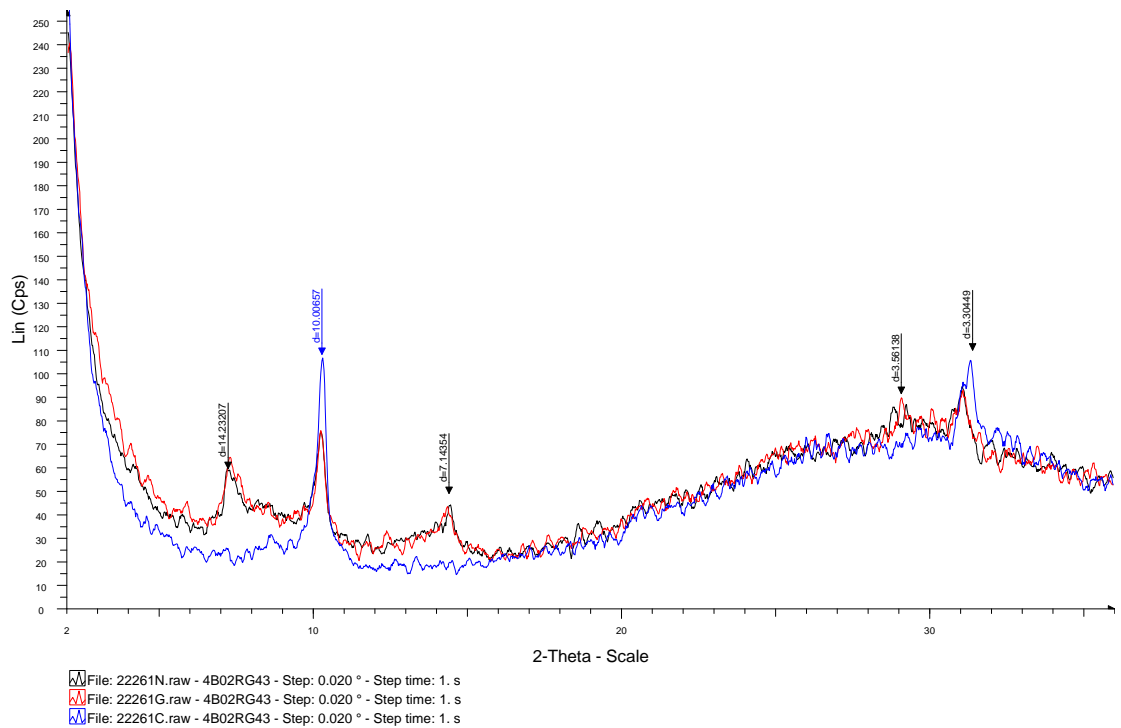
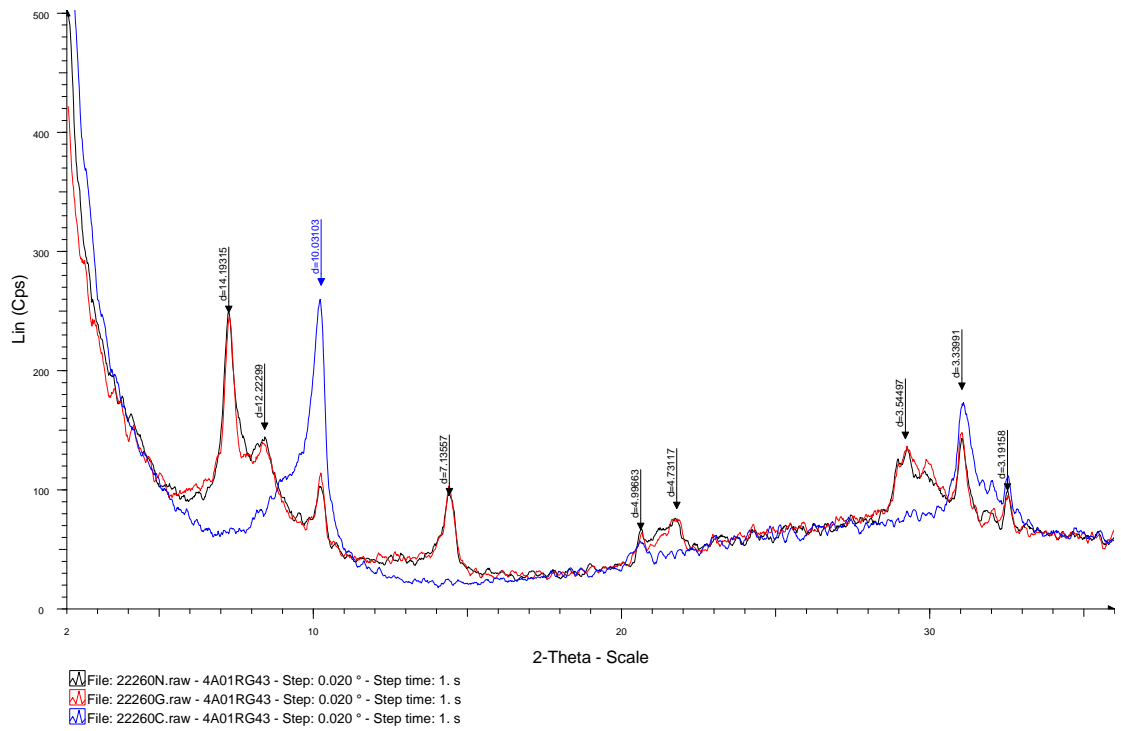
Echantillon 3A19RG43 :

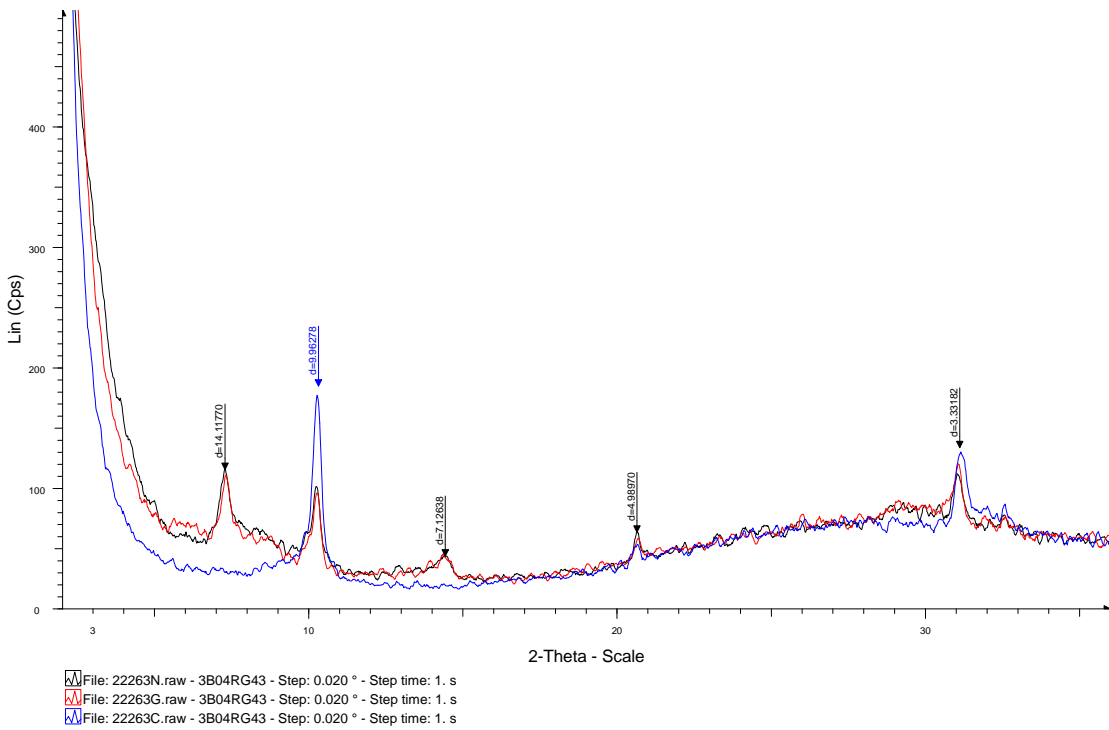
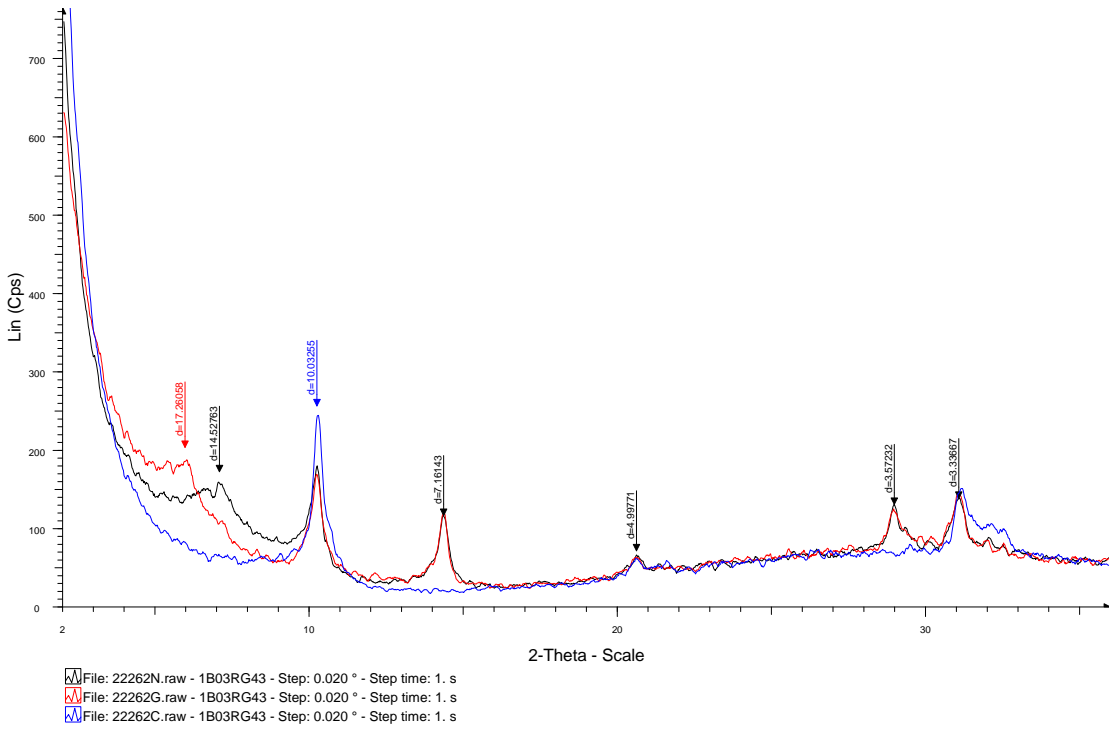
La fraction phylliteuse est représentée (sur base de100) par :

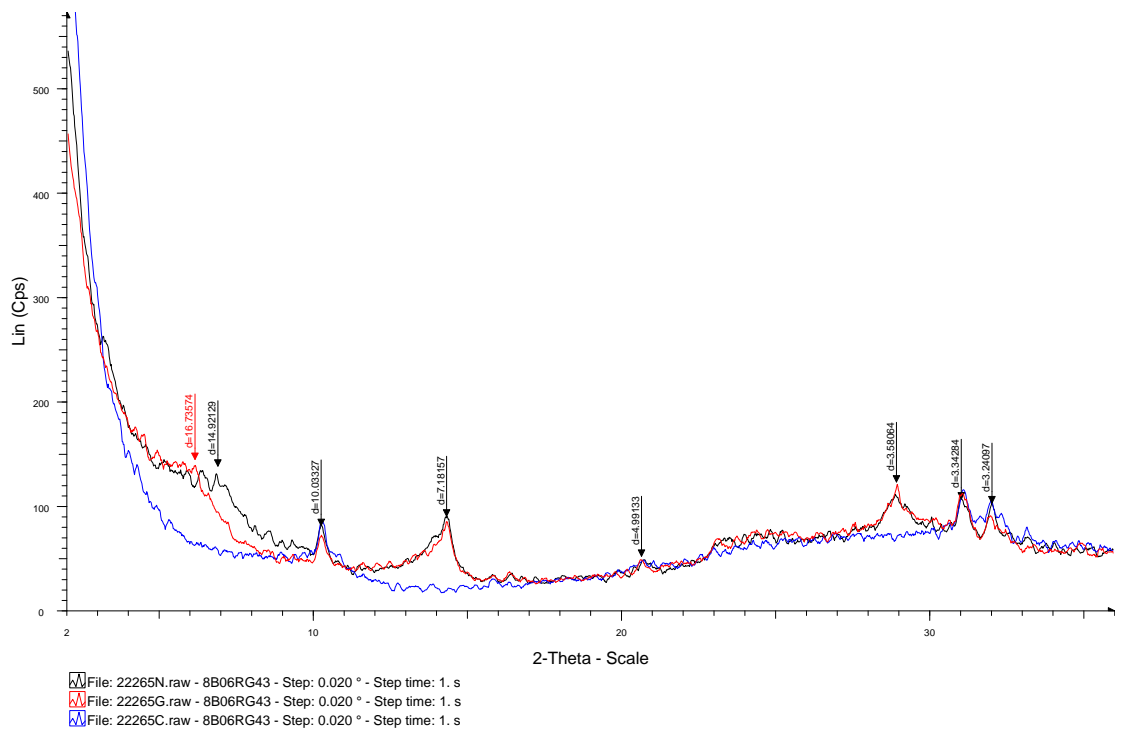
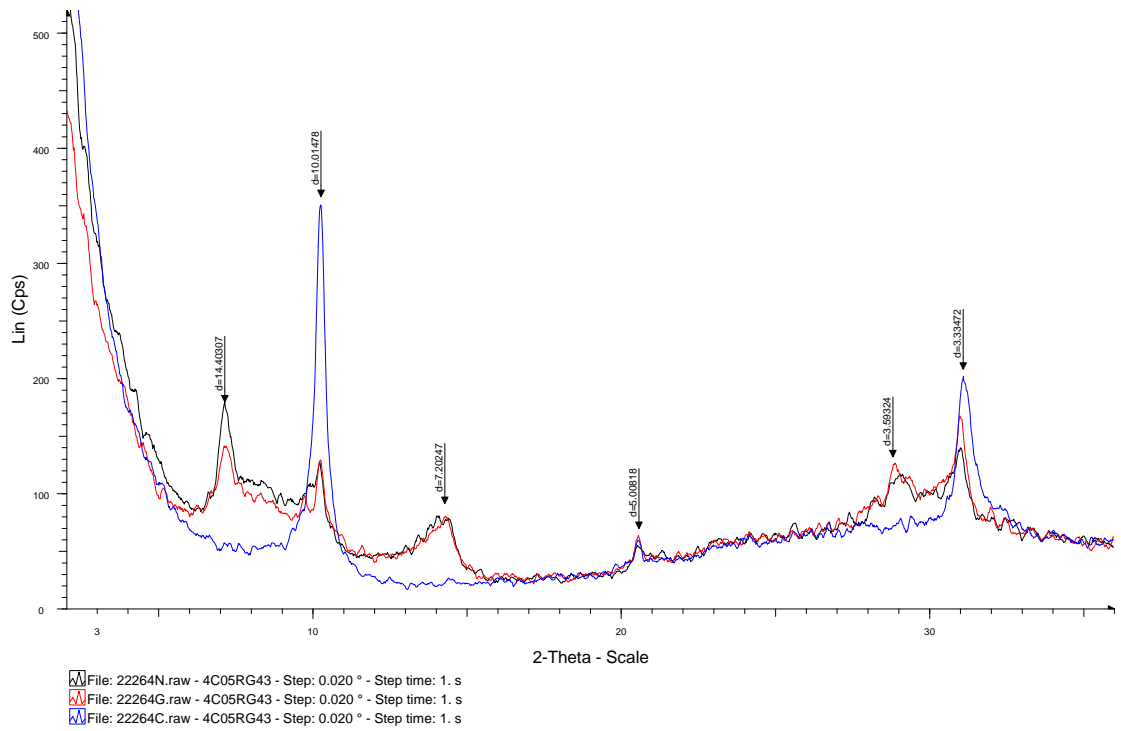
- interstratifié smectite/chlorite :~11%
- illite et/ou micas :~45%
- kaolinite :~44%

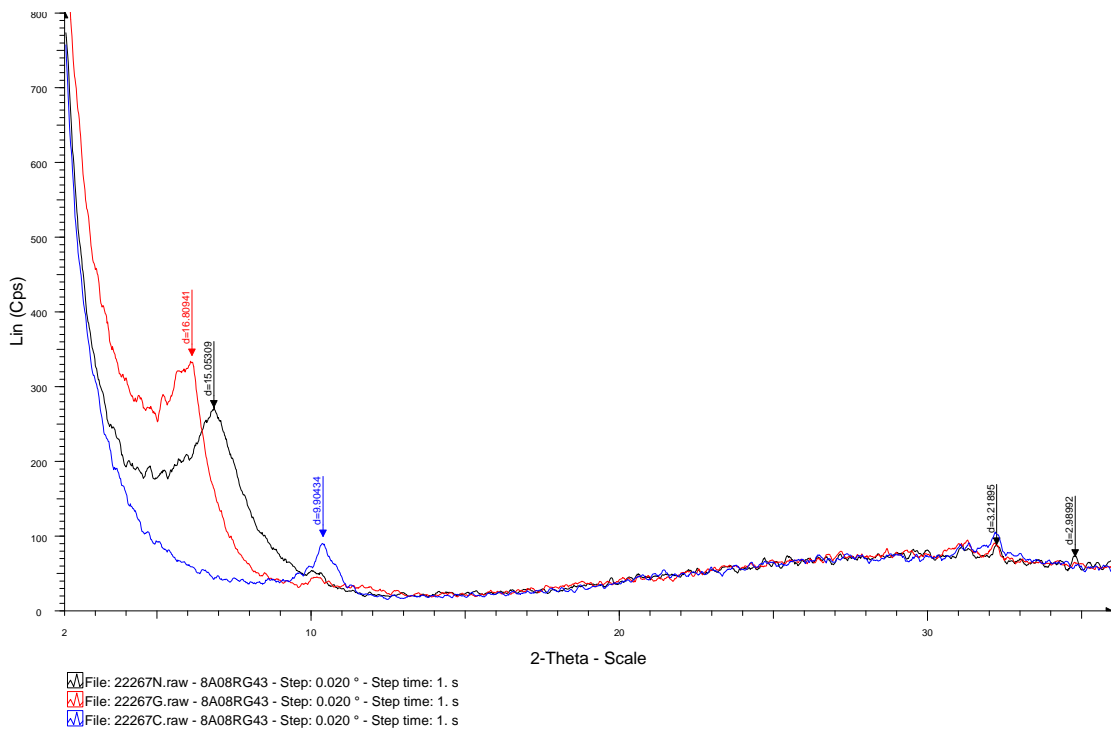
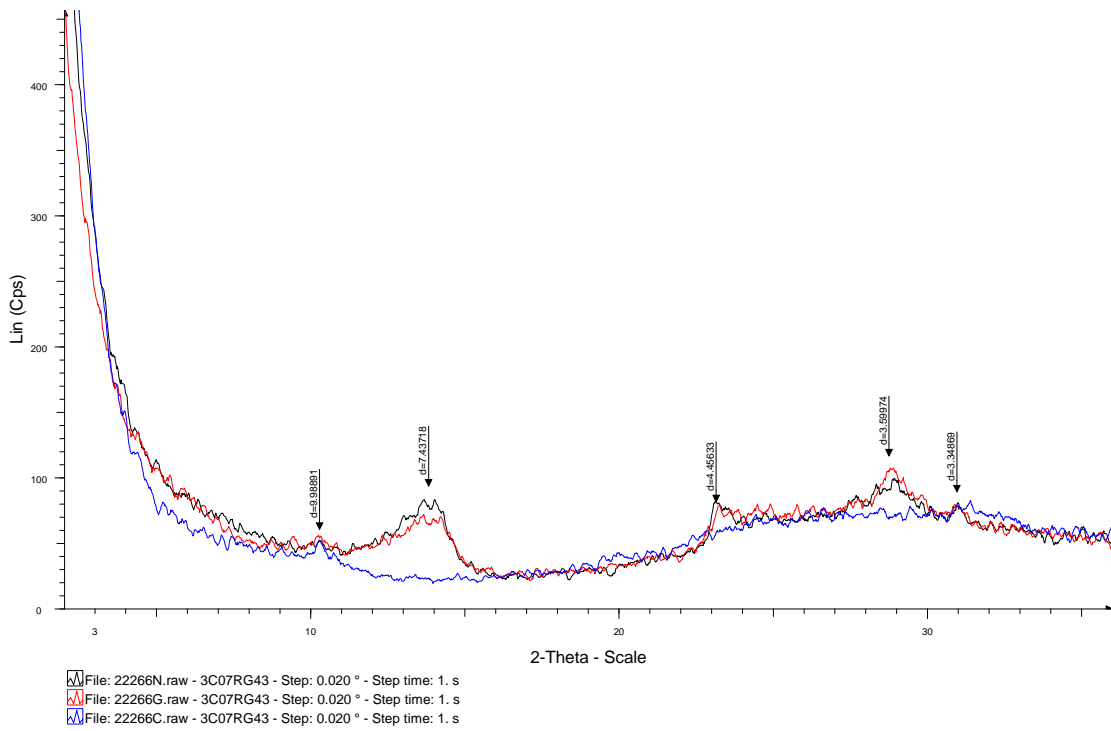
Pour chaque échantillon :

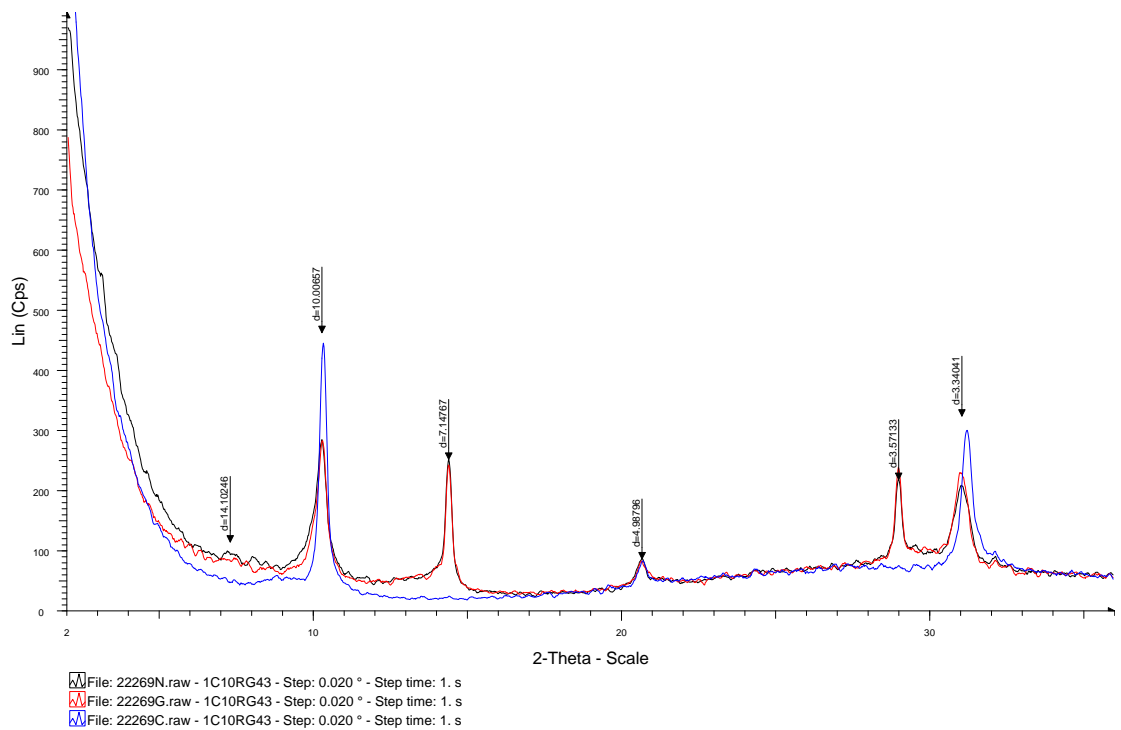
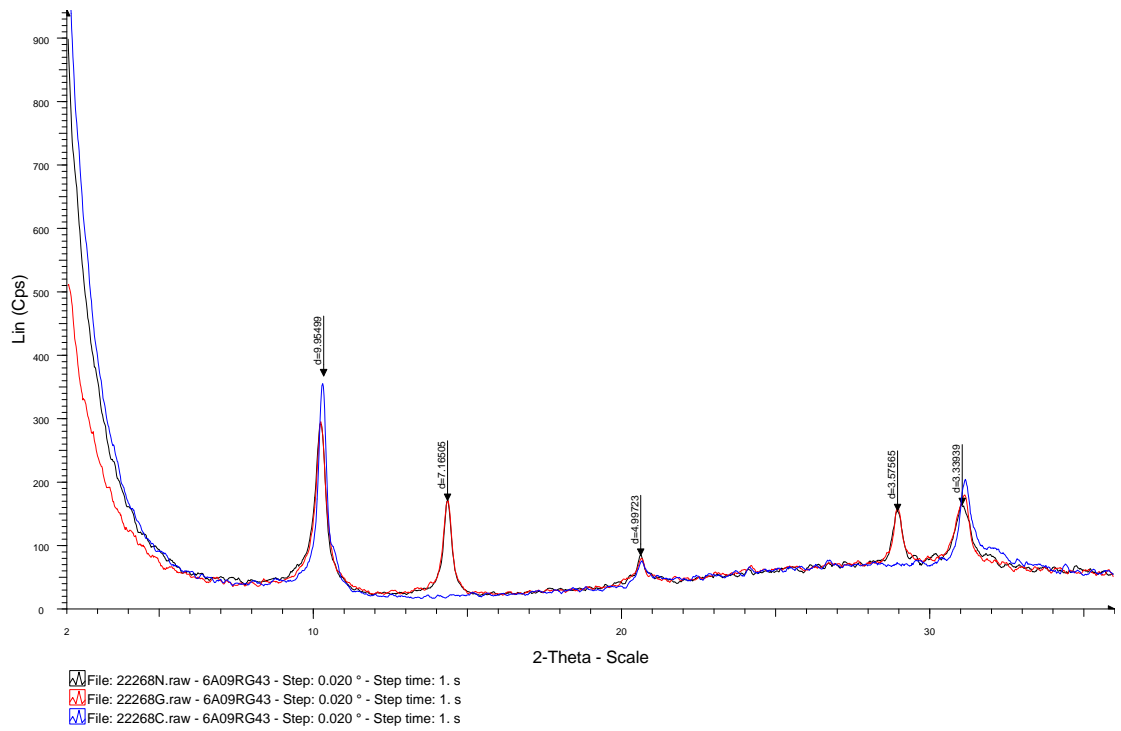
- Le diffractogramme obtenu à partir de la lame normale (indexé N), de la lame glycolée pendant 12 heures en tension de vapeur (indexé G), de la lame chauffée à 490°C pendant 4 heures (indexé C)

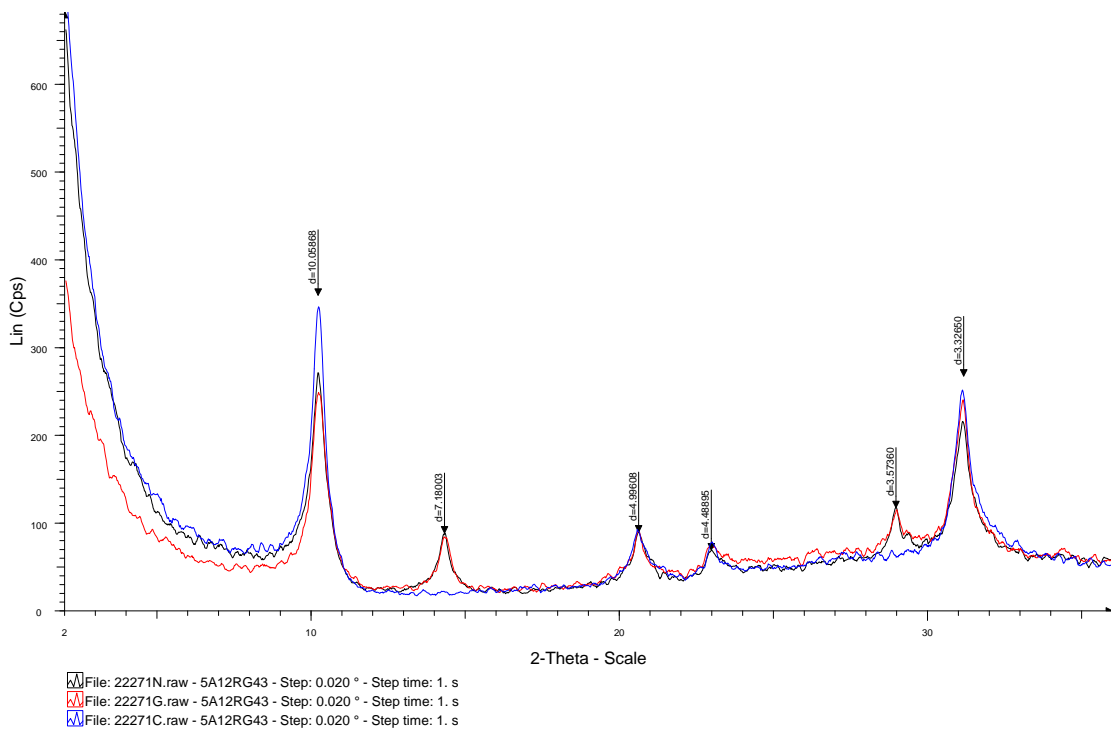
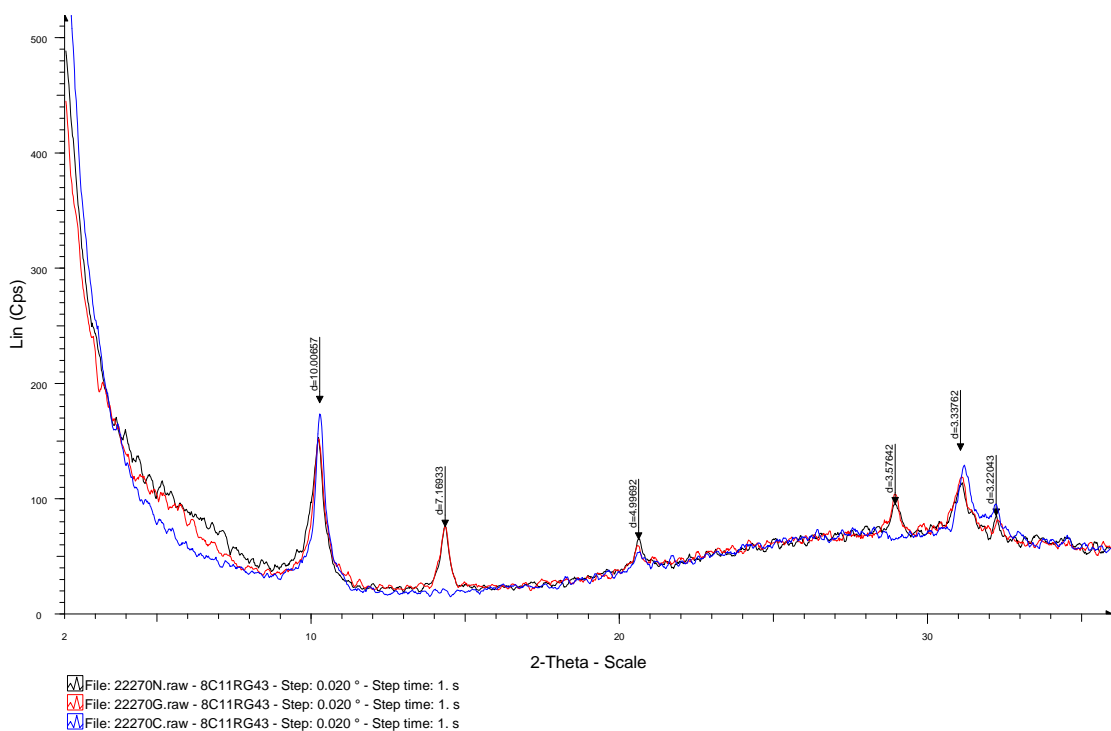


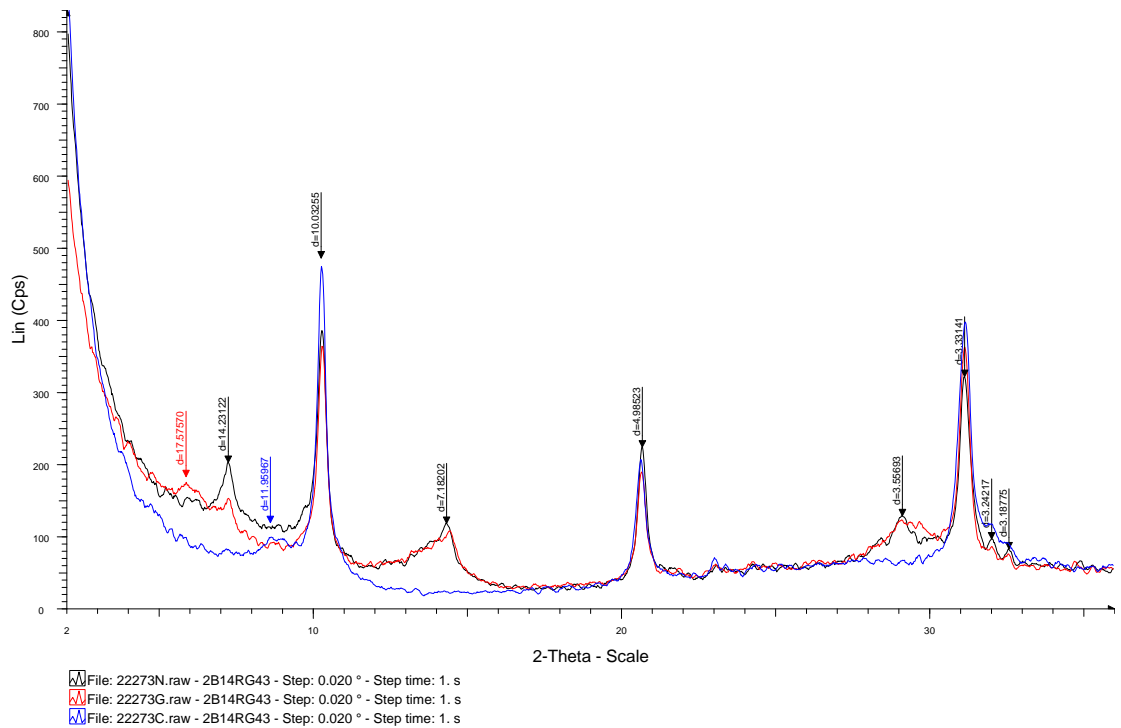
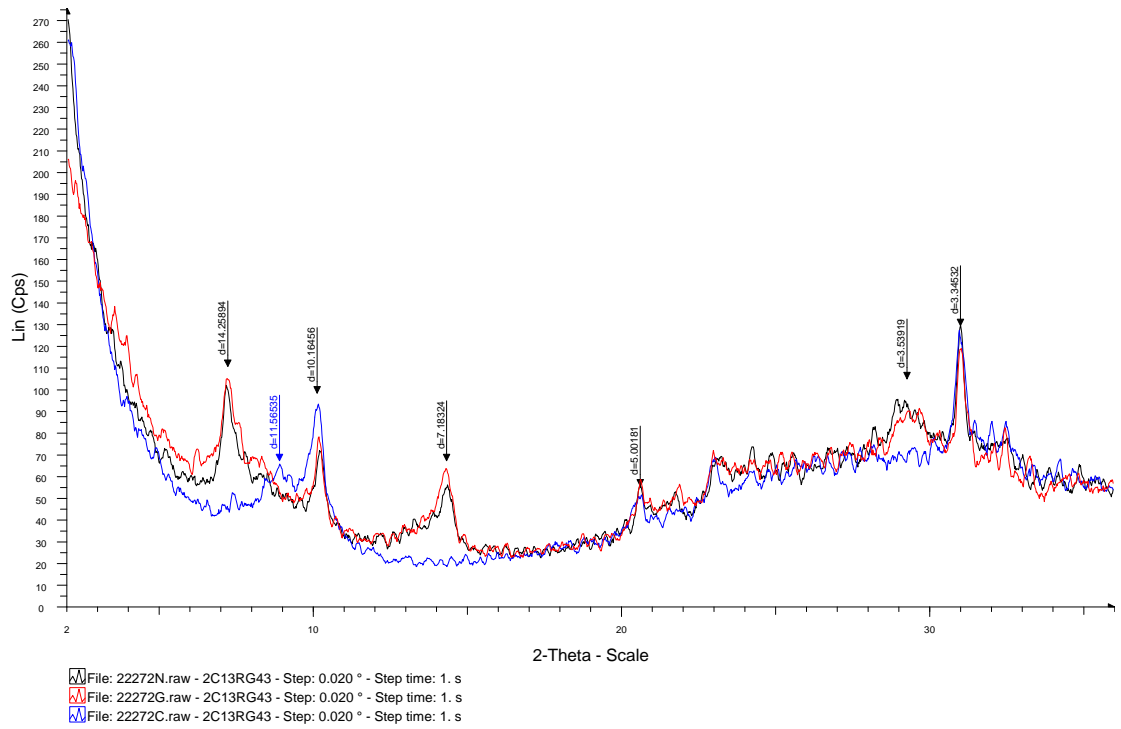


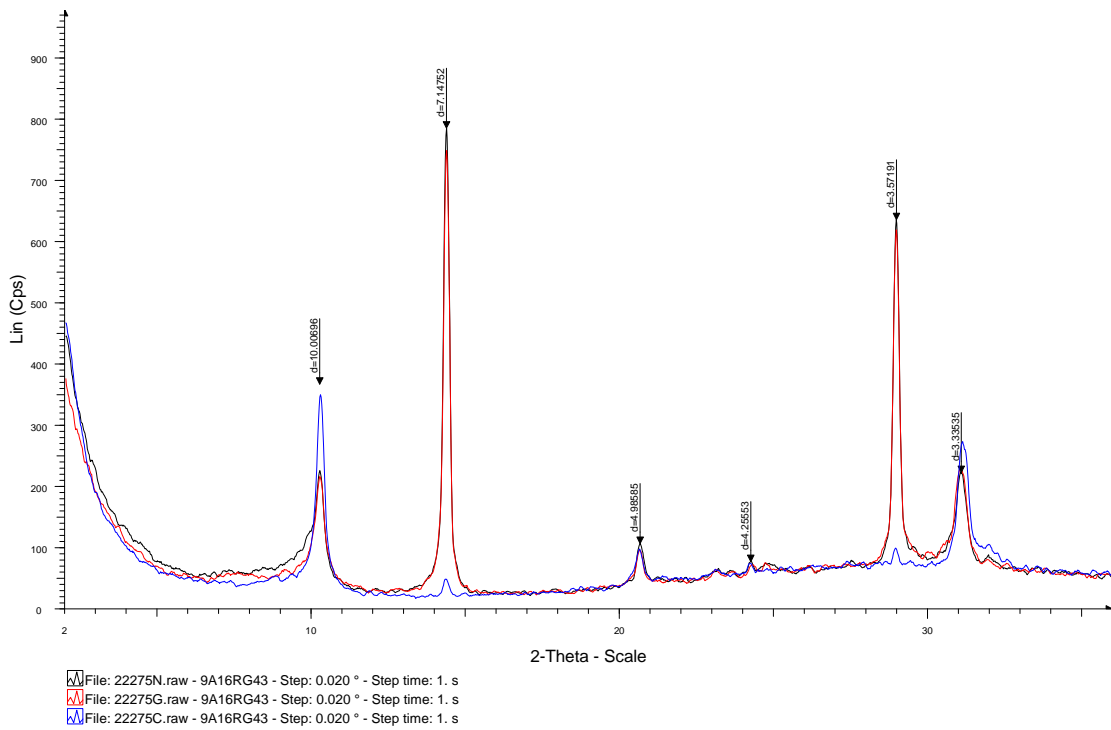
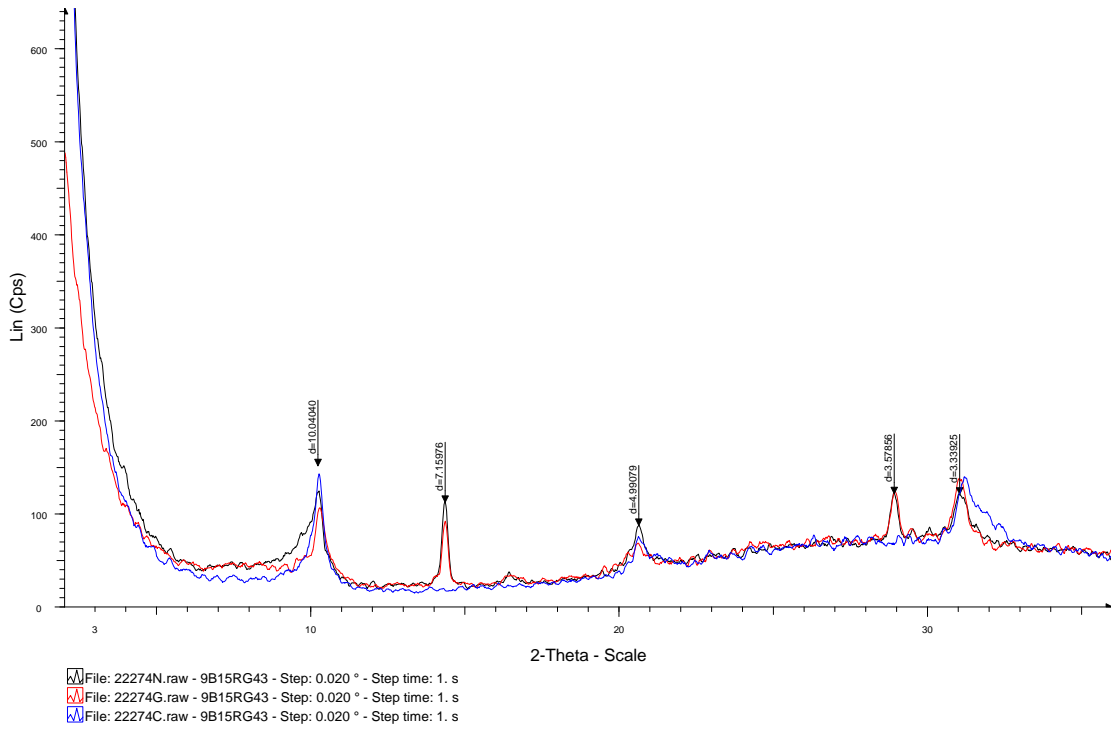


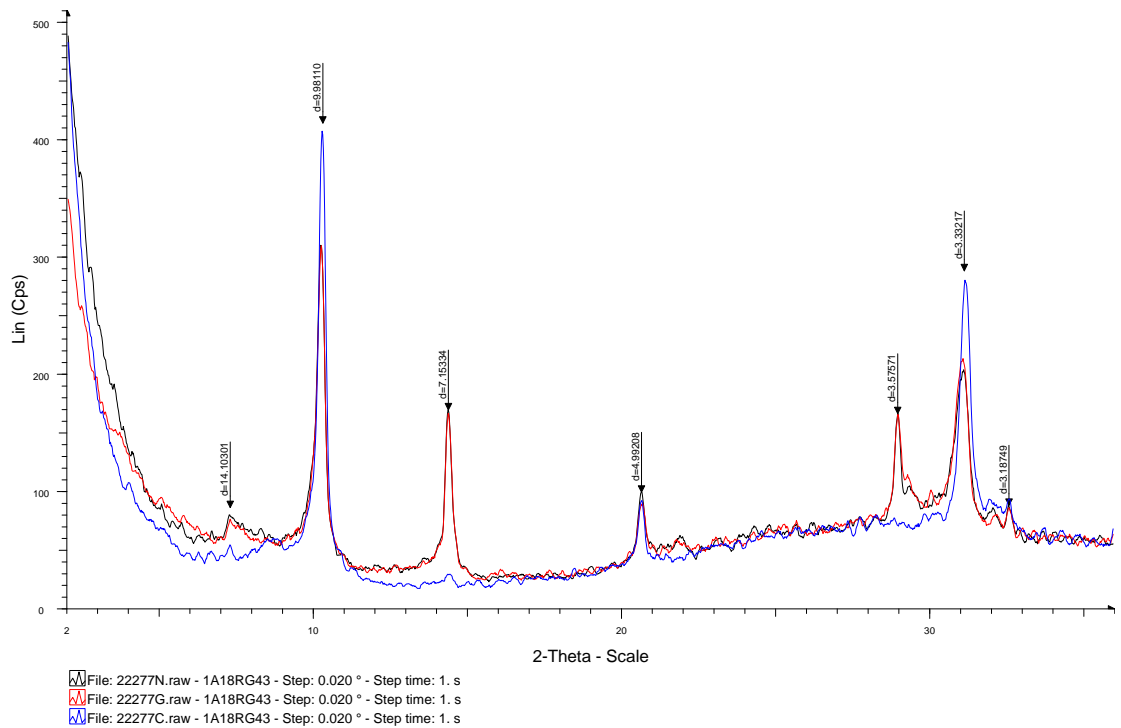
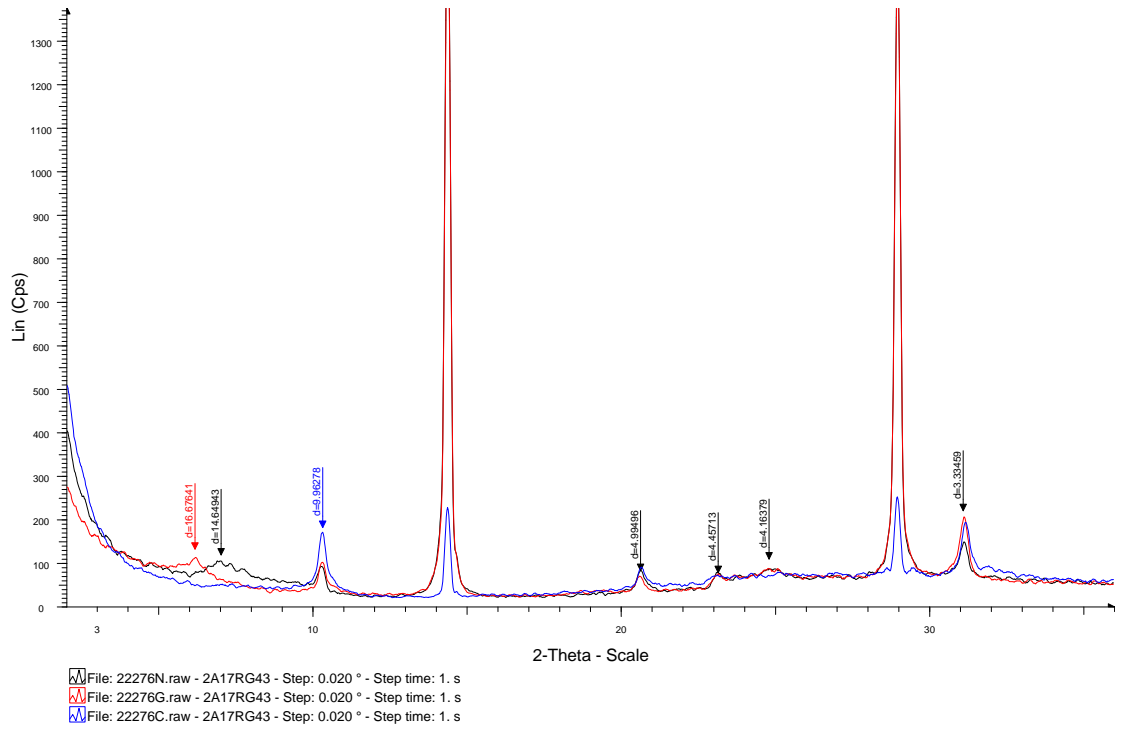


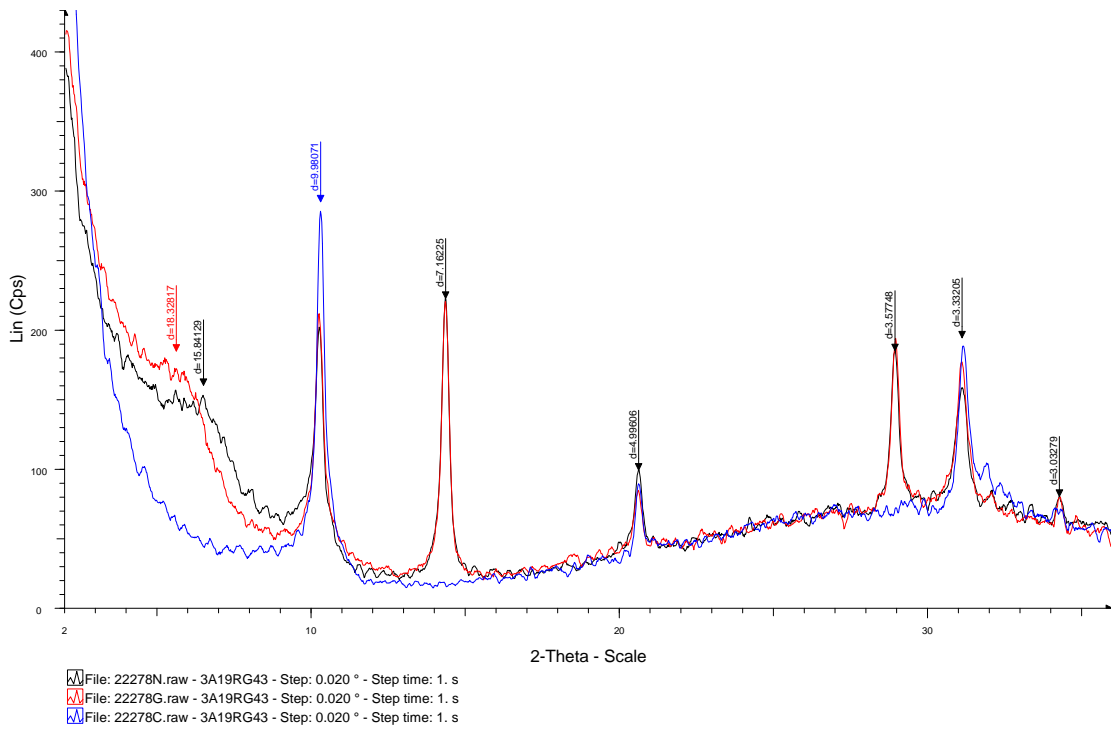












Annexe 6 - Résultats d'analyses des valeurs au bleu des 19 échantillons

RAPPORT D'ESSAIS N° 10-6-029-B

Coordonnées des échantillons

N°	X L2E (m)	Y L2E (m)	Commune
4A01RG43	729 945	2 035 633	TIRANGES
4B02RG43	733 623	2 036 523	VALPRIVAS
1B03RG43	740 673	2 036 460	BAS-EN-BASSET
3B04RG43	748 886	2 028 570	SAINTE-SIGOLENE
4C05RG43	745 036	2 022 298	GRAZAC
8B06RG43	744 805	2 009 824	ARAULES
3C07RG43	744 244	2 007 834	ARAULES
8A08RG43	734 640	2 006 814	SAINT-PIERRE-EYNAC
6A09RG43	730 281	2 014 203	ROSIERES
1C10RG43	725 584	2 015 066	LAVOUTE-SUR-LOIRE
8C11RG43	718 033	2 012 764	BLANZAC
5A12RG43	719 523	2 013 417	BLANZAC
2C13RG43	706 779	1 983 786	SAINT-CHRISTOPHE-D'ALLIER
2B14RG43	694 472	1 996 094	SAUGUES
9B15RG43	691 206	2 009 539	LANGÉAC
9A16RG43	687 874	2 031 124	LAVAUDIÉU
2A17RG43	686 531	2 032 102	FONTANNES
1A18RG43	683 096	2 033 680	LAMOTHE
3A19RG43	678 267	2 038 029	BOURNONCLE-SAINT-PIERRE

Origine des échantillons : RG Haute Loire

Identification des échantillons :

4A 01 RG43	8B 06 RG43	8C 11 RG43	9A 16 RG43
4B 02 RG43	3C 07 RG43	5A 12 RG43	2A 17 RG43
1B 03 RG43	8A 08 RG43	2C 13 RG43	1A 18 RG43
3B 04 RG43	6A 09 RG43	2B 14 RG43	3A 19 RG43
4C 05 RG43	1C 10 RG43	9B 15 RG43	

Nature des Essais et documents de référence :

- Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par essai à la tache (norme NF P 94-068)

Observations :

RESULTATS DES ANALYSES

RESULTATS DES ESSAIS D'ADSORPTION DE BLEU DE METHYLENE

Pour les essais d'adsorption au bleu de méthylène, les échantillons sont dispersés dans de l'eau, puis laissé au repos au moins 12 heures.

Référence de l'échantillon	VBS En g de bleu /100g de matériau
4A 01 RG43	0,80
4B 02 RG43	0,13
1B 03 RG43	1,53
3B 04 RG43	0,47
4C 05 RG43	1,22
8B 06 RG43	1,56
3C 07 RG43	4,70
8A 08 RG43	3,84
6A 09 RG43	4,49
1C 10 RG43	0,32

Référence de l'échantillon	VBS En g de bleu /100g de matériau
8C 11 RG43	3,56
5A 12 RG43	5,94
2C 13 RG43	0,29
2B 14 RG43	1,24
9B 15 RG43	0,45
9A 16 RG43	0,61
2A 17 RG43	1,75
1A 18 RG43	0,28
3A 19 RG43	6,91



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

**Service géologique régional
Auvergne**
12, avenue des Landais
63170 – Aubière - France
Tél. : 04 73 15 23 00

DÉPARTEMENT DE LA HAUTE-LOIRE

Aléa retrait-gonflement des argiles

