

Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de la Mayenne

d7-hta

Rapport final

BRGM/RP - 58896 -FR Novembre 2010

hitb

de-hia



89 3740 46 -625.5



Direction départementale des territoires de la Mayenne







Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de la Mayenne

Rapport final

BRGM/RP- 58896 -FR Novembre 2010

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2009 08RISD16

> E. Plat, T. Hewitt, C. Le Guern Avec la collaboration de M. Imbault, E. Prôno

Approbateur :	
Nom : Pierre Conil	
Date : 16/11/10	
Signature :	
	Approbateur : Nom : Pierre Conil Date : 16/11/10 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.



Direction départementale des territoires de la Mayenne









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

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

Plat E, Hewitt T., Le Guern C. avec la collaboration de Imbault M. et Prôno E. (2010) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de la Mayenne. Rapport BRGM/RP- 58896 -FR, 136 p, 30 ill. 6 ann. 3 cartes h.-t.

© BRGM, 2010, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

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

La Mayenne fait partie des départements français touchés par le phénomène. 24 sinistres imputés à la sécheresse y ont ainsi été recensés et localisés dans le cadre de la présente étude. En juillet 2010, 7 communes sur les 262 que compte le département ont été reconnues en état de catastrophe naturelle pour ces phénomènes, survenus entre juillet 2003 et septembre 2005, soit un taux de sinistralité de 2,7 % environ. Le département de la Mayenne se classe ainsi à la 73^{ème} place en termes de nombre total d'occurrences (arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle en distinguant par commune et par période). En juin 2010, le coût des sinistres dus à la sécheresse, indemnisés en France depuis 2003 au titre du régime des catastrophes naturelles, a été évalué par la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) à 4,5 milliards d'euros, dont 236 681 euros (estimation CCR de septembre 2008 en coût non actualisé) pour le département de la Mayenne, ce qui en fait le 77^{ème} département touché en termes 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 Mayenne, dans le but de définir les zones les plus exposées au phénomène de retrait-gonflement des argiles. Cette étude, réalisée par le BRGM dans le cadre de sa mission de service public sur les risques naturels, s'intègre dans un programme national de cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux qui concerne l'ensemble du territoire métropolitain.

L'étude a été réalisée par le Service Géologique Régional des Pays de la Loire, en collaboration avec le service Risques naturels et sécurité du stockage du CO₂ du BRGM (unité Risques de Mouvements de Terrain et Erosion). Le financement en a été assuré à hauteur de 25 % par la dotation de service public du BRGM, le complément ayant été financé par le Fonds national de prévention des risques naturels majeurs, dans le cadre d'une convention de cofinancement signée avec la Préfecture de la Mayenne.

La démarche de l'étude a d'abord consisté à établir une cartographie départementale synthétique des formations à dominante argileuse ou marneuse, affleurantes à subaffleurantes, à partir de la synthèse des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000. Les douze formations ainsi identifiées et cartographiées ont ensuite fait l'objet d'une hiérarchisation quant à leur susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retraitgonflement. 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 deux niveaux d'aléa (moyen et faible), aucune zone n'ayant été classée en aléa fort. Leur répartition est la suivante :

- 0,11 % de la superficie départementale est ainsi classée en aléa moyen ;
- 67,7 % de cette superficie est caractérisée par un aléa faible ;
- 32,2 % de la surface correspond à des zones *a priori* non concernées par le phénomène.

Il n'est toutefois pas exclu que, sur ces derniers secteurs considérés comme *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 Mayenne, 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	9
2.		11
	2.1. FACTEURS INTERVENANT DANS LE RETRAIT-GONFLEMENT DES	11
	2 1 1 Facteurs de prédisposition	12
	2 1 2 Facteurs de déclanchement	15
	2.2. MÉTHODOLOGIE	16
	2.2.1. Cartographie des formations argileuses ou marneuses	17
	2.2.2.Caractérisation lithologique, minéralogique et géotechnique des formations	17
	2.2.3. Examen des autres facteurs de prédisposition et de déclenchement	17
	2.2.4. Carte de susceptibilité	18
	2.2.5. Recensement et localisation géographique des sinistres	18
	2.2.6.Détermination des densités de sinistres	19
	2.2.7.Carte d'aléa	19
3.	Présentation du département de la Mayenne	21
	3.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE	21
	3.2. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE	22
	3.4 CONTEXTE GEOLOGIQUE	24 25
	3.5. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	27
	3.5.1. Aquifères de socle	27
	3.5.2. Aquifères sédimentaires	28
4.	Identification et cartographie des formations géologiques argileuses et	
	marneuses	29
	4.1. ORIGINE DES SOLS ARGILEUX DANS LE CONTEXTE GEOLOGIQUE	20
		29 30
	4.2.1 Máthada utilisáa	30
	4.2.2 Etablicament de la parte des formations à composante argileuro	22
	4.3. LITHOSTRATIGRAPHIE DES FORMATIONS A COMPOSANTE ARGILEU	SE35
	4.3.1. Formations superficielles du Quaternaire	35
5.	Caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique des formati	ons
	argileuses et marneuses	45
	5.1. CRITERES DE HIERARCHISATION	45
		45
	5.1.2. Methode de classification	45 16
	5.2.1 Définition du critère lithologique et barème	0+ 16
	5.2.1. Deminion du chiere innologique et bareme	40
	5.2.2. Garacterisation innoiogique	40

	5.3. CRITERE MINERALOGIQUE	47
	5.3.1.Définition du critère minéralogique et barème	47
	5.3.2. Caractérisation minéralogique	48
	5.4. CRITÈRE GÉOTECHNIQUE	50
	5.4.1.Définition du critère géotechnique et barème	50
	5.4.2.Teneur en eau (Wn)	51
	5.4.3.Indice de plasticité (Ip)	51
	5.4.4.Essais au bleu de méthylène (Vb)	52
	5.4.5.Retrait linéaire (RI)	52
	5.4.6.Coefficient de gonflement (Cg)	53
	5.4.7.Caractérisation géotechnique	54
6.	Élaboration de la carte de susceptibilité	57
	6.1. DETERMINATION DU DEGRE DE SUSCEPTIBILITE	57
	6.2. SYNTHESE	58
_	6.3. CARTE DE SUSCEPTIBILITE	58
7.	Analyse de la sinistralité	61
	7.1. PROCEDURE DE DEMANDE DE RECONNAISSANCE DE L'ETAT DE	64
		61
		63
	7.2.1. Localisation des communes sinistrees	63
	7.2.2. Analyse des périodes de reconnaissance de l'état de catastrophe	65
	7.3. COLLECTE DES DONNEES DE SINISTRES	65
	7.3.1.Origine des données	65
	7.3.2.Communes sinistrées	67
	7.3.3. Sinistres par formation argileuse	67
	7.4. FRÉQUENCE D'OCCURRENCE RAPPORTÉE À LA SURFACE URBANIS	SÉE69
	7.4.1. Détermination de la densité d'urbanisation par formation	69
	7.4.2. Détermination du critère densité de sinistres	70
8.	Carte d'aléa	73
	8.1. DETERMINATION DU NIVEAU D'ALEA	73
	8.2. CARTE D'ALEA.	75
~	8.3. COHERENCE AVEC LES DEPARTEMENTS LIMITROPHES	76
9.		79
10	J. Bibliographie	81

Liste des illustrations

Illustration 1 – Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche	11
Illustration 2 – Carte de présentation du département de la Mayenne	22
Illustration 3 - Carte schématique des unités géomorphologiques en Mayenne (source : préfecture de la Mayenne)	23
Illustration 4 - Carte géologique schématique de la Mayenne	25
Illustration 5 - Données météorologiques de la Mayenne (source : Météo-France)	26
Illustration 6 – Modèle conceptuel des profils d'altération des roche (Wyns, 2001)	27
Illustration 7 – Assemblage des cartes géologiques à 1/50 000 du département de la Mayenne	31
Illustration 8 - Carte des formations argileuses de la Mayenne	34
Illustration 9 – Hiérarchisation de la susceptibilité en fonction de la nature argileuse de la formation	46
Illustration 10 - Note lithologique des formations argileuses retenues	47
Illustration 11 – Hiérarchisation des formations en fonction du pourcentage de minéraux gonflants	47
Illustration 12 – Synthèse des données minéralogiques et note minéralogique	49
Illustration 13 – Barême d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de l'indice de plasticité de la formation	52
Illustration 14 – Barême d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la valeur au bleu de méthylène de la formation	52
Illustration 15 – Barême d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du retrait linéaire de la formation	53
Illustration 16 – Barême d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du coefficient de gonflement de la formation	53
Illustration 17 – Synthèse des données géotechnique recueillies	55
Illustration 18 - Barême d'attribution d'un niveau de susceptibilité d'une formation argileuse	57
Illustration 19 - Susceptibilité des formations argileuses retenues	57
Illustration 20 - Superficie des formations par niveau de susceptibilité	58
Illustration 21 - Carte de susceptibilité au retrait-gonflement dans le département de la Mayenne	60
Illustration 22 – Liste des communes et des arrêtés de catastrophe naturelle "mouvement de terrain consécutif à la réhydratation ou la sécheresse" dans la Mayenne	63
Illustration 23 – Communes concernées par des arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse et nombre de sinistres recensés et localisés	64

Illustration 24 – Répartition géologique des sinistres recensés et localisés	68
Illustration 25 – Carte des zones bâties sur le département de la Mayenne (source de données BD Topo IGN)	70
Illustration 26 – Détermination de la note densité de sinistres pour chaque formation argileuse ou marneuse du département de la Mayenne	71
Illustration 27 – Niveau d'aléa des formations argileuses de la Mayenne	74
Illustration 28 – Classement des formations en fonction de leur niveau d'aléa	74
Illustration 29 – Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement de Mayenne	75
Illustration 30 – Juxtaposition des cartes l'aléa limitrophe à la Mayenne	77

Liste des annexes

Annexe 1 – Rappel sur le mécanisme de retrait-gonflement des argiles	91
Annexe 2 – Modalités d'interprétation minéralogique des données de sol (granulométrie, CEC, …) mises à disposition par l'AGNO CAMPUS OUEST	95
Annexe 3 – Résultats d'analyses des échantillons prélevés pour la caractérisation minéralogique et géotechnique	99
Annexe 4 – Sinistres	. 123
Annexe 5 – Liste et coordonnées des organismes ayant fourni des données de sinistres et/ou géotechniques	. 127
Annexe 6 – Regroupement des formations de la carte harmonisée pour chaque formations argileuses	. 131

1. Introduction

L es 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 depuis été constatés à 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), environ 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 2003 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 des Pays de la Loire est relativement concernée par ce phénomène, et a connu, notamment au cours des étés 2003 et 2005, une forte occurrence de sinistres, en particulier en ce qui concerne le Maine-et-Loire, la Sarthe et la Vendée (respectivement 375, 284 et 206 arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle depuis 1989), ainsi que, dans une moindre mesure, la Loire-Atlantique et la Mayenne (respectivement 48 et 8 arrêtés). En juillet 2010, 7 communes sur les 262 que compte le département de la Mayenne ont ainsi été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle sécheresse pour des périodes comprises entre juillet 2003 et septembre 2005, soit un taux de sinistralité d'environ 2,7 %.

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

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

La présente étude a été réalisée par le Service Géologique Régional des Pays de la Loire, en collaboration avec le service Risques naturels et sécurité du stockage de CO₂ du BRGM (unité Risques de Mouvements de Terrain et Erosion). Le financement en a été assuré à hauteur de 25 % par la dotation de service public du BRGM, le complément ayant été financé par le Fonds national de prévention des risques naturels majeurs, dans le cadre d'une convention de cofinancement signée avec le préfet de la Mayenne le 17 novembre 2007.

Cette étude s'intègre dans un programme national de cartographie de l'aléa retraitgonflement des sols argileux qui doit concerner à terme l'ensemble du territoire métropolitain. Les départements d'ores et déjà couverts par de telles cartes d'aléa sont diffusés sur le site internet <u>www.argiles.fr</u>.

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

a) 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 est basée sur l'exploitation des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000 éditées par le BRGM, harmonisées à l'échelle du département. Elle comporte un inventaire et une cartographie des formations affleurantes à sub-affleurantes, à composante argilo-marneuse.

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.

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 μ m).

La géométrie de la formation argileuse influe aussi sur la susceptibilité au retraitgonflement : 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 argileux argileux argileux interstratifiés, de la vermiculite et de certaines chlorites.

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

b) 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.

c) Géomorphologie

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

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

Par ailleurs, les zones calcaires 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.

d) 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.

e) 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

a) 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.

b) Facteurs anthropiques

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

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

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

2.2. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie de cartographie de l'aléa développée par le BRGM a été mise au point à partir d'études similaires menées d'abord dans le département des Alpes de Haute-Provence (Chassagneux *et al.*, 1995; Chassagneux *et al.*, 1996) et des Deux-Sèvres (Vincent *et al.*, 1998), puis dans l'Essonne (Prian *et al.*, 2000) et en Seine-Saint-Denis (Donsimoni *et al.*, 2001). Elle a été validée par le Ministère en charge de l'environnement et est désormais appliquée dans le cadre d'un programme qui concernera a terme l'ensemble du territoire métropolitain (Vincent *et al.*, 2008), ce qui permettra d'obtenir des résultats homogènes au niveau national. La cartographie de l'aléa des départements voisins à la Mayenne est d'ores-et-déjà terminée (Orne, Maine-et-Loire, Sarthe) ou en cours de validation (Ille-et-Vilaine, Manche).

2.2.1. Cartographie des formations argileuses ou marneuses

La cartographie des formations argileuses et marneuses du département a été réalisée à partir des cartes géologiques éditées par le BRGM à l'échelle 1/50 000 et qui avaient fait l'objet d'un travail d'harmonisation préalable afin d'établir une carte géologique départementale harmonisée (Vernhet, 2010). Ont également été prises en compte des coupes de forage de la Banque des données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM, complétées et actualisées par quelques données ponctuelles issues des rapports d'expertise de sinistres ou d'études géotechniques locales.

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

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 dans différents cadres (expertises postsinistres, projets de construction ou d'aménagement).

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 complété par la consultation des dossiers conservés par la Caisse Centrale de Réassurance, par la Préfecture et par certains bureaux d'études ou entreprises qui ont accepté que leurs archives soient exploitées à cet effet.

2.2.6. Détermination des densités de sinistres

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

Dans un souci de rigueur et étant donnée la grande diversité du taux d'urbanisation d'un point à un autre du département, il est apparu nécessaire, conformément à la méthodologie adoptée au niveau national, de pondérer ces densités de sinistres par la surface réellement bâtie de chacune des formations géologiques. Cette surface a été calculée à partir de la couche « bâti » de la BDTopo de l'IGN, mise à disposition par la Direction Départementale des Territoires (DDT) de la Mayenne dans le cadre de cette étude. Le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux affectant essentiellement les structures légères correspondant aux habitations individuelles, il a été choisi d'exclure de ce calcul de surface les bâtiments industriels, agricoles et commerciaux, religieux, sportifs, administratifs ou de transport, ainsi que les châteaux et divers monuments. Au final, les seuls bâtiments pris en compte dans le calcul sont ceux correspondant à la catégorie « autre » et à la nature « autre » de la BDTopo.

Ainsi, une hiérarchisation des formations géologiques argileuses et marneuses a été réalisée en fonction du taux de sinistralité ramené à 100 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 Mayenne

3.1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE

Le département de la Mayenne est situé au nord-ouest de la France et fait partie de la région Pays-de-la-Loire. Il est encadré par les départements de la Manche, l'Orne, le Maine-et-Loire, la Sarthe et l'Ille-et-Vilaine.

La Mayenne a globalement la forme d'un quadrilatère allongé dans la direction nordsud (Illustration 2) avec une superficie de 5 215,24 km^{2 1}; sa plus grande largeur estouest est de 62 km, contre 83 km maximum du nord au sud. Au recensement INSEE de 1999 ce département comptait 285 338 habitants (avec une estimation à 299 500 habitants en 2008). La densité de population est de 55 hab/km², ce qui est bien inférieur à la moyenne nationale (94 hab/km²).

La Mayenne est divisée en 262 communes réparties dans 32 cantons et 3 arrondissements. La préfecture est Laval, située au centre du département, comptant 53 896 habitants en 2008 avec une densité moyenne de 1 576 hab/km². Les deux sous-préfectures sont Mayenne, au nord de Laval (13 800 habitants, 690 hab/km² en 2008), et Château-Gontier, au sud de Laval (11 131 habitants, 399 hab/km² en 1999).

Ce département présente un des plus faible taux de chômage de France (5,3 % au 31 décembre 2006 selon l'INSEE) ainsi que la plus forte activité féminine. Les secteurs d'activité sont variés : 25 % de la population active travaille dans l'industrie ; 15 % sont répartis dans 4 200 entreprises artisanales ; l'agriculture emploie 13 600 personnes et se classe ainsi au 2^e rang national pour la production de viande bovine, 5^e rang pour le porc et le lait, 11^e rang pour la volaille.

¹ Superficie calculée sous MapInfo par la fonction "CartesianAera". Autre superficie : 5 175 km² (source : Wikipedia)



Illustration 2 – Carte de présentation du département de la Mayenne

3.2. CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE

La Mayenne se trouve dans le prolongement du Massif Armoricain et présente donc un relief faiblement accentué, constitué d'un ensemble de chaînons peu élevés et de vallées peu profondes où circulent de nombreux ruisseaux. Les plaines montrent une grande diversité de faune et de flore ; elles sont dominées par le bocage où des parcelles de cultures, les prairies et les nombreux étangs sont bordés de haies basses, de rangées d'arbres ou même de forêts ; ces dernières peuvent être localement assez denses. La principale rivière a donné son nom à la Mayenne ; elle coule du nord au sud sur 204 km (dont 113 km en Mayenne) et partage ce département en deux parties presque égales ; elle prend sa source au nord-est du département, près du Mont des Avaloirs, qui culmine à 417 m d'altitude et domine tout le nord-ouest de la France.

L'altitude moyenne du département est de 150 m, et le point le plus bas est la Sarthe, rivière à l'extrême sud-est de la Mayenne (20 m d'altitude).



Illustration 3 - Carte schématique des unités géomorphologiques en Mayenne (source : préfecture de la Mayenne)

Le département de la Mayenne est composé de 6 unités paysagères (Illustration 3) :

• les Marches de Bretagne au nord-ouest montrent un paysage de vallonnement bocager avec un relief fortement ondulé ; le sous-sol est composé de roches granitiques, schistes Briovériens et grès ; l'eau est très diffuse et l'atmosphère humide. L'occupation du sol est dominée par la culture céréalière dans un maillage bocager moyennement dense où les haies sont composées de cépées et châtaigniers. L'habitat est surtout agricole et très diffus.

• les Collines du Maine au nord-est forment un relief accidenté naissant brusquement sur un substrat de roches dures ; le point culminant du département (le Mont des Avaloirs) fait partie de ces collines ; le réseau hydrographique est dense et sinueux. L'occupation du sol est étagée et structurée, avec un bocage en maillage régulier et un boisement mixte des sommets (conifères et feuillus). L'activité agricole est ici surtout basée sur l'élevage (bovin, ovin, porcin, volailles) et la conservation des prairies naturelles.

• le cœur de la Mayenne montre un relief beaucoup plus doux, avec un soussol constitué de schistes, grès et calcaires, et de nombreux étangs et vallées ; c'est un paysage d'eau puisqu'il est parcouru entre autres par la Mayenne. La position géographique de cette unité en a fait le cœur économique et humain du département, avec un développement industriel, des infrastructures (le TGV et l'autoroute Paris-Rennes traversent cette région d'est en ouest) et une vraie urbanisation ; on y retrouve les 3 principales villes de la Mayenne. Cependant l'agriculture reste aussi présente dans un bocage peu homogène fait de vergers et autres zones boisées.

• le Haut Anjou Mayennais au sud se trouve dans la continuité de la vallée de la Mayenne ; le relief est ample et vallonné sur un substrat schisteux relativement tendre, avec des vallées larges et évasées. Cette unité est très tournée vers l'agriculture céréalière (colza, tournesol, orge, avoine, ...) mais aussi les essences fruitières (vergers et vignes). La couverture végétale est éparse et le réseau bocager plus déstructuré : on trouve fréquemment des îlots d'arbres au milieu des parcelles cultivées.

• le Pays de l'Erve à l'est montre un relief plat entrecoupé de vallées parfois encaissées. Le sous-sol est essentiellement calcaire et les rivières sont très présentes. Cela permet le développement des cultures céréalières et la préservation de prairies naturelles dans un réseau bocager encore dense ; ce maillage est continu, fait de haies hautes et basses.

• le Pays Ardoisier au sud-ouest présente un relief régulièrement vallonné en bandes parallèles à cause d'une succession de grès Armoricains durs et de schistes noirs ardoisiers plus tendres. La limite supérieure de cette unité paysagère est marquée par ce changement de substrat géologique qui a permis de développer un fort patrimoine industriel ardoisier. C'est aussi un espace agricole tourné vers les cultures de blé et maïs avec un maillage bocager peu dense.

3.3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Une carte géologique très simplifiée de la Mayenne, tirée de la carte géologique des Pays-de-la-Loire à 1/250 000 illustre ce contexte (Illustration 4). L'histoire géologique de ce département correspond à celle du Massif Armoricain.

La Mayenne se situe géologiquement parlant dans le domaine médio-Armoricain oriental, soit dans un bloc délimité au nord et au sud par les cisaillements Armoricains. Ce massif est constitué principalement de formations mises en place au cours de l'orogénèse Hercynienne (Chantraine *et al.*, 2005). Il s'agit notamment de formations magmatiques (plutoniques et volcaniques) ainsi que des dépôts sédimentaires qui ont subit une tectonique importante, comme en témoignent les nombreuses failles, et un métamorphisme au cours de cette orogénèse. Ce secteur comprend les formations suivantes :

• les schistes (roches méta-sédimentaires) affleurent sur les 2/3 du département ; ils sont de nature et d'âge variables (schistes à cornéennes : Protérozoïque ; schistes et calcaires : Cambrien ; schistes seuls : Ordovicien ; schistes et quartzites : Silurien ; schistes et houille : Carbonifère ; schistes et grès : Briovérien et Paléozoïque) ;

• des formations sédimentaires du Paléozoïque moins transformées sont encore présentes ; ce sont des grès et calcaires qui affleurent dans des bassins étirés globalement d'ouest en est sur le département ;

• les plutons granitiques du Protérozoïque-Paléozoïque couvrent plus de la moitié de la partie nord de la Mayenne ;

• quelques formations volcaniques, surtout différenciées, affleurent ponctuellement à l'est du département.

Des formations sédimentaires du Cénozoïque sont également présentes. Elles témoignent d'une transgression marine et reposent localement sur le socle dans de petits bassins. Il s'agit de dépôts gréseux datés de l'Oligocène-Eocène et de formations essentiellement sableuses du Miocène-Pliocène reposant sur le granite de Mayenne, ainsi que de sables, argiles et graviers (Sables de Bretagne) du Néogène

dans le sud du département (Chantraine *et al.*, 1997). Leur épaisseur varie de quelques mètres (placages résiduels) à quelques dizaines de mètres (paléo-vallées). Enfin, des dépôts sédimentaires récents peuvent être observés en limite du département ; ce sont des alluvions fluviatiles des basses terrasses et fonds de vallées d'âge Pléistocène. Ces formations sont constituées de sables, galets et graviers d'origines diverses emballés dans une matrice argilo-silteuse (Chantraine *et al.*, 1997).



Illustration 4 - Carte géologique schématique de la Mayenne

3.4. CONTEXTE CLIMATIQUE

Le climat de la Mayenne est proche de celui du bassin de la Seine (région Séquanienne) : l'atmosphère est humide de par la présence de nombreux cours d'eau, étangs, collines et forêts, ce qui en fait un département en moyenne plus frais que ceux alentours. Cependant, de par sa proximité avec la Manche, le climat de la Mayenne subit une forte influence océanique.

La température est douce et montre de faibles écarts au cours de l'année. Les hivers sont assez cléments, sans un arrêt marqué de la végétation ; les fortes gelées sont peu fréquentes mais elles peuvent provoquer des dégâts aux cultures. Les étés ne connaissent pas de grosses chaleurs. La température en janvier, mois le plus froid de l'année, avoisine les 4 à 5°C sans réelle différence entre le nord et le sud ; les mois les plus chauds sont juillet et août et affichent des températures de 18 à 20°C seulement en moyenne. La température moyenne annuelle est de 11°C à Laval.

L'ensoleillement annuel moyen est compris entre 1 700 heures au Nord et 1 800 heures au Sud. La moitié de cet ensoleillement se produit de mai à août où le soleil est présent pendant plus de 200 heures par mois.

Les pluies fréquentes (160 à 180 jours par an) ne sont négligeables en aucune saison, mais présentent un maximum d'octobre à février (Illustration 5) ; rarement très intenses, hormis sous les orages, elles tombent sous forme de bruines, pluies fines ou crachins. Les vents d'ouest ou sud-ouest venant de l'Océan Atlantique contribuent à entretenir une humidité permanente qui se condense sous des formes multiples : rosée, brouillards et brumes. Les cumuls pluviométriques sont très variables selon les secteurs géographiques mais dépassent partout en moyenne les 700 mm. Il y a un gradient nord-sud bien marqué (en moyenne 1 000 mm d'eau annuellement au nord contre 700 mm seulement au sud du département). C'est en décembre et janvier que les pluies les plus importantes sont recensées. Les cumuls mensuels dépassent fréquemment les 100 mm notamment sur le Bocage Mayennais. Les mois de juin à août font en revanche partie des mois les moins arrosés de l'année. Les quantités de pluie, qui varient entre 40 et 50 mm ces mois-là, sont essentiellement produites par des précipitations orageuses.

Les vents d'ouest à sud-ouest sont prédominants quelle que soit la saison mais les journées ventées demeurent plus rares que sur les départements côtiers. On ne compte que 34 jours par an en moyenne où des rafales soufflent à plus de 60 km/h à Laval. Le vent ne dépasse généralement les 100 km/h qu'une fois par an.

Normales de températures et de précipitations



Illustration 5 - Données météorologiques de la Mayenne (source : Météo-France)

D'autres phénomènes météorologiques peuvent être observés selon la période de l'année ou le lieu. Les brouillards (60 à 70 j/an) présentent un maximum dans la moitié l'ouest de la Mayenne et un minimum à l'est. Les orages (15 à 20 j/an) ont une répartition inverse : maximum à l'est et minimum à l'ouest. La grêle présente un maximum dans la moitié Nord (5 à 10 j/an) et un minimum dans la moitié Sud (moins de 5 j/an). Enfin, la nébulosité (couverture nuageuse du ciel) moyenne annuelle est décroissante du Nord (7/10 du ciel) à l'extrême Sud-Est (moins de 6/10 du ciel).

3.5. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

3.5.1. Aquifères de socle

Le département de la Mayenne repose principalement sur le socle du Massif Armoricain. Composé à l'origine de roche massives et peu perméables, ce socle a subi, postérieurement à sa formation, des altérations et une fracturation importante d'origine tectonique. Ces phénomènes ont permis aux roches du socle d'acquérir une perméabilité et une porosité suffisante pour renfermer des aquifères. Ces paramètres varient verticalement suivant un profil d'altération (Illustration 6) (Wyns, 2001) ou latéralement, suivant le degré de fracturation de la roche. Ces modifications au cours du temps expliquent la présence actuelle de deux types d'aquifères distincts :

- un horizon superficiel altéré, de porosité importante, qui lui permet de jouer un rôle de réservoir pour les eaux, d'une profondeur de 0 à environ 30 mètres.
- un horizon inférieur, fissuré et compartimenté, où la quantité d'eau est très variable, car elle dépend de la connexion et de l'ouverture du réseau de failles et de fractures. La profondeur de ces aquifères est comprise entre 30 et 60 mètres.



Illustration 6 – Modèle conceptuel des profils d'altération des roche (Wyns, 2001)

En Mayenne, les aquifères de surface se trouvent principalement dans les arènes sableuses ou argilo-sableuses dérivant des formations de granitoïdes (moitié nord du département).

En ce qui concerne les aquifères des milieux fissurés, ils se situent préférentiellement dans les formations du Briovérien, les granitoïdes cadomiens, les cornéennes et les schistes métamorphisés précambriens, ainsi que quelques grès, schistes et calcaires du Paléozoïque, sous réserve que ces formations soient suffisamment fissurées et que les fractures ne soient pas colmatées par des argiles d'altération, pour que l'eau puisse y être stockée et circuler. Les calcaires du Carbonifère sont particulièrement propices car en plus d'être fissurés ils sont aussi karstifiés, néanmoins de façon irrégulière. Il en va de même pour les calcaires du Cambrien. De façon générale, les nappes de socle sont d'extension très variable, mais elles peuvent toutefois être exploitées pour des petites collectivités. L'eau est généralement de bonne qualité mais peut être localement trop minéralisée en fer et manganèse.

3.5.2. Aquifères sédimentaires

La Mayenne présente peu de formations de bassin sédimentaire reposant sur le socle ; les plus importantes sont les différents sables datés du Cénomanien au Pliocène. Certaines de ces formations renferment des aquifères directement alimentés par l'infiltration des eaux de ruissellement et de précipitation.

De manière générale, les alluvions du Plio-quaternaire peuvent également renfermer des nappes alluviales. Ces aquifères sont généralement alimentés par les rivières adjacentes.

De manière générale, les aquifères sédimentaires et alluviaux ont une forte capacité de production en eau potable ; cependant, ils sont souvent vulnérables aux pollutions.

Dans le département de la Mayenne, les sables et graviers attribués au Pliocène sont localement aquifères. Ils ne sont généralement épais que lorsqu'ils sont piégés dans le karst des calcaires carbonifères et dans ce cas, il s'agit de l'aquifère de ces calcaires. Les sables du Cénomanien peuvent aussi potentiellement contenir des aquifères, selon leur épaisseur et leur teneur en argile.

Les alluvions de la Mayenne sont peu exploitables car elles sont en général de faible extension, que ce soit latéralement ou verticalement, et contiennent une proportion non négligeable d'argile.

4. Identification et cartographie des formations géologiques argileuses et marneuses

4.1. ORIGINE DES SOLS ARGILEUX DANS LE CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL

Avant de présenter en détail la répartition et la classification des sols argileux sur le département de la Mayenne, il est nécessaire d'évoquer leur origine.

La Mayenne est située en totalité sur le socle du Massif Armoricain, ce qui explique que les terrains sédimentaires (souvent plus ou moins argileux) y restent rares. Cependant, le Massif Armoricain a connu des phénomènes d'altération et d'érosion importants au cours du temps après sa formation lors de l'orogénèse hercynienne. Au Paléocène et au début de l'Eocène, le Massif Armoricain a subi un important épisode d'altération de type latéritique (sous climat chaud et humide). Cette étape a été suivie d'épisodes d'érosions à l'Oligocène et au Miocène, puis d'une nouvelle étape d'altération, mais de type ménagée cette fois-ci (climat tempéré) au Pliocène (Brault, 2002).

Les produits résultants de l'altération des roches peuvent présenter des quantités importantes d'argiles. Une partie de celles-ci provient de la transformation de minéraux tels que les micas, feldspaths, pyroxènes ou amphiboles. La latérisation du Massif Armoricain a engendré la formation d'altérites dont la fraction argileuse est composée principalement de kaolinite en surface et de smectites et de vermiculite vers les profondeurs, et ce sur des épaisseurs pouvant être décamétriques (Estéoule-Choux, 1967 et Brault, 2002). Néanmoins la composition des argiles rencontrées dans les altérites peut varier en fonction de la nature de la roche mère, du climat, de la topographie et de la durée du phénomène d'altération (Estéoule-Choux, 1967 et Wyns, 2001). L'altération des roches de socle conduit donc à la formation de produit contenant généralement une fraction sableuse et une fraction argileuse, dont les proportions sont très variables.

En fonction du processus d'altération et de l'érosion ultérieure qui a pu décaper une partie de ces altérites, la formation affleurante peut être constituée d'altérites argileuses, d'altérites sableuses, de roches altérées mais non décomposées ou de roches saines. Les produits d'altération décapés se retrouvent alors dans les bassins sédimentaires. L'action de l'érosion fait donc varier les épaisseurs d'altérites présentes sur la formation dont elles sont issues.

4.2. DOCUMENTS ET METHODOLOGIE UTILISES

4.2.1. Méthode utilisée

L'objectif est de disposer d'une carte des formations géologiques à dominante argilomarneuse du département de la Mayenne, afin d'identifier les zones sensibles au retrait-gonflement.

La première étape a consisté à cartographier toutes les formations argilo-marneuses du département, y compris les formations superficielles d'extension locale, pour en dresser un inventaire et synthétiser les différentes cartes géologiques prises en compte. Des regroupements ont été réalisés dans une seconde étape (annexe 6), 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 de la carte départementale géologique harmonisée du département de la Mayenne (Vernhet, 2010) qui comprend 144 formations, et 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.

L'assemblage des cartes géologiques inclut les 18 coupures suivantes en totalité ou en partie (Illustration 7) : Landivy (n°248), Domfront (n°249), La Ferté-Macé (n°250), Fougère (n°283), Ernée (n°284), Mayenne (n°285), Villaines-La-Juhel (n°286), Vitré (n°318), Laval (n°319), Evron (n°320), Sillé-Le-Guillaume (n°321), La Guerche-de-Bretagne (n°354), Cossé-Le-Vivien (n°355), Meslay-du-Maine (n°356), Loué (n°357), Châteaubriant (n°389), Craon (n°390) et Château-Gontier (n°391).



Illustration 7 – Assemblage des cartes géologiques à 1/50 000 du département de la Mayenne

Le Massif Armoricain en matière d'acquisition de ces cartes géologiques à 1/50 000 a pris un certain retard de par la complexité de sa géologie et des conditions difficiles d'affleurement des roches. Malgré tout, le lever des cartes géologiques a pu être finalisé afin de permettre la réalisation de cette étude et le travail d'harmonisation. Cependant la réalisation d'une carte géologique au 1/50 000 est un travail considérable, de longue haleine, qui se réalise en deux temps : (1) la réalisation de la carte proprement dite, faite par l'acquisition de terrain et (2) la rédaction de la notice qui accompagnera la carte tout au long de sa vie. Ainsi donc les notices des cartes géologiques d'Ernée, Mayenne, Vitré, Laval, Cossé-le-Vivien, Châteaubriant et Craon ne sont pas disponibles à ce jour et c'est donc l'information géologique contenue dans les cartes voisines qui a été valorisée. Les autres cartes, dont la notice est disponible, ont été éditées entre 1977 et 1998.

Ces différentes cartes ne répondent pas aux mêmes objectifs cartographiques, qui ont varié dans le temps. Les formations superficielles, de grande importance pour cette

étude, ont été davantage prises en compte dans les périodes très récentes, les travaux anciens étant en général plus axés sur la représentation du substratum et de la structure géologique.

La connaissance partielle et très variable des altérites d'une feuille à l'autre a représenté une difficulté majeure pour établir la carte des formations argileuses. Une cartographie spécifique des altérites aurait été nécessaire afin de préciser l'extension des couvertures d'altérites argileuses, un tel travail dépassant largement le cadre de la présente étude. Pour palier à ce problème, une étude bibliographique a été faite principalement à partir des thèses d'Estéoule-Choux (1967) et de Brault (2002) ainsi que d'autres publications scientifiques telles que celle de Wyns (2001). Cette recherche a permis d'obtenir des informations générales sur l'altération des différentes formations du socle, à l'échelle du Massif Armoricain.

On peut noter également que la carte harmonisée du département de la Mayenne permet d'identifier dans certains secteurs les formations d'altération (couche « Surcharges »). Cette donnée est cependant très hétérogène, car elle dépend de l'information présente sur les cartes géologiques au 1/50 000. Le croisement des données disponibles (BSS...) avec cette couche a permis de vérifier que certains secteurs altérés ainsi cartographiés n'apparaissaient pas comme franchement argileux, et que d'autres au contraire étaient argileux par altération sans que l'information cartographique n'apparaisse. Il a donc finalement été choisi de n'utiliser cette couche que comme un outil, mais pas comme une donnée de base. Les formations potentiellement argileuses par altération, notamment, ont en général été conservées dans leur ensemble à défaut de cartographie homogène sur l'ensemble du département.

En complément de la carte géologique harmonisée et des cartes géologiques au 1/50 000, les données de la BSS, les publications scientifiques, les analyses de sol issues du levé de la carte pédologique au 1/100 000 (programme IGCS : Inventaire, Gestion et Conservation des Sols), ainsi que les descriptions lithologiques issues des dossiers d'étude géotechnique collectés pour la caractérisation des formations argileuses et marneuses ont été exploités. Toutes les données disponibles n'ont cependant pu être intégrées en raison de leur nombre très élevé.

La cartographie, réalisée à l'échelle 1/50 000 (qui correspond donc à l'échelle de validité de la donnée brute), numérisée, puis synthétisée, identifie les formations argileuses et marneuses ainsi que toute formation pouvant renfermer des intercalations ou des lentilles argileuses ou marneuses significatives.

4.2.2. Etablissement de la carte des formations à composante argileuse

En complément de la carte géologique harmonisée de la Mayenne et des cartes géologiques à 1/50 000, la détermination des formations argileuses est donc basée sur l'exploitation des diverses données recueillies pour cette étude : sondages géotechniques, données de la BSS, localisation de sinistres, indices d'argiles provenant de l'étude bibliographique, etc.

C'est principalement à partir de l'étude bibliographique, complétée par la consultation de la Banque des données du Sous-Sol (BSS) du Service Géologique Régional et des

notices de des cartes géologiques à 1/50 000, que le choix et l'assemblage des formations de socle de la carte harmonisée a été fait pour obtenir la carte des formations argileuses de la Mayenne. Ce choix repose sur l'hypothèse que l'analogie est possible entre l'altération d'une même formation d'un endroit à un autre.

Les formations de socle ont été gardées en totalité lorsque l'étude bibliographique révélait une altération de celles-ci en des produits plus ou moins argileux. Les données de la BSS n'étant pas assez nombreuses pour effectuer un redécoupage, elles ont plutôt servi à confirmer leur état d'altération. Le regroupement a été effectué suivant l'âge des formations du socle, car les altérations sont décrites ainsi dans la thèse d'Estéoule-Choux (1967). Par exemple, les formations sédimentaires paléozoïques, principalement du bassin de Laval, ont des lithologies semblables correspondant à des alternances de siltites, d'argilites, de grès et parfois de calcaires, le tout étant plus ou moins schistosé et à dominante variable.

Certaines formations sont considérées comme non argileuses, partant du principe que leurs altérites seraient plutôt sableuses (ou décapées). Néanmoins, ces formations peuvent également présenter des poches d'argiles non cartographiées.

La carte ainsi établie apparaît comme une première proposition, mais est entachée de nombreuses incertitudes. Cette carte évoluera avec l'évolution des connaissances. Notamment, la cartographie des altérites et leur description minéralogique devrait être menée de manière systématique sur le département afin d'en avoir une vision homogène. 12 formations argileuses sont ainsi identifiées (Illustration 8). Ces ensembles sont tous caractérisés par la présence d'argiles, mais ils se différencient par des disparités notables et deux cas peuvent se présenter :

• les formations intrinsèquement hétérogènes, telles que les alluvions, qui sont constituées d'un mélange de divers matériaux dont des argiles ou des marnes, mais aussi des éléments plus grossiers (limons, sables, galets, ...). L'argile est soit mélangée aux autres matériaux, soit présente sous la forme de niveaux individualisés et séparés par des lits non argileux. Il s'agit alors d'une séquence complexe qui peut varier spatialement de manière importante. Dans ces cas-là, il n'est pas possible à l'échelle départementale de distinguer les zones contenant de l'argile de celles où l'argile est totalement absente. L'ensemble de ces formations, par nature hétérogène, a donc été considéré comme argileux ;

• les formations à la base peu ou pas argileuses, telles que les formations de socle (schistes, grès, calcaires, etc.), mais qui présentent de nombreux faciès argileux du fait de leur altération, notamment dans les premiers mètres du sol. Lorsque la formation présentait des zones d'altération argileuse et que la cartographie des altérites est apparue manifestement incomplète au vu des données ponctuelles disponibles, il a été décidé de considérer l'ensemble de ces formations comme argileuses.



Illustration 8 - Carte des formations argileuses de la Mayenne
L'hétérogénéité des formations est bien sûr prise en considération lors de la caractérisation de leur susceptibilité vis-à-vis du retrait-gonflement, notamment dans la note lithologique.

La carte des formations argileuses de la Mayenne présentée en Illustration 8 constitue finalement une représentation interprétée des zones susceptibles au phénomène de retrait-gonflement, en fonction des données actuellement disponibles, notamment au travers de la représentation cartographique des formations superficielles du département et de l'analyse de l'altération des roches de socle.

4.3. LITHOSTRATIGRAPHIE DES FORMATIONS A COMPOSANTE ARGILEUSE

Ce chapitre dresse l'inventaire des formations géologiques argileuses du département de la Mayenne retenues dans le cadre de cette étude et dont l'extension géographique est représentée sur la carte départementale synthétique des formations argilomarneuses (Illustration 8), également présentée en planche hors-texte à l'échelle 1/125 000.

Une brève description de ces formations est présentée ci-après, 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 et sur les thèses d'Estéoules-Choux (1967) et de Brault (2002) en ce qui concerne les altérations des formations de socle.

4.3.1. Formations superficielles du Quaternaire

1 - Alluvions fluviatiles récentes et Weichséliennes : Fy-z

Cette formation regroupe les alluvions fluviatiles récentes, datées de l'Holocène, et les alluvions Weichséliennes et couvre environ 448,6 km² de la surface départementale.

Les alluvions les plus récentes occupent les vallées et les vallons des cours d'eaux principaux et des ruisseaux (Mayenne, Jouanne, etc.). Ils correspondent généralement aux lits majeurs et aux zones inondables des rivières (feuille de Meslay-du-Maine). Ils sont donc présents sur l'ensemble du département de la Mayenne. Les alluvions weichséliennes, quant à elles, constituent les basses terrasses alluviales, principalement situées le long de la rivière de la Mayenne et sont visibles dans le fond, sous les alluvions récentes.

Leur extension ne dépasse pas les 300 m de large (sauf localement où elles peuvent atteindre 800 m) (feuille de



Domfront). Leur épaisseur varie de quelques centimètres à 3 m suivant la dynamique du cours d'eau (Vernhet, 2010).

Leur lithologie varie sur le département en fonction de la nature des altérites de la formation qui les a alimentées. Généralement il s'agit de matériaux limono-sableux ou limono-argileux pouvant contenir des passées de graviers et petits galets de natures diverses (quartz, grès, silex, quartzite...) (feuilles de La Guerche-de-Bretagne et Meslay-du-Maine). La fraction fine est principalement constituée de micas, de vermiculites, d'illites, de pyrophyllites et de kaolinites. Localement on peut observer le développement de tourbes (feuille de La Guerche-de-Bretagne ; Vernhet, 2010) ou la présence de lentille d'argiles.

2 - Alluvions fluviatiles anciennes : Fv-w-x

Cette formation regroupe les alluvions constituant les différentes terrasses mises en place par diverses rivières (principalement la Mayenne) du Pléistocène inférieur au Pléistocène moyen, couvrant ainsi plus de 56 km² de surface.

Les épaisseurs de chacune des terrasses varient de 1 à 3 m, formant un étagement pouvant aller jusqu'à 15 m. L'extension maximale de cette formation est de l'ordre du kilomètre dans le sud du département (près de Château-Gontier).

D'un point de vue lithologique, ces alluvions sont essentiellement sablo-argileuses voire sableuses et renferment des intercalations de graviers et de galets de natures variées (quartz, dolérite, granodiorite, schiste, grès, siltite, grauwacke, cornéennes, quartzite, calcaire,...). Ces passées à galets peuvent constituer

une proportion importante de la formation : jusqu'à 80 % (observations terrain). La fraction grossière sableuse, 20 à 40 % du matériau (feuille de Meslay-du-Maine), est essentiellement quartzitique (90 % de quartz (feuille de Château-Gontier)) de couleur ocre à rousse. La fraction fine, moins abondante, est constituée d'argile sableuse micacée. Les terrasses les plus hautes peuvent avoir été altérées.

3 - Colluvions et dépôts de pente : C

Cet ensemble regroupe les formations de dépôts issues du remaniement d'anciennes formations et de leurs altérites, par solifluxion, ruissellement ou gélifluxion. Ils sont présents sur la moitié ouest du département ainsi qu'au nord-est. Cette formation affleure sous forme de lentilles, les dimensions maximales étant de 9 km de long pour 1,5 km de large, et les épaisseurs variant de 1 à 3 m.

Les colluvions sont des limons argilo-sableux ou sabloargileux, contenant un mélange d'éléments grossiers (fragments lithiques, cailloux, blocs et galets) et fins





(sables, limons et argiles). Ces différents éléments proviennent du remaniement d'arènes granitiques, d'altérites des formations briovériennes ou paléozoïques, ou encore des lœss et sables du Tertiaire, et sont généralement altérés.

La composition des colluvions dérive de la nature lithologique des formations dont elles sont issues, ce qui les rend très hétérogènes à l'échelle départementale. Celles provenant d'arènes granitiques seront plus sablonneuses et celles provenant de l'altération des siltites plus limoneuses (feuille de Landivy). La proportion éléments fins/éléments grossiers peut être aussi très variable.

En ce qui concerne les dépôts de pente, ils sont constitués de blocs hétérométriques de grès et de quartzites enrobés dans une matrice argilo-sableuse de teinte ocre à brunâtre et plus ou moins remaniés avec les altérites et limons proches (Vernhet, 2010). Cette formation provient de la gélifraction d'altérites et de l'apport lœssique remanié. Les sondages et forages ont révélé la présence récurrente d'argile.

Cette formation du quaternaire, couvre environ 224 km² du département de la Mayenne. Elle comprend aussi les alluvions issues de la solifluxion des terrasses fluviatiles.

4 - Lœss et limons des plateaux : LP-OEy

Cette formation couvre au total plus de 283 km² de surface, la plupart étant répartis sur la moitié ouest du département. Ces limons lœssiques se présentent sous forme de placages qui peuvent s'étendre sur plusieurs km² d'extension et avoir une puissance maximale de 4 m. Ce sont des dépôts homogènes correspondants à une accumulation de fines particules minérales transportées par des vents d'ouest au cours du Weichsélien. Ils sont formés majoritairement de quartz accompagnés de quelques débris de feldspath, de quelques paillettes de muscovite, de biotite et de chlorite.

La fraction silteuse est généralement prédominante (70 %) (feuille de Domfront). La teneur en argile varie entre 10 et 20 % (peut atteindre 50 % localement) et est constituée de kaolinite (généralement dominante), d'illite, de vermiculite, d'interstratifiés, de montmorillonite ou de



chlorite. La fraction sableuse quant à elle est essentiellement constituée de sables fins et reste inférieure à 15 % (elle peut atteindre 45 % localement).

Ces lœss sont plus ou moins altérés (altération pédologique) et deviennent alors argileux.

5 - Sables, graviers et argiles du Cénomanien au Pliocène : c-p SGA

Cette formation, s'étend sur plus de 288 km² avec une épaisseur variant de quelques mètres à plusieurs dizaines. Elle regroupe plusieurs types de sables datés du Cénomanien au Pliocène qui sont plus ou moins distinguables suivant leurs lithologies.

Dans l'ensemble, il s'agit d'un sable constitué de quartz avec une fraction fine argileuse et une présence de graviers et de galets dont les proportions sont variables.

Les sables et argiles du Pliocène supérieur ne sont présents qu'à l'extrême sud-ouest du département. Ils remplissent des petits grabens sur une épaisseur variable pouvant atteindre les 70 m (feuille de La Guerche-de-Bretagne).

Ces sables sont plus ou moins argileux et contiennent des passées de graviers, de grès et de schistes quartzofeldspathiques, ainsi que des minces lits argileux. La fraction grossière est essentiellement quartzeuse. L'ensemble peut être recouvert par un horizon argileux et comporter une faune et flore fossilifère assez abondante et variée (feuille de La Guerche-de-Bretagne).



En ce qui concerne les sable datés du Cénomanien au Pliocène, ceux-ci remplissent des fossés tectoniques ou des karsts formés dans des calcaires.

Leur extension varie de quelques mètres à une vingtaine de kilomètres sur des épaisseurs pouvant atteindre 15 m.

Ces sables sont généralement accompagnés de galets et sont essentiellement constitués de quartz. Néanmoins leur lithologie peut présenter des variations : la taille des grains varie de fins à grossiers, plus ou moins bien triés ; des passées graveleuses ou des intercalations silto-argileuses peuvent être présentes ainsi que des lentilles d'argiles, et la fraction sableuse peut être plus ou moins argileuse. Une coloration rouge de ces sables et graviers est très fréquente. La fraction fine de ces différents sables est composée de kaolinite et d'une argile micacée avec des traces de pyrophyllite et vermiculite.

Les sables du Maine, datés du Cénomanien inférieur et moyen, sont répartis sur la bordure est du département. Leur épaisseur, très variable, peut atteindre une vingtaine de mètres, et leur extension ne dépasse pas les 4 km². Ces sables sont des dépôts détritiques deltaïques, provenant de l'érosion du manteau d'altération du socle armoricain et présentent donc une stratification entrecroisée.

Ils sont composés successivement d'un éventuel horizon conglomératique (graviers de quartz), puis de sables grossiers, d'un faciès argileux et de sables fins à moyen, et enfin d'une unité supérieure uniquement sableuse et grossière renfermant des dalles de grès à ciment ferrugineux (*Roussard*) (feuille de Vilaines-la-Juhel).

6 - Calcaires, schistes et grès altérés du Carbonifère : h CSG

Cet ensemble regroupe différentes formations datées du Carbonifère. Il est localisé au centre-sud du département et se répartit sur une bande orientée WNW-ESE qui forme le bassin de Laval, sur une surface de 418,14 km². On y retrouve :

- Les schistes de Laval, composés d'une base conglomératique et d'une alternance wackessiltites-grès argileux très irrégulière sur des épaisseurs pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres.
- Différents calcaires du Carbonifère (calcaire de Bouère, calcaire de Laval et calcaire de Sablé). Le premier est un calcaire massif, micritique, comportant une intercalation de schistes et épais de plusieurs dizaines de mètres. Le second est un calcaire gris à noir, en bancs silteux, présentant quelques passées de pélites. Il a une puissance de plusieurs dizaines de mètres. Le dernier est un calcaire noir puissant de 250 m et fossilifère avec une partie inférieure constituée de calcaire argileux et d'interlits schisteux.



 Les formations silto-gréseuses de Changé et de l'Huisserie. Celle de Changé est composée de couches gréso-silteuses souvent fossilifères renfermant quelques passées faiblement carbonatées. Le faciès de grès est interstratifié de siltites, prédominantes, fréquemment micacées, et constituées principalement de séricite et de chlorite. La formation sédimentaire de l'Huisserie est une succession de siltite et d'argilite alternées avec des niveaux gréseux ou des conglomérats.

Suivant si le drainage a été favorisé ou non lors de l'altération des roches du Carbonifère, il s'est formé de la kaolinite ou de la montmorillonite. Ce drainage dépend du pendage des couches de la formation. Les roches datées du Viséen présentent une stratification très redressée et sont donc généralement altérées.

Les zones d'altération poussée dont la fraction fine est constituée soit par la kaolinite pure, soit par l'association kaolinite-mica blanc, se retrouvent constamment dans les grès, les quartzites et les phtanites.

En ce qui concerne les zones d'altération où apparaissent la chlorite gonflante, la montmorillonite et la vermiculite, elles se retrouvent préférentiellement dans les schistes. Néanmoins ces derniers peuvent aussi présenter une altération kaolinitique comme dans les grès etc. (Esteoule-Choux, 1967).

Les passées pélitiques sont altérées en des argiles blanches ou vertes composées respectivement de kaolinite et de montmorillonite.

L'altération des calcaires peut former des karsts qui peuvent se remplir d'argile.

L'épaisseur de la couche d'altération sur ces formations carbonifères varie entre 1,5 et 10 m. Elle est généralement composée d'argile qui peut être parfois sableuse.

7 - Ampélites, grès et siltites ordo-siluriens et dévoniens altérés : os-d AGS

Cet ensemble regroupe des formations datées entre l'Ordovicien et le Dévonien. Il est localisé au centre du département et se répartit sur une bande orientée WNW-ESE qui forme le bassin de Laval, ainsi qu'à l'extrême sud-ouest et nord-est du département, sur une surface totale de 409,36 km².

De façon générale, ces formations ont une lithologie semblable : elles sont toutes constituées d'une alternance de grès, de siltite, d'argilite, d'ampélite et parfois de calcaire, mais dont la dominante varie. Elles sont toutes plus ou moins schistosées :

Dans les formations à dominante gréseuse, on retrouve :

 les grès de Gahard, atteignant une puissance de 200 m, admettant des passées d'argilites ou de siltites poires et généralement assez micacées et gua



- siltites, noires et généralement assez micacées et quartzeuses ;
- la formation de la Lande-Murée ("Grès culminant") constituée de grès sombres stratifiés, quartzeux et riches en pyrite avec des intercalations de schistes ou d'ampélites.

Dans les formations d'ampélite, on retrouve surtout :

 la formation des Tuileries composée d'ampélites riches en matière organique et en pyrites comportant des schistes fins et quelques minces niveaux de quartzites noirs, le tout sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur.

Dans les formations à dominante silteuse, on retrouve :

- la formation de St Cénéré constituée d'un membre inférieur alternant des schistes et des calcaires argileux et d'un membre supérieur à calcaire bioclastique et argilite. Cette formation comporte plusieurs lentilles carbonatées emballées dans une matrice d'argilites et de siltites micacées, sur une puissance variant de 10 à 400 m;
- la formation du Val composée de siltites et d'argilites riches en micas intercalées de bancs gréseux parfois argileux et ayant une épaisseur pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres;
- la formation de la Chesnaie comportant des argilites tendres intercalées d'un membre gréseux, le tout sur 100 m d'épaisseur.

A l'altération, les schistes du Silurien se présentent sous la forme d'argile constituée essentiellement d'illite et de kaolinite (Esteoule-Choux, 1967).

Les ampélites sont généralement profondément altérées et forment des argiles bariolées à la superficie qui ont été exploitées pour la fabrication de tuiles et poteries (en Sarthe).

L'altération des grès de Gahard, datés du Dévonien, donne une argile grise riche en grain de quartz dont la fraction fine est essentiellement constituée de kaolinite

(Esteoule-Choux, 1967), mais aussi des produits plutôt sableux (feuilles d'Evron et de Sillé-le-Guillaume).

La formation du Val, généralement très altérée, donne une argile bariolée (feuille de Loué).

Les épaisseurs du manteau d'altération sont très variables mais sont généralement autour de 5 et 9 m.

8 - Grès et argilites ordoviciens altérés : o GA

Cet ensemble regroupe des formations datées de l'Ordovicien. Il est localisé sur deux bandes orientées WNW-ESE qui forment les bordures externes du bassin de Laval, ainsi qu'à l'extrême sud-ouest et nord-est du département. Il est ainsi réparti sur une surface de 296,8 km².

Toutes ces formations ont pour lithologie une succession de bancs de grès, de siltites et d'argilites.

Dans les formations à dominante gréseuse, on retrouve :

 le grès armoricain qui se compose d'une base conglomératique à galets de quartz, d'un membre inférieur de quartzites massifs blancs, d'un membre moyen de siltites argilo-micacées puis d'un membre supérieur de quartzite. Les quartzites du grès armoricain peuvent présenter des interpolations de siltites. Sen épsiageur varia



- des intercalations de siltites. Son épaisseur varie entre 40 et 400 m.
- la formation de St-Germain-sur-Ille composée de grès (parfois psammitique) comportant des interlits de siltites (parfois ampéliteuses) devenant de plus en plus développés vers le haut de la série, le tout étant micacé. Sa puissance peut atteindre 200 m.
- la formation du Châtelier et la formation des grès de May-sur-Orne sont essentiellement gréseuses (grès quartzeux micacé) avec respectivement quelques interlits de shales noirs ou de d'argilites sombres micacées. Leur épaisseur peut aller jusqu'à 160 m.

Dans les formations à dominante argiliteuse, on retrouve :

- la formation d'Angers-Traveusot, composée de siltites ou de pélites comprenant quelques rares lits gréseux, avec une épaisseur de 300 à 400 m ;
- la formation d'Andouillé, constituée de siltites et d'argilites noires plus ou moins ardoisières avec des horizons gréso-micacés et une épaisseur entre 100 et 120 m;
- la formation de Riadan-Renazé, composée d'argilites noires finement micacées et de siltites dans lesquelles s'intercalent des bancs gréseux. Son épaisseur varie entre 100 et 350 m.

Les formations à dominante gréseuse, telles que les grès armoricains, rarement intactes, s'altèrent en une argile blanche constituée de kaolinite et éventuellement de

micas, mais aussi en produit pulvérulent ou sableux riche en quartz (Estéoule-Choux, 1967). La carte géologique de Meslay-du-Maine indique que le grès armoricain est altéré en un produit sableux jaune beige, un peu limoneux et argileux.

L'altération des ampélites de la formation de St Germain-sur-Ille donne des passées d'argile bleue de 20 à 50 m ; les grès eux donnent un sable fin et argileux (feuille de Loué).

Les formations à dominante silteuse sont elles aussi altérées en argile, mais leur degré d'altération peut varier en fonction de leur pendage (Estéoule-Choux, 1967).

L'épaisseur des altérites est très variable mais reste non négligeable ; en effet il n'est pas rare qu'elle atteigne 10 m

9 - Altérites des formations paléozoïques indifférenciées : *A iP*

Cette formation d'une superficie de 5,8 km² se localise au sud-ouest du département de la Mayenne. Il s'agit d'altérites indifférenciées des formations paléozoïques gréseuses ou volcaniques. Le degré d'altération est très évolué, les roches sont fortement argilisées et l'épaisseur du manteau d'altération peut être métrique à pluri-métrique. Elle est principalement composée de kaolinite.



10 - Grès et siltites du Briovérien altérés : b GS

Cet ensemble regroupe des formations datées du

Briovérien (Protérozoïque). Il est principalement localisé sur une grande partie de la moitié sud du département et au nord-est de celui-ci et se répartit sur 831,25 km². Ces formations sont constituées de roches sédimentaires non métamorphiques et non conglomératiques. Leur lithologie correspond à des alternances de grès, de siltites et d'argilites à dominante variable.

Les formations à dominante silteuse sont d'une part des alternances de siltites et d'argilites, généralement fines et micacées et admettant des intercalations de bancs de grès quartzeux, et d'autre part des flyschs alternant avec des siltites, des grès et des argilites dont la dominance respective varie suivant leur localisation. Leur épaisseur peut atteindre plusieurs centaines de mètres.

Les formations à dominante gréseuse comprennent principalement des grauwackes fins à grossiers constituant d'épaisses barres métriques à plurimétriques présentant quelques intercalations de siltites sur



plusieurs centaines de mètres (feuilles de Sillé-le-Guillaume et Château-Gontier), mais aussi des quartzites en gros bancs alternant avec des siltites et des grès (feuille de Châteaubriant) avec une épaisseur variant de quelques mètres à quelques dizaines.

Les isaltérites des formations silto-gréseuses briovériennes correspondent à une roche meuble, verdâtre, à structures conservées (stratification et schistosité encore visibles), partiellement transformée en argile blanche à ocre pour les niveaux fins, et en sable et argile plus ou moins consolidés pour les niveaux plus gréseux. Quel que soit le Briovérien considéré, il se présente comme des argiles blanches à ocre, souvent homogènes, où les seuls fragments qui persistent sont représentés par du quartz en proportions et tailles plus ou moins variables. Les épaisseurs d'altérites estimées sont généralement inférieures à 10 m. Les altérites sont particulièrement bien représentées pour les formations à siltites dominantes et ont des épaisseurs le plus souvent plus importantes par rapport aux autres faciès du Briovérien (Brault, 2002).

Selon Estéoule-Choux (1967), les schistes sont très souvent altérés sur de fortes épaisseurs. Les produits d'altération peuvent être des argiles à micas et chlorite pouvant être bariolées ou des argiles à kaolinite prépondérante associée à de l'illite et à des traces de montmorillonites.

11 - Altérites des formations briovériennes indifférenciées : *A-ib*

Cette formation se situe principalement dans le sudouest du département de la Mayenne et recouvre près de 224 km² de surface. Le substrat briovérien est largement et parfois profondément altéré. principalement dans les zones à argilites et wackes chloriteux tendres; à l'inverse, les alternances siltogréso-carbonatées sont généralement très peu altérées et donnent des reliefs plus contrastés. La nature des altérites est directement liée à la lithologie; principalement argilo-sableuse, elle est cependant argileuse en quelques points qui ont autrefois fait l'objet d'une exploitation pour terre à cuire (feuille de La Guerche-de-Bretagne). Les formations silteuses et gréseuses du Briovérien sont très fortement altérées. De couleurs brunes à ocres, elles laissent la place à des argiles d'altération plus ou moins plastiques, plus ou



moins sableuses, avec petits fragments brun-rouille de la roche d'origine. Les épaisseurs d'altération sont métriques à plurimétriques jusqu'à atteindre une quinzaine de mètres (Vernhet, 2010).

12 - Formations volcaniques basiques altérées du Paléozoïque : k-h VqB

Cette unité regroupe les roches volcaniques d'âges variés, du Cambrien au Carbonifère. Elle localise quelques massifs à l'est du département et des filons au

nord-ouest. Au maximum, cette formation peut s'étendre sur 7 km et ses épaisseurs sont très variables, de 1 m à plusieurs kilomètres (cas des filons).

Leur lithologie est variable, mais reste basique ou intermédiaire. On retrouve dans cette formation : les tufs, les spilites et les volcanites de la formation de l'Huisserie (Carbonifère) ; les tufs, les cinérites et les tuffites pyroclastiques du complexe volcanique cambrien ; le massif de diorite mis en place durant le cycle cadomien et les filons de dolérites et de microgabbro mis en place entre le Dévonien et le Carbonifère.

L'altération des roches volcaniques basiques donne généralement des produits argileux.



5. Caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique des formations argileuses et marneuses

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 pas 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 12 formations sélectionnées :

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

Dans le but d'obtenir un moyen pratique de hiérarchisation entre les différentes formations, la règle adoptée a consisté à utiliser des valeurs seuils, couramment

admises dans la littérature, distinguant quatre degrés de susceptibilité (faible, moyenne, forte et très forte). Pour permettre la réalisation de calculs, les grandes classes lithologiques distinguées ont également été affectées d'une note. Pour les trois caractéristiques naturelles des terrains, cela permet d'attribuer une note de 1 à 4 à chacune des formations identifiées.

Les caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique des 12 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 9) :

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 9 – Hiérarchisation de la susceptibilité en fonction de la nature argileuse de la formation

5.2.2. Caractérisation lithologique

Sur la base de ces critères, le tableau de l'Illustration 10 permet de synthétiser les différentes notes lithologiques attribuées aux 12 formations potentiellement sujettes au

retrait-gonflement, à partir notamment des descriptions issues des notices des cartes géologiques à 1/50 000.

ID	NOTATION	I DESCRIPTION		Surface (% du département)	NOTE Litho
1	Fy-z	Alluvions fluviatiles récentes et Weichséliennes	448,56	8,63	2
2	Fv-w-x	Alluvions fluviatiles anciennes	56,36	1,08	1
3	С	Colluvions et dépôts de pente	224,10	4,31	2
4	LP-OEy	Loess et limons des plateaux	283,60	5,46	2
5	c-p SGA	Sables, graviers et argiles du Cénomanien au Pliocène	288,68	5,55	2
6	h CSG	Calcaires, schistes et grès altérés du Carbonifère	418,14	9,95	3
7	os-d AGS	Ampélites, grès et siltites ordo-siluriens et dévoniens altérés	409,36	7,88	3
8	o GA	Grès et argilites ordoviciens altérés	296,79	5,71	3
9	<i>ж</i> iР	Altérites des formations paléozoïques indifférenciées	5,80	0,11	4
10	b GS	Grès et siltites du Briovérien altérés	831,25	15,99	3
11	ℋ ib	Altérites des formations briovériennes indifférenciées	223,98	4,31	4
12	k-h VqB	Formations volcaniques basiques altérées du Paléozoïque	50,10	0,96	3

Illustration 10 - Notes lithologiques des formations argileuses retenues

5.3. CRITERE MINERALOGIQUE

5.3.1. Définition du critère minéralogique et barème

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

Les bornes retenues pour la classification minéralogique, basée sur le pourcentage de minéraux gonflants (smectites, vermiculites et interstratifiés) contenus dans la phase argileuse du matériau, sont respectivement 25 %, 50 % et 80 %. Une note minéralogique a été attribuée à chacune de ces formations en utilisant le barème suivant (Illustration 11).

% 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 11 – 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, peuvent parfois indiquer la nature minéralogique des argiles sans la quantifier.

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.

En Mayenne, les données minéralogiques sont en nombre très variable selon les formations géologiques. Les dossiers de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ne présentent aucune caractérisation des minéraux argileux, de même que les rapports issus des bureaux d'études. Les données disponibles proviennent de diverses sources :

• les notices de cartes géologiques au 1/50 000 ;

• les rapports du BRGM présentant les recherches menées sur les différentes argiles présentes dans le Massif Armoricain ;

• les données du programme d'aléa retrait-gonflement des argiles disponibles pour les départements voisins, en particulier l'Ille-et-Villaine (Schroetter *et al.*, 2010), l'Orne (Lereculey *et al.*, 2008), le Maine-et-Loire (Le Guern *et al.*, 2005) et la Sarthe (Le Guern *et al.*, 2007) ;

• l'exploitation des données de sols de Mayenne mises à disposition par l'Institut National d'Horticulture et de Paysage (AgroCampus Ouest) basé à Angers (lithologie, granulométrie, CEC, ...). Des données similaires avaient été exploitées pour la Loire-Atlantique et la Vendée ; elles proviennent de prélèvements effectués pour l'élaboration des cartes pédologiques au 1/100 000 (Programme IGCS) et sont fournies au format numérique et géoréférencées. L'annexe 2 précise les modalités d'interprétation de ces données ;

• les analyses de 30 échantillons prélevés lors d'une campagne de terrain menée en juin 2010. L'annexe 3 résume les résultats de l'analyse RX effectuée sur le prélèvement.

L'Illustration 12 résume les données exploitées sur les différentes formations argileuses de la Mayenne.

l												
₽	NOTATION	DESCRIPTION	Nb_RX	smectites (%)	vermiculite (%)	illite et/ou micas (%)	pyrophyllite (%)	kaolinite (%)	chlorite (%)	interstratifiés smectites/illite (%)	Source*	NOTE Min
-	Fy-z	Alluvions fluviatiles récentes et Weichséliennes	-		9	17	61	16			ARG53	÷
2	Fv-w-x	Alluvions fluviatiles anciennes	4	-/ 50 /26 /-	10/-/-/35	49 / trace / 31 / 38	-/-/-/-	41/40/43/12	- / - / trace / 5	-/-/10	ARG53 / 426 / 394 / ARG 35	2
с	C	Colluvions et dépôts de pente	0								-	
4	LP-OEy	Loess et limons des plateaux	∞	-/-/70/50/-/ /16/54	29/-/-/-/-/-/- /-/-	24/5/30/10/5/ 57/7/12	-/- /-/-/-/-/-	45 / 70 / - / 40 / 70 / 33 / 77 / 34	2/-/-/-/-/-/- /-/-	1 / 25 / - / - / 25 / - / - / -	354 / BRGM / 393 / Clément / ARG72(x3)	2
5	c-p SGA	Sables, graviers et argiles du Cénomanien au Pliocène	6	-/-/-/-/-/-/-/-/-/-/-/-/-/-/-/-/-/-/-/	1/9/-/4/-/- /-/-/-	12 / 17 / 27 / 10 / 5 / 8 / 10 / 35 / 4	2/-/-/-/-/-/- /-/-/-	85 / 66 / 92 / 86 / 19 / 28 / 66 / 3 / 5	-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1	-/8/2/-/76/64/ 24/-/-	ARG53(x3) / ARG49(x4) / 456 / 394	2
9	h CSG	Calcaires, schistes et grès altérés du Carbonifère	5	-/-/-/-	18/3/6/2/7	23 / 28 / 27 / 91 / 54	9 / 55 / 26 / - / -	48 / 14 / 41 / 7 / 39	-1-1-1-1-	-/-/-/-/-	ARG53(x5)	-
2	os-d AGS	Ampélites, grès et siltites ordo-siluriens et dévoniens altérés	5	-1-1-1-1-	8/1/2/-/-	21 / 31 / 14 / 20 / 23	49 / 60 / 7 / 42 / 51	22 / 8 / 74 / 21 / 17	-/-/-/-/-	6/2/-/-/-	ARG(x3) / 249 (x2)	-
8	o GA	Grès et argilites ordoviciens altérés	1		11	37		52			ARG53	1
9	≪ iP	Altérites des formations paléozoïques indifférenciées	0							-	-	
10	b GS	Grès et silities du Briovérien altérés	4	-/-/-/-	26 / 14 / 12 / 20	41 / 65 / 61 / 47	-/-/-/-	32 / 21 / 27 / 33	- / - / - / -	-/-/-/-	ARG53(x4)	-
7	ďi ≫	Altérites des formations briovériennes indifférenciées	-		9	17	61	12			ARG53	-
12	k-h VqB	Formations volcaniques basiques altérées du Paléozoïque	+		12	22	4	51		-	ARG53	1
						* Sourc	es des analy	ses RX				
						ARG53	cett	e étude				
						trois sch	niffres n° a	le carte géologic o átudo "aláo ro	que troit conflorr	ont lo numéro c	orrochant all dénarta	mont
						BRGM	étuc	le BRGM antéri	au au guinen eure		טוופאטטוטמווו מע עבאמונפ	וופוו

Illustration 12 - Synthèse des données minéralogiques et notes minéralogiques

Nous avons par ailleurs consulté des données pédologique mises à disposition par l'Institut National d'Horticulture et de Paysage (AgroCampus Ouest) dont la Capacité d'Echange Cationique (CEC) et le pourcentage d'argile ont servi à l'interprétation minéralogique suivant une méthode décrite en annexe 2. Les résultats ne sont pas détaillés ici car ils sont en général semblables d'une formation argileuse à une autre, à savoir environ 74 % d'un mélange illite/kaolinite, environ 22 % d'un mélange kaolinite/illite/smectite/vermiculite et environ 4 % de smectite/vermiculite.

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 teneur 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 retraitgonflement.

Les études géotechniques post-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, le retrait linéaire, et l'indice de plasticité. Ces essais sont présentés dans les paragraphes suivants, sachant que les deux essais les plus représentatifs de l'aptitude d'un sol au retrait-gonflement sont la valeur de bleu et le retrait linéaire. Pour le département de la Mayenne, ce sont essentiellement les indices de plasticité Ip, les valeurs au bleu Vb ou VBS qui ont été utilisées.

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 (lp)

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 (WI) 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 lp de la manière suivante (Illustration 13) :

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

Illustration 13 – Barême d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de l'indice de plasticité de la formation

L'expérience acquise au travers des études déjà réalisées montre cependant que ces coupures sont mal corrélées avec les valeurs de bleu (paragraphe suivant) et que des adaptations sont nécessaires. En particulier, les seuils à 12 et 25 semblent plutôt devoir être décalés vers 15 et 30, voire 20 et 30.

5.4.4. Essais au bleu de méthylène (Vb)

Ils permettent d'évaluer la surface spécifique d'échange d'un matériau argileux, ce qui constitue un bon indicateur de sa susceptibilité au phénomène de retrait-gonflement. Cet essai a été développé par Tran Ngoc Lan (1977) et adopté comme procédure d'essai officielle des Laboratoires des Ponts et Chaussées, puis normalisé (norme AFNOR NF P 18-592). Il consiste à mesurer la capacité d'adsorption en bleu de méthylène, c'est-à-dire la quantité de ce colorant nécessaire pour recouvrir d'une couche mono-élémentaire les surfaces externes et internes de toutes les particules argileuses présentes dans 100 g de sol. On appelle cette quantité, la valeur de bleu, notée Vb et exprimée en grammes de bleu par 100 g de matériau. On considère généralement (Chassagneux *et al.*, 1998) que la sensibilité d'un matériau argileux varie de la manière suivante en fonction de la valeur de bleu notée Vb (Illustration 14) :

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

5.4.5. Retrait linéaire (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 15) :

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

Illustration 15 – Barême d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du retrait linéaire de la formation

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

5.4.6. Coefficient de gonflement (Cg)

L'essai de gonflement à l'œdomètre (ASTM 90) consiste à mesurer une amplitude de gonflement à la suite d'un apport d'eau. Il est par conséquent fortement conditionné par l'état initial de saturation en eau du sol considéré. En effet, pour un même sol, le gonflement relatif sera d'autant plus grand que le sol était initialement plus sec. Cette observation souligne l'intérêt d'associer ces essais avec la réalisation d'un profil hydrique. Ainsi la pression de gonflement ne constitue pas une caractéristique intrinsèque du sol, les valeurs dépendant fortement de l'état de saturation initial du sol considéré. Le potentiel de gonflement peut cependant être caractérisé par le coefficient de gonflement Cg (pente de la droite de déchargement observée dans un essai cedométrique) qui permet d'évaluer le potentiel de gonflement des formations argileuses identifiées (Illustration 16):

Coefficient de gonflement	nflement Susceptibilité	
Cg < 0,025	faible	1
$0,025 \le Cg < 0,035$	moyenne	2
$0,035 \le Cg < 0,055$	forte	3
Cg ≥ 0,055	très forte	4

Illustration 16 – Barême d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du coefficient de gonflement de la formation

Seules 80 valeurs de ce paramètre ont pu être obtenues en Mayenne.

5.4.7. Caractérisation géotechnique

Les données géotechniques recueillies afin de caractériser les formations argileuses du département proviennent de différentes sources :

• la première partie des données provient de l'exploitation des archives du Conseil Général et de la DDT de Mayenne. Le CETE d'Angers (Centre Technique de l'Equipement), RFF (Réseau Ferré de France), Coulais Consultant et Fondasol ont aussi mis à disposition des études de sols réalisées principalement dans le cadre de la construction de routes ou autoroutes ;

• une seconde partie concerne les données recueillies dans le cas de sinistres déclarés telles que les rapports de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle et les études géotechniques effectuées lors des expertises post-sinistres. Ces dossiers ont été collectés auprès de la préfecture et des mairies, de la CCR (Caisse Centrale de Réassurance), des bureaux d'étude et des compagnies d'assurance ;

• les mairies ont également fourni des données dans le cadre d'études géotechniques effectuées sur leur commune, notamment pour la construction ou la rénovation de bâtiments publics ou des réseaux d'assainissement.

Nous remercions les organismes qui ont transmis des données (annexe 5) pour leur précieuse collaboration.

La BSS du BRGM a par ailleurs été consultée, de même que les données issues du programme d'aléa retrait-gonflement des argiles disponibles pour les départements voisins, en particulier l'Ille et Vilaine (Schroetter *et al.*, 2010), l'Orne (Lereculey *et al.*, 2008), le Maine-et-Loire (Le Guern *et al.*, 2005) et la Sarthe (Le Guern *et al.*, 2007).

Enfin, les analyses d'échantillons prélevés lors de la campagne de terrain en juin 2010, permettent de préciser les caractéristiques des formations dont les données disponibles restent insuffisantes (18 échantillons analysés).

1 393 données de dossiers géotechniques (dont chacune a été localisée) et 14 données de dossiers de sinistres (dont chacune a été localisée) ont été exploitées. 885 données concernent effectivement des formations retenues comme argileuses, et permettent de donner une note géotechnique (Illustration 17) :

• pour l'indice de plasticité, 675 données ont permis la caractérisation des formations argileuses ;

• pour la valeur au bleu, 210 données ont été utilisées ;

• aucune donnée de retrait linéaire et seules 35 données de coefficient de gonflement ont été recueillies sur les formations argileuses de la Mayenne. Ces critères n'ont par conséquent pas été pris en compte.

Toutes les valeurs géotechniques recueillies pour les formations argileuses retenues ont été synthétisées dans le tableau de l'Illustration 17.

En définitive, les données dont nous avons pu disposer permettent de caractériser la quasi-totalité des formations.

N°	NOTATION	DESCRIPTION	Nb analyses	Nb lp	lp min	lp max	lp moy	Nb Vb	Vb min	Vb max	Vb moy	NOTE_Geo
1	Fy-z	Alluvions fluviatiles récentes et Weichséliennes	146	128	8	34	15,40	18	0,12	1,16	0,43	1
2	Fv-w-x	Alluvions fluviatiles anciennes	4	3	12	15	13,00	1	0,67	0,67	0,07	1
3	С	Colluvions et dépôts de pente	14	12	9	23	14,83	2	0,31	0,31	0,31	1
4	LP-OEy	Loess et limons des plateaux	21	14	10	46	17,21	7	0,24	1,68	0,70	1
5	c-p SGA	Sables, graviers et argiles du Cénomanien au Pliocène	82	75	10	43	18,05	7	0,31	1,15	0,57	1
6	h CSG	Calcaires, schistes et grès altérés du Carbonifère	151	92	10	28	16,27	59	0,07	1,8	0,36	1
7	os-d AGS	Ampélites, grès et siltites ordo-siluriens et dévoniens altérés	56	35	10	33	17,02	21	0,13	1,5	0,49	1
8	o GA	Grès et argilites ordoviciens altérés	166	129	6	48	18,34	37	0,17	2,8	0,67	1
9	<i>ж</i> iР	Altérites des formations paléozoïques indifférenciées	200	156	10	48	20,12	44	0,2	4,93	0,81	1
10	b GS	Grès et siltites du Briovérien altérés	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	A ib	Altérites des formations briovériennes indifférenciées	33	29	12	21	15,66	4	0,2	0,52	0,39	1
12	k-h VqB	Formations volcaniques basiques altérées du Paléozoïque	12	2	29	34	31,50	10	0,07	0,96	0,42	1

Illustration 17 – Synthèse des données géotechniques recueillies

6. Élaboration de la carte de susceptibilité

6.1. DETERMINATION DU DEGRE DE SUSCEPTIBILITE

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.

Pour les formations dont l'une des caractéristiques n'a pu être évaluée, la moyenne est effectuée à partir des deux autres notes. La moyenne ainsi obtenue est potentiellement comprise entre 1 et 4. Les classes de susceptibilité déterminées à partir de la valeur moyenne ainsi calculée sont les suivantes (Illustration 18) :

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

Illustration 18 - Barême d'attribution d'un niveau de susceptibilité d'une formation argileuse

Moyennant ce traitement, les notes de susceptibilité attribuées aux 12 formations retenues comme argileuses sont les suivantes (Illustration 19) :

ID	NOTATION	DESCRIPTION	NOTE Litho	NOTE Min	NOTE Geo	Indice de Susceptibilité	Classe de susceptibilité	Niveau de susceptibilité
1	Fy-z	Alluvions fluviatiles récentes et Weichséliennes	2	1	1	1,33	1	Faible
2	Fv-w-x	Alluvions fluviatiles anciennes	1	2	1	1,33	1	Faible
3	С	Colluvions et dépôts de pente	2	-	1	1,50	1	Faible
4	LP-OEy	Loess et limons des plateaux	2	2	1	1,67	1	Faible
5	c-p SGA	Sables, graviers et argiles du Cénomanien au Pliocène	2	2	1	1,67	1	Faible
6	h CSG	Calcaires, schistes et grès altérés du Carbonifère	3	1	1	1,67	1	Faible
7	os-d AGS	Ampélites, grès et siltites ordo-siluriens et dévoniens altérés	3	1	1	1,67	1	Faible
8	o GA	Grès et argilites ordoviciens altérés	3	1	1	1,67	1	Faible
9	<i>ж</i> iР	Altérites des formations paléozoïques indifférenciées	4	-	1	2,50	2	Moyen
10	b GS	Grès et siltites du Briovérien altérés	3	1	-	2,00	1	Faible
11	<i>ж</i> ib	Altérites des formations briovériennes indifférenciées	4	1	1	2,00	1	Faible
12	k-h VqB	Formations volcaniques basiques altérées du Paléozoïque	3	1	1	1,67	1	Faible

Illustration 19 - Susceptibilité des formations argileuses retenues

6.2. SYNTHESE

Aucune formation argileuse n'apparaît comme fortement susceptible dans le département de la Mayenne, alors qu'une seule formation est jugée moyennement susceptible, et 11 faiblement susceptibles. Au final, 0,11 % du département est classé en susceptibilité moyenne au phénomène de retrait gonflement, et 67,7 % en susceptibilité faible. 32,2 % de la surface départementale sont donc considérés comme a priori non argileux, et donc non susceptible (Illustration 20).

ID	NOTATION	DESCRIPTION		Surface (% département)	Niveau de susceptibilité
	-				
1	Fy-z	Alluvions fluviatiles récentes et Weichséliennes	448,56	8,60	Faible
2	Fv-w-x	Alluvions fluviatiles anciennes	56,36	1,08	Faible
3	С	Colluvions et dépôts de pente		4,30	Faible
4	LP-OEy	Ey Loess et limons des plateaux		5,44	Faible
5	5 c-p SGA Sables, graviers et argiles du Cénomanien au Pliocène		288,68	5,54	Faible
6	h CSG	Calcaires, schistes et grès altérés du Carbonifère	418,14	8,02	Faible
7	os-d AGS	Ampélites, grès et siltites ordo-siluriens et dévoniens altérés	409,36	7,85	Faible
8	o GA	Grès et argilites ordoviciens altérés	296,79	5,69	Faible
10	b GS	Grès et siltites du Briovérien altérés	831,25	15,94	Faible
11	ℋ ib	Altérites des formations briovériennes indifférenciées	223,98	4,29	Faible
12	2 k-h VqB Formations volcaniques basiques altérées du Paléozoïque		50,10	0,96	Faible
		Total formation en susceptibilité faible	3 530,92	67,70]
9	<i>ж</i> iР	Altérites des formations paléozoïques indifférenciées	5,80	0,11	Moyen
		Total formation en susceptibilité moyenne	5,80	0,11	
		Total des formations argileuses	3 536,72	67,82]
		Total des formations a priori non argileuses	1 678,52	32,18	

Illustration 20 - Superficie des formations par niveau de susceptibilité

6.3. CARTE DE SUSCEPTIBILITE

L'Illustration 21 représente la carte départementale de susceptibilité des formations géologiques au phénomène de retrait-gonflement, réalisée d'après les résultats présentés dans le tableau de l'Illustration 20

La carte départementale de susceptibilité a été établie à partir de la carte interprétée des formations potentiellement sujettes au 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 couleurs (jaune et orange) selon leur degré de susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement.

Les zones blanches de la carte correspondent aux formations *a priori* non argileuses. Cependant, on ne peut exclure qu'elles soient recouvertes localement de poches ou placages argileux non représentés sur la carte géologique.

D'après la carte ainsi établie, près de 70 % de la surface du département apparaît comme susceptible au retrait-gonflement des argiles.



Illustration 21 - Carte de susceptibilité au retrait-gonflement dans le département de la Mayenne

7. Analyse de la sinistralité

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

Dans le cadre de la loi n°82-600 du 13 juillet 1982 sur les catastrophes naturelles, et à l'initiative des sinistrés, un dossier technique est établi par un bureau d'études afin de demander la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle dans la commune concernée, au titre du mouvement 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" (Rapport interministériel "Boutin", 2007).

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 :

- le caractère exceptionnel du phénomène climatique doit être prouvé,
- les désordres ne doivent pas relever d'une cause autre que la sécheresse ou la réhydratation des sols,
- l'évolution des désordres doit être corrélée dans le temps avec celle du phénomène climatique exceptionnel,
- 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.

Depuis décembre 2000, l'analyse du contexte climatique est confiée à Météo France et effectuée sur la base d'un suivi de l'état hydrique des sols. Celui-ci est calculé dans 92 stations de référence au moyen d'un modèle à double réservoir, sur la base d'une réserve utile de 200 mm, dont on suit le niveau de remplissage au pas de temps 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 <u>www.argiles.fr</u> 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 (Le Guern *et al.*, 2005). L'examen de la carte géologique du BRGM à l'échelle du 1/50 000, complété éventuellement par des observations de terrain ou des sondages, permet de préciser la nature des formations géologiques environnant les sinistres et de déterminer celle qui a été à l'origine des désordres.

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

Dans le cas de la Mayenne, différents bureaux d'études ont réalisé des dossiers techniques pour établir la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ou pour expertiser des sinistres pour le compte des compagnies d'assurance. D'après les dossiers qui ont été recueillis, le bureau d'études de Leotot Christophe (Géologue Conseil) a été le plus sollicité avec 8 expertises effectuées sur le département, soit près de 1/3 des dossiers portés à la connaissance du BRGM. Les bureaux suivants sont également intervenus : ARCADIS, Coulais Consultant et SIC INFRA.

Par ailleurs, d'autres dossiers ont été transmis par les mairies, la Préfecture ou la Caisse Centrale de Réassurance sans indication du bureau d'étude concerné. Ce sont au final 24 dossiers de sinistres qui ont été examinés.

7.2. IDENTIFICATION DES COMMUNES SINISTRÉES

7.2.1. Localisation des communes sinistrées

A la date du 20 juillet 2010, 7 communes de la Mayenne ont été reconnues en état de catastrophe naturelle au titre de mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols, pour les étés 2003 et 2005. A ce jour, aucun arrêté n'a été pris pour des périodes postérieures (Base Gaspar – www.prim.net).

Ces communes représentent 2,67 % des 262 communes que compte le département et couvrent, à elles seules, 3,10 % de la superficie totale de la Mayenne. Ce taux de sinistralité est très faible par rapport à la plupart des départements. Elles ont été toutes les 7 reconnues en état de catastrophe naturelle pour la période du 1^{er} juillet au 30 septembre 2003, une seule de ces communes a fait l'objet d'un second arrêté pour la période du 1^{er} juillet au 30 septembre 2005. Ces dates correspondent aux périodes de sécheresse des étés 2003 et 2005. Au total, 7 arrêtés ministériels successifs reconnaissant l'état de catastrophe naturelle sécheresse ont été pris dans le département de la Mayenne, pour 8 occurrences (en distinguant par périodes et par communes).

D'après les données de la base Gaspar au 20 juillet 2010, la Mayenne se place en 73^e position des 90 départements français touchés en termes de nombre d'occurrences, loin derrière les autres départements de la région Pays-de-la-Loire (Maine-et-Loire (375 occurrences, 16^e), Sarthe (284, 21^e), Vendée (206, 28^e), Loire-Atlantique (48, 53^e)). Les départements français les plus touchés étant la Haute-Garonne (1 427), le Gers (1 259) et la Dordogne (1 072).

La liste des communes concernées est présentée ci-dessous, ainsi que les périodes de reconnaissance, les dates des arrêtés interministériels et les dates de leur parution au Journal Officiel (Illustration 22).

INSEE	Commune	Date début	Date fin	Date arrêté	Date JO
53030	Bignon-du-Maine	01/07/2003	30/09/2003	15/05/2008	22/05/2008
53030	Bignon-du-Maine	01/07/2005	30/09/2005	07/08/2008	13/08/2008
53095	Epineux-le-Seguin	01/07/2003	30/09/2003	27/07/2006	08/08/2006
53103	Genest-Saint-Isle	01/07/2003	30/09/2003	11/06/2008	14/06/2008
53130	Laval	01/07/2003	30/09/2003	30/03/2006	02/04/2006
53228	Saint-Jean-sur-Erve	01/07/2003	30/09/2003	23/03/2007	01/04/2007
53255	Sainte-Suzanne	01/07/2003	30/09/2003	06/02/2006	14/02/2006
53267	Vaiges	01/07/2003	30/09/2003	06/02/2006	14/02/2006

Illustration 22 – Liste des communes et des arrêtés de catastrophe naturelle "mouvement de terrain consécutif à la réhydratation ou la sécheresse" dans la Mayenne

La carte de l'Illustration 23 permet de localiser ces 7 communes ainsi que les autres communes non reconnues catastrophe naturelle mais qui présentent des sinistres. Elle

montre que toutes ces communes, reconnues en état de catastrophe naturelle pour le retrait-gonflement des argiles ou non, sont relativement concentrées au centre du département.



Illustration 23 – Communes concernées par des arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse et nombre de sinistres recensés et localisés.

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

Sur les 7 communes reconnues en état de catastrophe naturelle sécheresse, 6 ont fait l'objet d'un seul arrêté et 1 de 2 arrêtés. Les données fournies par l'Illustration 22 indiquent que la durée de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle reste la même selon les communes et selon les arrêtés, à savoir les 3 mois de l'été 2003 et les 3 mois de l'été 2005. Ces communes se retrouvent dans une bande située vers le centre du département orientée WNW – ESE.

Au regard de la mise en application du système de modulation de franchise mis en place en septembre 2000 et qui prévoit une augmentation de la franchise à chaque nouvel arrêté à compter du 3^{ene} (compté désormais sur les 5 dernières années, suite à l'arrêté du 4 août 2003, et non plus depuis 1995 comme initialement), à défaut d'élaboration de documents de prévention de type Plans de Prévention des Risques naturels (PPR), ces trois paramètres d'observation sont à prendre en compte dans l'analyse des périodes de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle puisque ils lient milieu physique, données météorologiques et récurrence du phénomène. D'ailleurs à ce jour, aucun PPR retrait-gonflement des argiles n'a été prescrit dans le département de la Mayenne.

L'analyse de ces données montre à première vue deux périodes où les communes de Mayenne ont été reconnues en état de catastrophe naturelle au titre de mouvements du sol relatifs au retrait-gonflement des argiles :

• du 1^{er} juillet au 30 septembre 2003, les 7 communes ont été placées en état de catastrophe naturelle à cause de la sécheresse exceptionnelle qui a sévi durant l'été. Les arrêtés relatifs à cette période ont été pris jusqu'en 2008, suite à l'adaptation des critères de classification ;

• du 1^{er} juillet au 31 septembre 2005, une seule commune (Bignon-du-Maine, qui avait déjà été reconnue en 2003) a été reconnue en état de catastrophe naturelle, à nouveau à cause d'une sécheresse estivale.

Nous pouvons noter que la préfecture de la Mayenne a établi en 2006 un Dossier Départemental des Risques Majeurs (DDRM) pour le département. 29 communes sont concernées par un risque de mouvement de terrain, et 4 d'entre elles possèdent un Plan de Prévention des Risques Naturels Mouvement de Terrain (PPRMT) ; il s'agit de Laval, l'Huisserie, Sainte-Suzanne et Mayenne. Cependant, ces plans concernent surtout des risques liés aux cavités souterraines et gisements ardoisiers, ainsi qu'à la présence de falaises instables. Ils ne font pas état d'un risque lié au retrait-gonflement des argiles.

7.3. COLLECTE DES DONNEES DE SINISTRES

7.3.1. Origine des données

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

- la consultation des dossiers de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle disponibles à la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) (8 sinistres)
- une enquête auprès des communes du département (9 sinistres)
- la consultation des dossiers communiqués par les compagnies et experts d'assurance, le CETE et les bureaux d'étude (7 sinistres).

A chaque étape, les doublons (sinistres successifs sur un même site ou données présentes dans plusieurs sources) ont été éliminés.

L'enquête auprès des communes a été menée auprès de l'ensemble des communes du département, qu'elles aient fait l'objet d'une indemnisation ou non. Cette enquête s'est faite par l'intermédiaire d'un courrier adressé à toutes les mairies des communes de Mayenne, dont les 7 qui ont fait l'objet d'au moins une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle. Le courrier a été adressé aux maires par l'intermédiaire de la Préfecture, en date du 5 janvier 2009. Des relances ont été effectuées par courriel directement par le BRGM aux mairies qui n'avaient pas répondu avant le 6 avril 2009 (date limite fixée pour répondre à l'enquête). Au final, 165 communes ont participé à l'étude, soit un taux de 63 % environ, dont 57 % des 7 communes classées en état de catastrophe naturelle.

Ces 165 réponses des communes sont revenues entre le 4 février 2009 et le 29 juin 2009.

Des données ont été également recueillies auprès de différents bureaux d'études géotechniques (ARCADIS, Coulais Consultant et SIC INFRA). Elles représentent 15 dossiers.

Au final, ce sont 24 sinistres qui ont été recensés et localisés (Illustration 24). La localisation des sinistres a été effectuée sur des fonds topographiques de l'IGN au 1/25 000. Ce travail a été réalisé notamment grâce aux cartes renvoyées par les communes, les cartes ou coordonnées spatiales présentes dans les dossiers de bureaux d'études et la recherche d'adresses sur des sites Internet tels que www.mappy.fr, maps.google.fr, www.viamichelin.fr.

Cet échantillon peut donc être considéré comme représentatif de la sinistralité dans le département de la Mayenne de par la diversité des sources d'information. Notons que ce nombre de 24 sinistres recensés reste très inférieur à ceux obtenus dans les autres départements de la région Pays-de-la-Loire (1 101 en Sarthe, 667 en Maine-et-Loire, 1 032 en Vendée, et 344 en Loire Atlantique), et très faible par rapport à certains départements français (plus de 5 000 sinistres par exemple en Haute-Garonne, plus de 2 000 dans les départements de la Région Parisienne), d'autant plus que les études s'y rapportant ont été effectuées pour certains avant la sécheresse de l'été 2003.

7.3.2. Communes sinistrées

Les 24 sites de sinistres se répartissent dans 17 communes du département, dont 7 ont été classées en état de catastrophe naturelle. Dans les 11 autres communes, il s'agit de sinistres qui ont fait l'objet d'une déclaration ou d'une étude géotechnique, mais pour lesquels la procédure d'indemnisation n'a pas abouti pour diverses raisons (conditions météorologiques, nature du terrain, vétusté de l'habitation, position du sinistre dans l'habitation...).

Le nombre de sinistres par commune est variable (Illustration 23) ; 15 communes sur les 17 sinistrées présentent un seul sinistre, les deux restantes comptent quant à elles 4 et 5 sinistres (respectivement Saint- Ouen-des-Toits et Laval).

Les 24 sinistres ont pu être localisés avec suffisamment de précision pour la suite de cette étude (Illustration 24).

D'un point de vue géographique, ces sinistres sont concentrés principalement sur une bande orientée WNW-ESE au centre du département, avec quelques sinistres supplémentaires localisés vers le sud-est du département.

La liste des sinistres ainsi que leurs coordonnées en Lambert II étendu est donnée en annexe 4. Pour des raisons de confidentialité, les noms et adresses des sinistrés n'apparaissent pas dans ce tableau.

7.3.3. Sinistres par formation argileuse

Les formations retenues comme argileuses couvrent près de 68 % du département de la Mayenne (Illustration 8) et regroupe 23 sinistres sur les 24 localisés, soit 95,8 % (Illustration 24).

Un seul sinistre ne se situe a priori pas sur des formations argileuses. Cependant, il peut avoir été provoqué par des niveaux d'altération non cartographiés ou d'extention trop faible. En effet, certaines formations considérées comme non argileuses peuvent contenir localement des lentilles ou des placages d'argiles non cartographiés. Cela concerne notamment les colluvions et les altérites de socle. De plus, il peut arriver que des sinistres attribués au retrait-gonflement des argiles soient en fait dus à des phénomènes de tassement de remblais ou de sols compressibles, des fluages sur des colluvions instables, des défauts de construction, des chocs thermiques sur des enduits de façade, etc. Enfin, certains contours des formations géologiques peuvent être localement inexacts ou la localisation des sinistres imprécise, ce qui peut avoir un impact sur les sinistres situés en limite de formation.



Illustration 24 – Répartition géologique des sinistres recensés et localisés

Parmi les formations retenues comme argileuses au sens large sur le département de la Mayenne, 4 présentent plus de 3 sinistres. Il s'agit :

- des alluvions fluviatiles récentes et Weichséliennes (3 sinistres)
- des sables, graviers et argiles du Cénomanien au Pliocène (3 sinistres)
- des calcaires, schistes et grès altérés du Carbonifère (8 sinistres)
- des ampélites, grès et siltites ordo-siluriens et dévoniens altérés (6 sinistres)

7.4. FRÉQUENCE D'OCCURRENCE RAPPORTÉE À LA SURFACE URBANISÉE

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

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

7.4.1. Détermination de la densité d'urbanisation par formation

Les contours des zones bâties du département ont été obtenus à partir des données de la couche « bâti » de la BDTopo de l'IGN (Illustration 25), mise à disposition par la DDT de la Mayenne dans le cadre de cette étude. Le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux affectant essentiellement les structures légères correspondant aux habitations individuelles, il a été choisi d'exclure de ce calcul de surface les bâtiments industriels, agricoles et commerciaux, religieux, sportifs, administratifs ou de transport, ainsi que les châteaux et divers monuments. Au final, les seuls bâtiments pris en compte dans le calcul sont ceux correspondant à la catégorie « autre » et à la nature « autre » de la BDTopo.

La surface totale des zones bâties du département a été ainsi estimée à environ 26,5 km², soit 0,5 % de la superficie départementale (Illustration 25).

La superposition de la carte synthétique des formations argileuses avec celle des zones urbanisées permet d'estimer la surface totale occupée par les zones bâties dans les formations retenues comme argileuses à près de 17,67 km², soit un peu plus de 0,33 % 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 26. Ces éléments permettent de calculer des densités de sinistres par formation géologique, en prenant en compte la surface de la zone bâtie de la formation. Les résultats montrent 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 le taux d'urbanisation varie d'une formation à l'autre.



Illustration 25 – Carte des zones bâties sur le département de la Mayenne (source de données BD Topo IGN)

7.4.2. Détermination du critère densité de sinistres

L'Illustration 26 fournit la densité de sinistres par formation argileuse ou marneuse pour 100 km² d'affleurement réellement bâti. La densité de sinistres moyenne rapportée aux zones bâties pour les formations argileuses est de 130 sinistres pour 100 km² réellement bâtis. Afin de hiérarchiser les formations argileuses selon leur degré de sinistralité, le seuil moyen de 130 sinistres pour 100 km² réellement bâtis a été utilisé pour établir les seuils de coupure pour l'attribution de notes de sinistralité :

- Note 1 (faible) : moins de 130 sinistres pour 100 km² de surface bâtie dans la formation ;

- Note 2 (moyen) : entre 130 et 260 sinistres pour 100 km² de surface bâtie dans la formation ;

- Note 3 (fort) : plus de 260 sinistres pour 100 km² de surface bâtie dans la formation.
REMARQUE IMPORTANTE : Le retour d'expérience acquis sur d'autres départements a montré que dans un département peu sinistré, pour les formations argileuses présentant une surface bâtie trop restreinte, la sinistralité n'était pas significative. En effet, la présence d'un seul sinistre pourrait se traduire par une densité de sinistres très importante. Pour ces formations, le critère de sinistralité ne peut être appliqué, et leur niveau d'aléa sera donc déduit uniquement de leur niveau de susceptibilité. Les formations concernées ici par cet ajustement, sont les formations ayant une superficie bâtie inférieure ou égale à 0,77 km², auxquelles la note est « NS », et le niveau d'aléa sera directement déduit du niveau de susceptibilité.

La note caractérisant ainsi la sinistralité des formations argileuses du département est résumée dans l'Illustration 26. Cette détermination de la note de densité de sinistres montre que parmi les 12 formations argileuses ou marneuses du département de la Mayenne :

- 1 formation a obtenu une note de densité de sinistres de 3 (la plus haute) ;

- 3 formations ont obtenu une note de densité de sinistres de 2 (moyenne) ;

- 3 formations ont obtenu une note de densité de sinistres de 1 (la plus faible) ;

- Enfin, pour les 5 dernières formations, le critère de la densité de sinistres n'a pu être retenu comme significatif, comme évoqué dans le paragraphe « Remarque Importante » ci-dessus.

ID	NOTATION	DESCRIPTION	Surface (km²)	Bâti (km²)	Nb sinistres	Densité de sinistres pour 100km ² bâtis	Note sin
1	Fy-z	Alluvions fluviatiles récentes et Weichséliennes	448,56	1,43	3	210,08	2
2	Fv-w-x	Alluvions fluviatiles anciennes	56,36	0,65	0	0,00	NS
3	С	Colluvions et dépôts de pente	224,10	0,49	1	203,42	NS
4	LP-OEy	Loess et limons des plateaux	283,60	0,65	0	0,00	NS
5	c-p SGA	Sables, graviers et argiles du Cénomanien au Pliocène	288,68	1,66	3	181,09	2
6	h CSG	Calcaires, schistes et grès altérés du Carbonifère	418,14	3,64	8	219,97	2
7	os-d AGS	Ampélites, grès et siltites ordo-siluriens et dévoniens altérés	409,36	1,88	6	319,68	3
8	o GA	Grès et argilites ordoviciens altérés	296,79	1,12	0	0,00	1
9	<i></i> ≁ iР	Altérites des formations paléozoïques indifférenciées	5,80	0,06	0	0,00	NS
10	b GS	Grès et siltites du Briovérien altérés	831,25	4,75	1	21,07	1
11	A ib	Altérites des formations briovériennes indifférenciées	223,98	1,16	1	86,24	1
12	k-h VqB	Formations volcaniques basiques altérées du Paléozoïque	50,10	0,19	0	0,00	NS

Illustration 26 – Détermination de la note densité de sinistres pour chaque formation argileuse ou marneuse du département de la Mayenne

8. Carte d'aléa

8.1. DETERMINATION DU NIVEAU D'ALEA

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

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

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.

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 28) en prenant en compte les coupures suivantes, qui permettent de définir trois niveaux d'aléa (faible, moyen et fort) :

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

Dans la Mayenne, aucune formation n'est ainsi classée en aléa fort vis à vis du phénomène de retrait-gonflement des argiles. En revanche, 1 formation présente un aléa moyen, résultant d'une susceptibilité moyenne combinée avec une sinistralité non significative (NS), il s'agit des *Altérites indifférenciées du Paléozoïque*. Cette formation ne couvre que 0,11 % de la superficie départementale (illustrations 27 et 28).

Les 11 autres formations, couvrant 67,7 % de la superficie départementale, sont considérées comme présentant un aléa faible vis à vis du phénomène de retraitgonflement. Elles résultent d'une susceptibilité faible assortie d'une sinistralité faible à forte ou non significative.

ID	NOTATION	DESCRIPTION	Classe Susc	Note _Sin	IA	Note_ Alea	Niveau d'aléa
1	Fy-z	Alluvions fluviatiles récentes et Weichséliennes	1	2	4	1	Faible
2	Fv-w-x	Alluvions fluviatiles anciennes	1	NS	NS	1	Faible
3	С	Colluvions et dépôts de pente	1	NS	NS	1	Faible
4	LP-OEy	Loess et limons des plateaux	1	NS	NS	1	Faible
5	c-p SGA	Sables, graviers et argiles du Cénomanien au Pliocène	1	2	4	1	Faible
6	h CSG	Calcaires, schistes et grès altérés du Carbonifère	1	2	4	1	Faible
7	os-d AGS	Ampélites, grès et siltites ordo-siluriens et dévoniens altérés	1	3	5	1	Faible
8	o GA	Grès et argilites ordoviciens altérés	1	1	3	1	Faible
9	<i></i> ≁ iР	Altérites des formations paléozoïques indifférenciées	2	NS	NS	2	Moyen
10	b GS	Grès et siltites du Briovérien altérés	1	1	3	1	Faible
11	A ib	Altérites des formations briovériennes indifférenciées	1	1	3	1	Faible
12	k-h VqB	Formations volcaniques basiques altérées du Paléozoïque	1	NS	NS	1	Faible

Illustration 27 – Niveau d'aléa des formations argileuses de la Mayenne

ID	NOTATION	DESCRIPTION	Surface (km²)	Surface (% département)	Niveau d'aléa
1	Fy-z	Alluvions fluviatiles récentes et Weichséliennes	448,56	8,60	Faible
2	Fv-w-x	Alluvions fluviatiles anciennes	56,36	1,08	Faible
3	С	Colluvions et dépôts de pente	224,10	4,30	Faible
4	LP-OEy	Loess et limons des plateaux	283,60	5,44	Faible
5	c-p SGA	Sables, graviers et argiles du Cénomanien au Pliocène	288,68	5,54	Faible
6	h CSG	Calcaires, schistes et grès altérés du Carbonifère	418,14	8,02	Faible
7	os-d AGS	Ampélites, grès et siltites ordo-siluriens et dévoniens altérés	409,36	7,85	Faible
8	o GA	Grès et argilites ordoviciens altérés	296,79	5,69	Faible
10	b GS	Grès et siltites du Briovérien altérés	831,25	15,94	Faible
11	<i>ж</i> ib	Altérites des formations briovériennes indifférenciées	223,98	4,29	Faible
12	k-h VqB	Formations volcaniques basiques altérées du Paléozoïque	50,10	0,96	Faible
		Total Aléa Faible	3530,92	67,70	

Total Aléa Faible 3530,92 67,70

9	<i>ж</i> iР	Altérites des formations paléozoïques indifférenciées	5,80	0,11	Moyen
		Total Aléa Moyen	5,80	0,11	
					-
		Total des formations argileuses	3 536,72	67,82	
		Total des formations a priori non argileuses	1 678,52	32,18	

Illustration 28 - Classement des formations en fonction de leur niveau d'aléa

8.2. CARTE D'ALÉA

La carte départementale d'aléa a été tracée à partir de la carte synthétique des formations à dominante argileuse, en attribuant à chacune des formations identifiées la classe d'aléa définie ci-dessus. Elle est présentée sur l'Illustration 29 et en carte horstexte à l'échelle 1/125 000 (où les sinistres, les zones urbanisées et les contours des communes sont également reportés). Son échelle de validité est le 1/50 000, puisque les contours sont issus des cartes géologiques à la même échelle.



Illustration 29 – Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement de Mayenne

Les formations retenues sont représentées par deux couleurs (jaune et orange) correspondant à leur niveau d'aléa retrait-gonflement (respectivement faible et moyen). Elles couvrent près de 68% de la superficie départementale.

Les zones blanches de la carte correspondent aux formations *a priori* non argileuses, et donc théoriquement dépourvues de tout aléa. Elles couvrent plus de 32 % de la superficie départementale.

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

Il est à noter que cette carte départementale d'aléa ne diffère pas de la carte de susceptibilité établie précédemment.

8.3. COHERENCE AVEC LES DEPARTEMENTS LIMITROPHES

Parmi les départements limitrophes de la Mayenne, tous disposent d'une carte d'aléa publiée ou en cours de publication. Il s'agit des départements de l'Ille-et-Villaine (35), du Maine-et-Loire (49), de la Sarthe (72), de l'Orne (61) et de la Manche (50). L'Illustration 30 juxtapose les 5 cartes d'aléa.

Dans l'ensemble, les résultats apparaissent comme relativement cohérents avec ceux des départements de l'Ille et Vilaine, de la Manche et de l'Orne. Toutefois, malgré le soin apporté à la cohérence des résultats des études de cartographie de l'aléa retraitgonflement de ces départements, il subsiste quelques différences d'interprétations. Celles-ci sont d'ailleurs en plus grand nombre avec les départements de la Sarthe et du Maine et Loire.

Les principales divergences concernent les formations de socle, jugées pour un grand nombre d'entre elles comme altérées dans le département de la Mayenne et donc conservées parmi les formations argileuses (cas des siltites ou argilites altérées, par exemple) alors qu'elles n'ont pas été retenues dans certains départements voisins ou traitées avec des méthodes différentes suivant les données disponibles. En effet il y a en général plus de formations de socle qui ont été retenues dans le département de la Mayenne que dans ceux limitrophes.

Les discontinuités correspondent généralement à une limite entre un aléa faible et un aléa a priori nul. Il n'y a pas d'aberration telle qu'une limite entre un aléa moyen ou fort et un aléa a priori nul ou faible, à l'exception toutefois des formations granitiques de la Manche classées en aléa moyen dans ce département du fait d'une minéralogie défavorable, alors qu'au vu des données disponibles en Mayenne, l'altération des granites n'a pas été jugée suffisamment argileuse pour conserver l'ensemble en tant que tel. Ces limites correspondent finalement aux incertitudes vis-à-vis de la connaissance des zones d'altération.



Illustration 30 – Juxtaposition des cartes l'aléa limitrophe à la Mayenne

9. Conclusion

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

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

La démarche de l'étude a d'abord consisté en l'établissement d'une cartographie départementale synthétique des formations argilo-marneuses affleurantes à subaffleurantes, à partir de la synthèse des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000 et d'observations bibliographiques existantes. La carte synthétique recense en définitive 12 formations, dont l'une des caractéristiques est la forte hétérogénéité, liée à leurs conditions de dépôts ou leur altération superficielle.

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

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

En définitive, la carte départementale d'aléa a été établie à partir de la carte synthétique des formations à dominante argilo-marneuse, en se basant sur leur hiérarchisation qui combine leur susceptibilité et la sinistralité associée (sauf pour 5 des formations argileuses, trop peu urbanisées pour que ce critère puisse être jugé

significatif). Cette dernière a été évaluée à partir du recensement des sinistres, en calculant pour chaque formation une densité de sinistres, rapportée à la surface d'affleurement réellement urbanisée, ceci afin de permettre des comparaisons fiables entre elles. Au total, 24 sinistres répartis dans 7 communes du département ont ainsi été recensés et localisés. Cet échantillon, bien qu'assurément non exhaustif, paraît représentatif du phénomène tel qu'il a été observé à ce jour dans le département.

En appliquant au département de la Mayenne la méthodologie mise au point au niveau national, aucune formation ici identifiée comme argileuse n'a été classée en aléa fort. Seuls deux niveaux d'aléa (moyen et faible) ont donc été distingués afin de caractériser les formations argileuses ou marneuses vis à vis du phénomène de retrait-gonflement. Sur une superficie départementale totale de 5 215,24 km²,

- 0,11 % a été classé en aléa moyen ;
- 67,7 % a été considéré en aléa faible ;
- 32,2 % correspondent 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'altération localisée de formations de socle. Ces placages ou lentilles argileuses, non cartographiés sur les cartes géologiques (et pour certaines 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 Mayenne, 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

Arnault P. (1995) - Les ressources en eau souterraine dans le département de la Mayenne. DDAF

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

Aurousseau P., Curmi P., Bouille S., Charpentier S. (1982) - Les vermiculites hydroxy-alumineuses du Massif Armoricain approche minéralogique, microanalytique et thermodynamique. Geoderma, 31 (1983) 17--40

Boulvais P., Vallet J. M., Esteoule-Choux J., Fourcade S., Martineau F. (2000) - *Origin of kaolinization in Brittany (NW France) with emphasis on deposits over granite* _ *stable isotopes (O,H) constraints.* Chemical Geology 168_2000.211–223

Brault N. (2002) - Ressources du sous-sol et environnement en Bretagne genèse, géométrie et propriété des différents types d'aquifères. Thèse, Université de Rennes

BRGM (1976) – Substance utiles de la région Pays-de-la-Loire. BRGM, Orléans

BRGM (1983) - Indices de phosphates de mayenne. BRGM, Orléans

BRGM (1983) - *Recherche de gisement d'attaplugite dans le bassin de Saffre.* BRGM, Orléans

BRGM (1984) – Compatibilité entre l'exploitation des attaplugites et celle de l'eau dans les bassins tertiaires de Cambon et de Saffre (Loire-Atlantique). BRGM, Orléans

BRGM (1998) – Guide des ressources minérales en Pays-de-la-Loire. BRGM, Orléans

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

Chantraine J., Bechennec F., Rabu D. (2005) - Notice explicative de la carte 1/250 000 du Massif Armoricain

Chantraine J. avec la collaboration de Béchennec F., Guillocheau (1997) - Notice de la carte à 1/250 000 des Pays de la Loire. BRGM-SGR Pays-de-la-Loire, Nantes.

Chaplot V., Curmi P., Walter C., Bernoux M. (2000) - Analyse de cartes pédologiques pour identifier le rôle du régime tectonique sur la répartition régionale de la perméabilité des altérites. C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de/a Terre et des planetes (2000) 479-483

Chassagneux D., Stieljes L., Mouroux P., avec la collab. de **Ducreux G.H.** (1995) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse/pluie) dans la région de

Manosque (Alpes de Haute Provence). Échelle communale et départementale. Approche méthodologique. Rapport BRGM R 38695

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

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

Clement J. P. (1984) – Formations argileuses des Pays-de-le-Loire pouvant servir à la fabrication de produits en argiles stabilisée à froid. BRGM-SGR Pays-de-la-Loire, Nantes.

Colas B., avec la collaboration de Le Strat P., Vincent M., Dugast D., Lenfant S. (2005) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de l'Hérault. Rapport BRGM/RP-54236-FR. 123 p., 54 ill., 6 ann., 3 cartes h.-t.

Delfau M., Le Berre P. (1981) – Définition de zones favorables à la prospection du kaolin dans le Massif Armoricain. BRGM, Orléans

Depagne J. (1980) – *Les kaolins de la région Pays-de-la-Loire.* BRGM-SGR Pays-de-la-Loire, Nantes.

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

Esteoule J., Esteoule-Choux J., Perret P (1972) - *Etude des formations superficielles du Massif Armoricain : caractères distinctiifs et passage des altérites et des dépôts tertiaires aux formations quaternaires.* Bull. Soc. Géol; minéral. Bretagne, 1972. (C), 1V, 2, 97-106

Esteoule-Choux J. (1967) - Contribution à l'étude des argiles du Massif Armoricain. Argiles des altérations et argiles des bassins sédimentaires tertiaires. Thèse, Université de Rennes

Esteoule-Choux J., Roze M. (1983) - *Sur l'origine de la kaolinite dans les sables rouges pliocène du Massif Armoricain.* Bull. Soc. géol. Minéral. Bretagne, 1982, (C), 14, 2 : 91 – 101, 4 pl.

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

Larue J. P., Greneche J. M. (1994) – Les dépôts détritiques pliocènes du contact Massif Armoricain – Bassin Parisien entre Angers et Laval (France). Geodinamic Acta (Paris) 1944, 7, 3, 158 – 168

Le Guern C, Notturno L. avec la collaboration de **Béchennec F., et Baudouin V.** (2005) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département du Maine-et-Loire. BRGM/RP-53753-FR., rapport final, 146 p., 28 ill., 5 ann., 3 cartes h.t.

Le Guern C., Coulon A. avec le collaboration de Baudouin V., Lotram Y., Montferrand M. Schroetter J. M., Béchennec F. (2009) Cartographie de l'aléa retrait gonflement des sols argileux dans le département de la Loire Atlantique. Rapport BRGM/RP-568118-FR, 131 p., 29 ill., 5 ann., 3 cartes h. t.

Le Guern C., Javanaud T. avec la collaboration de Béchennec F, Rouxel E., Guillet J., Guignat S. (2007) - Cartographie de l'aléa retrait gonflement des sols argileux dans le département de la Sarthe, Rapport BRGM/RP-55777-FR, 149 p., 22 ill., 5 ann., 3 cartes h. t.

Le Guern C., Prôno E. avec la collaboration de Lotram Y., Montferrand M., Béchennec F., Imbault M. (2010) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Vendée. Rapport BRGM/RP-57994-FR, 114 p., 38 ill., 6 ann., 3 cartes h.-t.

Le Lereculey A., Duriez M. avec la collaboration de **Imbault M.** (2008) Cartographie de l'aléa retrait gonflement des sols argileux dans le département de l'Orne. Rapport BRGM/RP-56594-FR 115 p., 26 ill., 4 ann., 3 cartes h.t.

Maignien R. (1982) – *Latérites et latéritisation.* Apport récents des chercheurs français. OSTROM, Paris

Maréchal J. C., Wyns R., Lachassagne P., Subrahmanyam K., Touchard F. (2003) - *Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré.* C. R. Geoscience 335 (2003) 451–460

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

Maurin J. C., Gilbert F., Robert M., Churlaud C. (2005) - L'érosion chimique et l'érosion mécanique à long terme. C. R. Geoscience 337 (2005) 841–848

Moinereau J. (1977) - Altération des matériaux basaltiques et genèse des argiles en climat tempéré humide et milieu organique. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XV, no 2, 1977 : 157-173

Nguetnkam J.P., Kamga R., Villiéras F., Ekodeck G. E., Yvons J. (2008) - Altération différentielle de granite en zone tropicale. Exemple de deux séquences étudiées au Cameroune (Afrique Central). Geoscienc 340 (2008) 451 – 461

Pannet P., Tirard E., Bellenger C., Lereculey A. et Lemoine Y. (2010) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de la Manche. Rapport BRGM/RP-58168-FR, 117 p., 26 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t.

Phan K. D. (1974) – Eléments de minéralogie appliquée. Minéralogie des argiles et des phyllosilicates. Ecoles Nationale Supérieur des Mines de Paris

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

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.

Robert M., Tessier D. (90') - *Nouvelles données sur la genèse et l'organisation des argiles des sols. Relations avec les propriétés.* Inra, Versailles.

Rocher P. (1992) – *Mémento roches et minéraux industriels. Argiles nobles pour produits céramiques.* BRGM, Orléans

Roy R. (2007) – Influence des altérations de surface naturelle sur la reconnaissance des roches par télédétection V-IR : application à la cartographie de l'ophiolite d'Oman et au programme d'étude des nouvelles AOC des Muscadets de la région nantaise. Thèse, Université de Nantes

Schroetter J.-M., avec la collaboration de Launay E., Ollivaud N., Imbault M., Le Roy S. et Plat E. (2009) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département du Morbihan. Rapport BRGM/RP-58041-FR. 157 p., 25 ill., 6 ann., 3 cartes h.-t.

Schroetter J.-M., avec la collaboration de Launay E., Quinton A., Imbault M., Le Roy S. et Plat E. (2010) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de l'Ille-et-Vilaine. Rapport BRGM/RP-58120-FR. 151 p., 60 ill., 4 ann., 3 cartes h.-t.

Service Interministériel de Défense et de Protection Civile, Préfecture de la Mayenne (2006) – Dossier Département des Risques Majeurs, 41 p.

Soman K., Slukin A. D. (1987) - Lateritization cycles and their relation to the formation and quality of kaolin deposits in south Kerala, India. Chemical Geology, 60 (1987) 273-280

Thorez J. (2003) – *L'argile, minéral pluriel.* Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège, Vol. 72, 1, 2003, pp. 19-70

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

Vernhet Y., (2010) - Carte géologique harmonisée du département de la Mayenne. Rapport BRGM/RP-58050-FR, 213 p., 2 fig., 6 tabl., 5 pl. h.t.

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

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

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

Vincent M., Hédou F., Chirouze M., Plat E., Le Roy S. (2008) – Cartographie à l'échelle départementale de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux à des fins

préventives. Symposium international Sécheresse et Construction, Marne-la-Vallée, 1-3 sept. 2008, éd. du LCPC, Paris, pp. 55-62

Vincent M., Cojean R., Fleureau J.-M., Cui Y. J., Jacquard C., Kazmierczak J.-B., Masrouri F., Tessier D., Alimi-Ichola I., Magnan J.-P., Blanchard M., Fabre D., Pantet A., Audiguier M., Plat E., Souli H., Taibi S., Tang A.-M., Morlock C., Maison T., Mrad M., Bréda N., Djeran-Maigre I., Duc M., Soubeyroux J.-M., Denis A., Proust D., Geremew Z., Le Roy S., Dumont M., Hemmati S., Nowamooz H., Coquet Y., Pothier C., Makki L., Chrétien M., Fontaine C. (2009) – Rapport de synthèse final du projet ARGIC (Analyse du retrait-gonflement et de ses Incidences sur les Constructions) – Projet ANR-05-PRGCU-005. Rapport BRGM/RP-57011-FR en partenariat entre le Centre de Géosciences, le BRGM, le LMSSMat, le CERMES, Fondasol, l'INERIS, le LAEGO, l'INRA, le LGCIE, le LCPC, Météo-France, le GHYMAC et l'Université de Poitiers, 92 p., 29 ill., 6 tabl., 39 ann. (sur CD Rom)

Wyns R. (2001) - Géologie de la surface (0-100 m), Impact des paléoaltérations sur les propriétés des roches. Formation BRGM

Cartes géologiques à 1/50 000 utilisées

Vernet Y., Chévremont P. Langevin C. (1997) - Notice explicative, Carte géol France (1/50 000), feuille Landivy (248) - Orléans : BRGM 83 p. Carte géologique par Vernhet Y., Chèvremont P., avec la collaboration de Lautridou J.P. (1997).

Vernhet Y., Doré F., Lautridou J.P., Talbo H., Verron G., Dhellemmes R., Enouf C. (1995). - Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Domfront (249) - Orléans : BRGM, 106 p. Carte géologique par Y. Vernhet. R. Dhellemmes, F. Doré, C. Enouf, J.P. Lautridou, G. Verron (1996).

Doré F., Dupret L., Le Gall J. (1977). - Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille La Ferté-Macé (250) - Orléans : BRGM, 31 p. Carte géologique par Doré F., Dupret L., Le Gall J.

Estoule-Choux J., Paris F., Guigues J., Dadet P. (1981). - Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Fougère (283). Orléans : BRGM, 38 p. Carte géologique par Bellion G., Le Hérissé A., Marot A., Dadet P. (1981)

Doré F., Dupret L., Le Gall J., Lebert A. avec la collaboration **de Lutzler J.-M.** (1987) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Villaine-La-Juhel (286) - Orléans : BRGM, 38 p. Carte géologique par Doré F., Dupret L., Le Gall J., Lebert A.

Mary G., Giordano R. (1989) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille ÉVRON (320) - Orléans: BRGM, 30 p. Carte géologique par Mary G., Giordano R. (1987).

Le Gall J., Maurizot P., avec la collaboration de Lautridou J.R, Giordano R., Gaillard C. (1998) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Sillé-le-Guillaume (321). Orléans : BRGM, 123 p. Carte géologique par J. Le Gall, P. Maurizot (1998).

Trautmann F., Carn A. (1997) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille La Guerche-de-Bretagne (354) - Orléans : BRGM, 65 p. Carte géologique par F. Trautmann, J.P. Clément (1997).

Ménillet F., Plaine J., Manigault B., Le Hérissé A. (1988) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Meslay-du-Maine (356) - Orléans : BRGM, 79 p.

Clément J.P., Chanteraine J., Limasset J.C. (1987) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Loué (357) - Orléans : BRGM, 35 p. Carte géologique par J.P. Clément, Brunel L. (1986).

Herrouin Y., Rabu D., avec la collaboration de **Chanteraine J., Chauvel J.J., Etienne H.** (1990) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Châteaubriant (389) - Orléans : BRGM, 51p. Carte géologique par Herrouin Y., Rabu D., Fourniguet J. (1988).

Brossé R., Guérangé B., Guérangé-Lozes J., Herroin Y., Houglatte E., Moguedet G., Pelhâte A. (1988) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Château-Gontier (391) - Orléans : BRGM, 48p. Carte géologique par Brossé R., Guérangé B., Guérangé-Lozes J., Houglatte E., Rolet J., Pelhâte A., Moguedet G., Herroin Y (1988).

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 μ m d'un matériau. Norme française XP P94-060-1

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Egal E. (2008) - Carte géologique harmonisée du département de la Savoie. BRGM/RP-56425-FR, 512 p., 6 fig., 2 tab., 2 pl. horstexte.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vincent M. (2006) – Retrait-gonflement des sols argileux : un aléa géologique lié aux conditions climatiques – Géosciences (la revue du BRGM pour une Terre Durable), n°3, mars 2006, pp. 50 à 55

Vincent M., Bouchut J., Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. (2006) – Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique. Rapport final de phase 1. Rapport BRGM/RP-54567-FR, 189 p., 127 ill.

Voltz M., Cabidoche Y.M. (1987) – Sur le retrait macroscopique d'un sol argileux gonflant. Modèle de relation entre le retrait vertical et les variations de teneur en eau. Vérification expérimentale du modèle. *C.R. Acad. Fr.*, Paris, 305, série II, p. 511-516 Waschkoski (1999) – Expertises géotechniques « sécheresse 1990 » en vue d'une reconnaissance de catastrophe naturelle. *Geo.* p. 38-39

Site internet

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

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

http://france.meteofrance.com/ : site internet de Météo France

<u>http://www.prim.net/</u> : site internet du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM), sur la prévention des risques majeurs, affichant les risques naturels et technologies ainsi que les reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle

http://www.lamayenne.fr/ : site internet du Conseil Général de la Mayenne,

http://www.mayenne.pref.gouv.fr/ : site internet de la Préfecture de la Mayenne,

<u>http://www.mayenne.pref.gouv.fr/pdf/ATLASA4.pdf</u> : site internet de l'atlas des paysages de Mayenne,

<u>http://www.mayenne.chambagri.fr/agriculture mayennaise/presentation.htm</u> : site internet de la Chambre d'agriculture de la Mayenne,

http://www.meteociel.fr/ : site internet de Météo Ciel,

http://www.meteodouest.fr/ : site internet de la Météo des Pays-de-la-Loire,

Annexe 1 – Rappel sur le mécanisme de retraitgonflement des argiles

Le terme argile désigne à la fois une classe granulométrique (< 2 µm) et une nature minéralogique correspondant à la famille des phyllosilicates.

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

À l'échelle microscopique, les minéraux argileux se caractérisent par une structure minéralogique en feuillets. Ceux-ci sont constitués d'un assemblage de silicates (SiO₃) et d'aluminates (Al₂O₃) 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 – Modalités d'interprétation minéralogique des données de sol (granulométrie, CEC, ...) mises à disposition par l'INHP (AgroCampus Ouest)

Plus de 400 analyses de sols, correspondant à plus de 100 profils de sols, ont été mises à disposition par Agro Campus Ouest (Programme IGCS : Inventaire, Gestion et Conservation des Sols, coordonné par l'INHP pour la région des Pays de la Loire, cf. ARG85 et ARG44). Dans un premier temps, les sols ayant une profondeur supérieure à 40 cm (afin d'exclure la terre végétale), pauvres en matière organique et présentant un taux d'argile supérieur à 8 % ont été sélectionnés. Sur cette sélection, la CEC a été interprétée en termes de minéralogie en s'appuyant sur les données de la bibliographie. Ensuite, grâce à la localisation des points de prélèvement, l'interprétation minéralogique ainsi obtenue a pu être mise en relation avec la carte des formations argileuses et servir à la caractérisation minéralogique de plusieurs formations (cf.Illustration 12).

1- Bibliographie : CEC des minéraux argileux

Minéral	Surface interne (m²/g)	Surface externe (m²/g)	Surface totale (m ² /g)	C.E.C. (milliéquivalent/100g)
kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
illite	20-55	80-120	100-175	10-40
smectites	600-700	80	700-800	80-150
vermiculite	700	40-70	760	100-150
chlorite	-	100-175	100-175	10-40

Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux (d'après MOREL) MOREL R. (1996) - Les sols cultivés. Lavoisier, Paris.

of Clay M	Exchange Capacitie inerals (from Drev	er, 1982, p. 82)
smec	tites	80-150
verm	iculites	120-200
illi	tes	10- 40
kaol	inite	1- 10
chlo	rite	<10
Cati	on exchange capacities and	surface charge densities
Clay mineral group	Cation exchange capacity (CEC) (cmol (+) kg ⁻¹)	Surface charge density (τ) (cmol (-) m ⁻²)
Kaolinites	3-20	$2-6 \times 10^{-4}$
Illites	10-40	$1-2 \times 10^{-4}$
Smectites	80-120	$1 - 1.5 \times 10^{-4}$
Vermiculites	100-150	3×10^{-4}

CEC des minéraux argileux (Eslinger & Peaver, 1988). In Fagel N. (2008), Cours sur la Géologie des Argiles, Université de Liège



2- Mise en relation entre la CEC et la proportion d'argile des échantillons sélectionnés et interprétation de la minéralogie sur la base des CEC des minéraux argileux.

Annexe 3 – Résultats d'analyses des échantillons prélevés pour la caractérisation minéralogique et géotechnique

N° échantillon	Formation argileuse	Formation Carte Harm.	X Lanmbert Ile	۲ Lambert Ile	Profondeur des échantillons	Lithologie	Commune	Composition minéralogique	VBS
RG53_1	7	266	360 702	2 350 283	50-60 cm (talus)	mélange de sable et d'argile	LE GENEST-SAINT- ISLE	vermiculite et chlorite ~8% illite et/ou mica ~21 % pyrophyllite ~49% kaolinite ~22 %	0,82
RG53_1a	6	519	357 579	2 353 759	80 cm (talus)	colluvion/dépôts de pente, avec éléments emballés tels que des fragment de schistes altérés ou des éléments de grès fin, présence de passées	SAINT-OUEN-DES- TOITS	vermiculite probable ~3% illite et/ou mica ~28 % pyrophyllite ~55% kaolinite ~14 %	1,37
RG53_2	NA	510	357 660	2 355 921	40 cm (tarière)	sables pulvérulent, beaucoup de blocs de grès très indurés, grossiers et hétérométriques	LA BACONNIERE	vermiculite et chlorite ~3% illite ~11% pyrophjyllite ~2% kaolinite ~84 %	1,22
RG53_3	NA	507	348 243	2 354 439	60 cm (talus)		BOURGON	vermiculite probable ~2% illite et/ou mica ~41 % kaolinite ~57 %	0,21
RG53_4	11	608	350 173	2 345 948	50 cm (talus)	argile blanche à ocre, bloc de queartzite et grès	SAINT-CYR-LE- GRAVELAIS	illite et/ou mica ~44% kaolinite ~56%	
RG53_4a	6	521	362 614	2 346 331	1,30 m (talus)	schiste altéré	SAINT-BERTHEVIN	illite et/ou mica ~91% vermiculite ~2% kaolinite ~7%	1,27
RG53_5	6	514	372 757	2 343 576		sable, blocs de schiste	BONCHAMP-LES- LAVAL	vermiculite ~7% illite et/ou mica ~54 % kaolinite ~39 %	0,42
RG53_5a	5	305	377 592	2 334 883	50 cm (carrière)	sable et graviers du pliocène	MAISONCELLES-DU- MAINE	vermiculite ~1% illite et/ou mica ~12 % pyrophyllite ~2% kaolinite ~85 %	
RG53_6	2	9	375 188	2 319 358	70 cm (talus)	alluvion pulvéruleuse, beaucoup de galets	AZE	vermiculite ~10% illite et/ou mica ~49 % kaolinite ~41 %	0,67
RG53_7	10	166	371 907	2 326 360	20 cm (talus)	schiste altéré sur 10 à 30 cm	SAINT-SULPICE	vermiculite et vermiculite dioctahédrique ~12% illite et/ou mica ~61 % kaolinite ~27 %	1,98
RG53_9	6	536	366 287	2 343 719	70cm (talus)	altérites argileuse	LAVAL	vermiculite et chlorite ~18% illite et/ou mica ~23 % sépiolite ~2 % pyrophyllite ~9% kaolinite ~48 %	
RG53_10	7	267	384 652	2 350 206	50 cm (tarière)	sable argileux (altérite), blocs de grès	SAINT-CENERE	vermiculite ~1% illite et/ou mica ~31 % pyrophyllite ~60% kaolinite ~8 %	0,83
RG53_12	NA	567	394 872	2 354 682	30 cm (talus)	poche d'argile	EVRON	vermiculite et chlorite ~53% illite et/ou mica ~30 % kaolinite ~17 %	

I – Description des échantillons et résultats de caractérisation

N° échantillon	Formation argileuse	Formation Carte Harm.	X Lanmbert lle	۲ Lambert Ile	Profondeur des échantillons	Lithologie	Commune	Composition minéralogique	VBS
RG53_13	NA	563	394 897	2 349 934	30 cm (tarière)	sable pulvérulent, beaucoup de blocs	CHATRES-LA-FORET	vermiculite et vermiculite dioctahédrique ~21% illite et/ou mica ~50 % kaolinite ~29 %	
RG53_13 a	NA	559	398 736	2 344 665	1 m (tarière)	altérites argileuse	CHAMMES	vermiculite ~11% illite et/ou mica ~29 % pyrophyllite ~5% kaolinite ~55 %	1,55
RG53_13 b	12	568	391 780	2 347 902	1 m (tarière)	altérites argileuse	SAINT-LEGER	vermiculite et chlorite ~23% illite et/ou mica ~22 % pyrophyllite ~4% kaolinite ~51 %	0,31
RG53_14	1	5	368 624	2 354 603	50 cm (tarière)	alluvion peu argileuse	ANDOUILLE	vermiculite ~6% illite et/ou mica ~17 % pyrophyllite ~61% kaolinite ~16 %	
RG53_15	NA	180	356 458	2 369 992	80 cm (tarière)	altérite sablo-argileuse	MONTENAY	vermiculite et chlorite ~21% illite et/ou mica ~32 % kaolinite ~47 %	
RG53_16	NA	602	367 037	2 377 480	1 m (tarière)	arène granitique argileuse	BRECE	vermiculite et chlorite ~22% illite et/ou mica ~26 % kaolinite ~52 %	0,94
RG53_17	5	305	384 559	2 373 470	50 cm (talus)	sables et graviers avec passées d'argile	SAINT-FRAIMBAULT- DE-PRIERES	vermiculite ~9% interstratifié smectite/illite ~8 % illite et/ou mica ~17% kaolinite ~66 %	
RG53_18	10	167	403 099	2 384 752	50 cm (talus)	siltes argileux	JAVRON-LES- CHAPELLES	vermiculite et chlorite ~26% sépiolite probable ~1% illite et/ou mica ~41 % kaolinite ~32 %	
RG53_19	5	311	422 398	2 383 960	40 cm (talus)	sables et graviers avec passées d'argile	RAVIGNY	interstratifié smectite/illite ~2% illite et/ou mica ~23 % kaolinite ~75 %	3,6
RG53_20	7	130	406 275	2 378 185	1 m (tarière)	argileux	CRENNES-SUR- FRAUBEE	vermiculite ~2% illite et/ou mica ~16 % pyrophyllite ~8% kaolinite ~74 %	1,79
RG53_21	10	165	380 799	2 321 753	50 cm (tarière)	silto-argileux	GENNES-SUR-GLAIZE	vermiculite et vermiculite dioctahédrique ~14% illite et/ou mica ~65 % kaolinite ~21 %	
RG53_22	10	166	401 834	2 387 405	80 cm (tarière)	altérite argileuse avec bloc de grès et de silte	JAVRON-LES- CHAPELLES	vermiculite et chlorite possible ~20% sépiolite en traces illite et/ou mica ~47 % kaolinite ~33 %	0,88
RG56_23	NA	180	363 343	2 390 258	60 cm (tarière)	altérite sablo-argileuse	DESERTINES	vermiculite et chlorite possible ~22 % illite et/ou mica ~32 % kaolinite ~46 %	

N° échantillon	Formation argileuse	Formation Carte Harm.	X Lanmbert Ile	۲ Lambert Ile	Profondeur des échantillons	Lithologie	Commune	Compositio n minéralogiq ue	VBS
RG53_24	6	519	392 931	2 339 818	50 cm (carrière)	altérite sablo-argileuse	VAIGES	vermiculite et chlorite possible ~6% illite et/ou mica ~27 % pyrophyllite ~26% kaolinite ~41 %	
RG53_25	8	145	409 156	2 381 053	50 cm (tarière)	sable	VILLEPAIL	vermiculite ~11% illite et/ou mica ~37 % kaolinite ~52 %	0,48
RG53_26	NA	193	378 322	2 360 613	1 m (tarière)	arène granitique	MARTIGNE-SUR- MAYENNE	vermiculite, vermiculite dioctahédrique et chlorite ~16% sépiolite ~3% illite et/ou mica ~23 % kaolinite ~58 %	0,48
RG53_26 a	NA	287	394 073	2 387 648	70 cm (tarière)	altérite de cornéenne	LASSAY-LES- CHATEAUX	vermiculite, vermiculite dioctahédrique et chlorite ~27% sépiolite possible en traces illite et/ou mica ~33 % kaolinite ~40 %	0,6

II – Protocole analytique (DRX)

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

1. Principe

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

2. Appareillage

L'analyse a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre Bruker D4 Endeavor, muni d'une anticathode de cuivre et d'un détecteur rapide Lynxeye. Les modalités expérimentales nécessitent une tension de 40 kV, une intensité de 25mA. Le balayage angulaire s'étend de 2,49 à 32,5 °20.

3. Préparation des échantillons

La technique de préparation est décrite en détail par Holtzappfel (1985). Les échantillons sont mis à déliter dans de l'eau distillée. Ils sont ensuite décarbonatés par un traitement à l'acide chlorhydrique dilué à N/5. L'excès d'acide est éliminé par rinçages successifs à l'eau distillée jusqu'à défloculation du matériel. Les suspensions obtenues sont placées en piluliers. Les micro-agrégats sont éliminés par utilisation d'un micro-homogénéisateur. La séparation de la fraction granulométrique inférieure à 2 μ m s'effectue en prélevant, à l'aide d'une seringue, la partie supérieure de la suspension (1,5 cm) après décantation pendant 1 h 15 min. Ces paramètres sont calculés d'après la loi de Stokes : t = 190 x /d² où t représente le temps de décantation, d le diamètre moyen des particules et X la profondeur de chute des particules de diamètre d. La fraction ainsi prélevée est centrifugée à 3500 tours/min. pendant 45 min, le culot obtenu est étalé à l'aide d'une lamelle sur une lame de verre rainurée afin d'orienter les minéraux argileux selon le plan (001).

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

4. Analyse semi-quantitative

L'identification des minéraux argileux est réalisée en confrontant la position des raies principales et des harmoniques sur les trois essais réalisés (Brindley & Brown, 1980). L'analyse semi-quantitative (Biscaye, 1965; Holtzappfel, 1985) est basée sur l'intégration du signal des pics principaux (I/Io = 100) caractéristiques de chacun des minéraux argileux en présence à l'aide du logiciel MacDiff (Petschick, 2000). Les minéraux smectitiques sont caractérisés par un pic à 14Å sur l'essai naturel, qui gonfle

à 17Å lors de l'essai glycolé et se rétracte à 10Å pour l'essai chauffé. L'illite est caractérisée par un pic basal à 10Å pour les trois essais (naturel, glycolé et chauffé). La chlorite est déterminée par la présence de 4 pics situés à 14Å, 7.1Å, 4.75Å et 3.54Å sur les trois essais. La kaolinite est caractérisée par deux pics à 7.2Å et 3.58Å sur les essais naturels et glycolé, qui disparaissent au chauffage. La reproductibilité de l'analyse, basée sur 3 mesures par diffraction des rayons X à partir de 5 aliquotes d'une même préparation, est de 5% (Bout-Roumazeilles, 1995).

- Biscaye, P.E., 1965, Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans: Geological Society of America Bulletin, v. 76, p. 803-832.
- Brindley, G.W., and Brown, G., 1980, Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-ray Identification: London, Mineralogical Society, p. 495.

Holtzapffel, T., 1985, Les minéraux argileux. préparation, analyse diffractométrique et détermination: Lille, Société Géologique du Nord, 136 p.

Petschick, 2000, MacDiff, Freeware.

III – Diffractogrammes obtenus 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 4 – Sinistres

 Nombre d'arrêtés catastrophe naturelle au titre des mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et la réhydratation des sols par commune (données actualisées au 20 juillet 2010)

•Nombre de sinistres recensés par commune

• Localisation des sinistres

Nombre d'arrêtés par commune

Commune	Nb d'arrêté
Épineux le Seguin	1
Laval	1
Le Bignon-du-Maine	2
Le Genest-Saint-Isle	1
Sainte-Suzanne	1
Saint-Jean-sur-Erve	1
Vaiges	1

Nombre de sinistres recensé par commune

Commune	Nb de sinistres
ARGENTON-NOTRE-DAME	1
BANNES	1
BOUESSAY	1
COURBEVEILLE	1
DÉSERTINES	1
ÉPINEUX LE SEGUIN	1
LAVAL	5
LE BIGNON-DU-MAINE	1
LE BOURGNEUF-LA-FORÊT	1
LE GENEST-SAINT-ISLE	1
LOUVERNÉ	1
SAINT-BERTHEVIN	1
SAINT-BRICE	1
SAINTE-SUZANNE	1
SAINT-JEAN-SUR-ERVE	1
SAINT-JEAN-SUR-MAYENNE	1
SAINT-OUEN-DES-TOITS	4
VAIGES	1

INSEE	Commune	Identifiant sinistres	X (lambert II étendu, m.)	Y (lambert II étendu, m.)
53130	LAVAL	53130_001	366360	2344660
53130	LAVAL	53130_002	369115	2344968
53130	LAVAL	53130_003	366369	2344639
53130	LAVAL	53130_004	370168	2343914
53255	SAINTE-SUZANNE	53255_001	399392	2347597
53267	VAIGES	53267_001	391127	2339215
53228	SAINT-JEAN-SUR- ERVE	53228_001	396998	2340737
53095	EPINEUX-LE-SEGUIN	53095_001	399501	2331475
53039	LE BOURGNEUF-LA- FORET	53039_001	353895	2356814
53140	LOUVERNE	53140_001	372564	2351078
53130	LAVAL	53130_005	368808	2344387
53229	SAINT-JEAN-SUR- MAYENNE	53229_001	369847	2353181
53082	COURBEVEILLE	53082_001	359738	2337221
53201	SAINT-BERTHEVIN	53201_001	364078	2346080
53006	ARGENTON-NOTRE- DAME	53006_001	380664	2313715
53019	BANNES	53019_001	399428	2334831
53030	LE BIGNON DU MAINE	53030_001	379796	2332039
53037	BOUESSAY	53037_001	396193	2322654
53103	GENEST-ST-ISLE	53103_001	360352	2349481
53203	ST BRICE	53203_001	392219	2321478
53243	ST-OUEN-DES-TOITS	53243_001	358743	2353522
53243	ST-OUEN-DES-TOITS	53243_002	358760	2353523
53243	ST-OUEN-DES-TOITS	53243_003	358776	2353523
53243	ST-OUEN-DES-TOITS	53243_004	360716	2355449

Localisation des 24 sinistres recensés

Annexe 5 – Liste et coordonnées des organismes ayant fourni des données de sinistres et/ou géotechniques

- Nombre de données fournies par chacun
 - Coordonnées

I – Nombre de données fournies par chacun des organismes

Sources des données géotechniques	Nombre de données
Coulais Consultants	32
DDE	1319
Fondasol	11
LRPC_Angers	3
Mairie Evron	3
SIC INFRA 49	5
Réseau Ferré de France	36
Total	1396

Sources des données de sinistres	Nombre d'adresses de sinistres
ARCADIS	1
Caisse Centrale de Réassurance (CCR)	8
Coulais Consultant	2
SIC INFRA 49	4
Réponse des mairies à l'enquête	9
Total	24

II – Coordonnées des organismes

BUREAUX D'ETUDES :

ARCADIS

17 pl Magellan 44 800 st Herblain

Tél : 02.40.92.36 Fax : 02.40.92.11.31.

Coulais Consultant

Centre d'affaires "Les Loges" ZAC des Couflans 49 480 St Sylvain d'Anjou Tél : 02.41.42.56.10 Fax : 02.41.42.56.75

Fondasol

ZAC de la Pentecôte 12 Rue Léon Gaumont 44 700 ORVAULT

Tél. : 02.51.77.86.50 Fax : 02.51.78.65.15

SIC INFRA

21 r Paul Pousset 49 130 Les Ponts de Cé

Tél : 02.51.77.86.50 Fax : 02.41.21.03.81.

ADMINISTRATIONS :

DDE

95 rue du Pressoir Salé BP 3855 53 030 Laval Cedex 9

Tél : 02.43.67.87.80 Fax : 02.43.67.87.95

AUTRES ENTITES :

Réseau Ferré de France

Direction régionale Immeuble le Henner 1 rue Marcel Paul BP 11 802 – 44 008 Nantes Cedex 1

Tél : 02.40.35.92.50 Fax : 02.40.35.92.51.

LRPC Angers

23, avenue de l'Amiral Chauvin BP 69 49136 Les Ponts de Cé Cédex

Tél. :02.41.79.13.00 Fax : 02.41.44.32.76

Annexe 6 – Regroupement des formations de la carte harmonisée pour chaque formations argileuses

n° formation de la carte harmonisée	code formation de la carte harmonisée	description formation de la carte harmonisée	n° formation argileuse	formation argileuse
5	Fz	Alluvions récentes (Holocène)		Alluvions fluviatiles
6	Fy	Alluvions weichséliennes	1	Weichséliennes
7	Fx	Alluvions fluviatiles périglaciaires (Pléistocène moyen, Saalien)		
8	Fw	Alluvions fluviatiles périglaciaires (Pléistocène moyen, Elstérien)	2	Alluvions fluviatiles anciennes
9	Fv	Alluvions fluviatiles périglaciaires (Pléistocène inférieur)		
12	С	Colluvions de versants indifférenciées : limons argilo-sableux ou sablo-argileux à débris lithiques	2	Colluvions et
606	CSF	Epandages fluviatiles colluvionnés et soliflués	3	dépôts de pente
62	SGH	Dépôts de pente hétérométriques périglaciaires (heads), éboulis.		
42	LP-OEy	Loess non carbonatés ou décalcifiés, limons des plateaux (Quaternaire-Weichsélien)	4	Loess et limons des plateaux
485	p2-3	Sables et argiles (Pliocène supérieur)		Sobles graviere
305	с1-р	Sables, graviers et galets roulés (Cénomanien à Pliocène)	5	et argiles du
311	c1SM	Sables du Maine (sur Villaines: Cénomanien inférieur à moyen)		Pliocène
512	h2c- 3L(2)	Formation des Schistes de Laval: niveaux gréseux (Viséen supérieur-Namurien)	6	Calcaires, schistes et grès du
513	h2c- 3L(1)	Formation des Schistes de Laval: niveaux conglomératiques à microconglomératiques (Viséen supérieur-Namurien)		Carbonifere altérées
514	h2c-3L	Formation des Schistes de Laval (Formation de Heurtebise)(Viséen supérieur-Namurien)		
515	h2Br	Brèches périrécifales (Viséen)		
516	h2Si	Calcaires viséens silicifiés		
517	h2W	Formation des Calcaires de Bouère(calcaires waulsortiens) (Viséen inférieur à moyen)		
518	h2a-bL	Formation du Calcaire de Laval (Viséen inférieur à moyen)		
519	h1c-2cS	Formation du Calcaire de Sablé (Tournaisien supérieur à Viséen supérieur)		
521	h1cC	Formation de Changé: grauwackes à Paléchinides (Tournaisien supérieur)		
533	h1(3)	Formation sédimentaire de l'Huisserie: niveau de houille (Carbonifère: Tournaisien)		

n° formation de la carte harmonisée	code formation de la carte harmonisée	description formation de la carte harmonisée	n° formation argileuse	formation argileuse
534	h1(2)	Formation sédimentaire de l'Huisserie: faciès conglomératiques (Carbonifère: Tournaisien)		
536	h1H	Formation sédimentaire de l'Huisserie (Carbonifère: Tournaisien)		
539	d1b-3bC	Formation de St Cénéré s.l. (membres de St- Cénéré, de Montguyon, du Buard, et de Marollières, indifférenciés)		
266	d1aG	Formation de Gahard: Grès à Platyorthis monnieri (Dévonien inférieur: Lochkovien inférieur)		
267	s3-d1a	Groupe de St Jean-sur-Erve, formation du Val (Ludlow à Lochkovien basal)		
130	s2-4	Formation des ampélites, formation des Tuileries (Wenlock-Pridoli) (Silurien)		Ampálites arès et
541	s2-3	Formation de Renac: ampélites, shales, grès et siltites indifférenciés (Wenlock-Ludlow?)	7	siltites ordo- siluriens et
131	s1-4	Silurien indifférencié (Llandoverien à Pridoli)		dévonien altérés
132	o6-s3	Formation de la Lande-Murée (ou du "Grès culminant"): grès quartzeux micacés blancs à rouges; intercalations de schistes noirs		
544	06- s1C(2)	Formation de la Chesnaie : membre des "Schistes moyens" (Asghill ?-Llandovérien inférieur ?)(synclinaux de Martigné-Ferchaud et Segré)		
545	o6- s1C(1)	Formation de la Chesnaie : membre du "Grès de base" (Asghill ?-Llandovérien inférieur ?)		
134	06	Tillite de Feuguerolles (Asghill)	8	Grès et argilites
269	o5-6PC	Formation de Riadan-Renazé, Schistes du Pont-de-Caen ("Schistes à Trinucleus") (Caradoc à base de l'Asghill)		ordoviciens alteres
548	o5-6GI	Formation de St-Germain-sur-Ille (Caradocien inférieur-Ashgillien) : grès, grès psammitiques, siltites		
549	o5aC	Formation du Châtellier: Grès verts chlorito- micacés et quartzites blancs (Caradoc inférieur)		
136	04-5	Grès de May-sur-Orne (Llandeilo-Caradoc)		
141	o3-5	Formation d'Andouillé (Schistes d'Urville, Schistes du Pissot, "Schistes à Calymènes") (Lanvirn à Llandeilo, voir Caradoc)		
142	o3-5 (Fe)	Schistes d'Urville, Schistes du Pissot: minerai de fer oolitique (Llanvirn à Llandeilo)		

n° formation de la carte harmonisée	code formation de la carte harmonisée	description formation de la carte harmonisée	n° formation argileuse	formation argileuse
550	o3-5T	Formation d'Angers-Traveusot: siltites micacées et schistes ardoisiers chlorito- micacés (Arénig supérieur?- Lanvirn à Llandeilo voir Caradoc inférieur?)		
551	o2c	Formation du Grès armoricain: membre supérieur: quartzites, psammites blancs (Arénig moyen)		
553	o2b	Formation du Grès armoricain: membre moyen (membre du Congrier ou Schistes intermédiaires):siltites argilo-micacées (Arénig moyen)		
554	o2a	Formation du Grès armoricain: membre inférieur: quartzites massifs, psammites blancs (Arénig moyen)		
143	o2Cg	Grès armoricain: horizon conglomératique (Arénig)		
145	o2	Grès armoricain (Arénig)		
607	<i></i>	Altérites des formations paléozoiques indifférenciées. Faciès fortement argilisés	9	Altérites indifférenciées du Paléozoïque
572	b2GQ	Grès-quartzites, quartzites (Briovérien supérieur à Cambrien)		
332	b2CH	Cherts hydrothermaux (Protérozoique supérieur; Briovérien supérieur)		
167	b2	Siltites, argilites, grès, grauwackes et conglomérats (Briovérien supérieur; Briovérien supérieur à Cambrien inférieur ? en Bretagne centrale)	10	Grès et siltites du
574	b2C	Grès carbonatés (Briovérien supérieur à Cambrien en Bretagne centrale)	10	Briovérien altérés
165	b2S	Siltites, siltites ardoisières et argilites dominantes, non métamorphiques (Briovérien supérieur; à Cambrien inférieur en Bretagne centrale)		
166	b2G	Grès fins et grauwackes (Briovérien supérieur; à Cambrien en Bretagne centrale)		
38	<i></i> ⊮b2	Altérites des formations briovériennes indifférenciées	- 11	Altérites indifférenciées du Briovérien
608	<i>⊮</i> 2b2	Altérites des formations briovériennes indifférenciées. Faciès fortement argilisés		
523	h1tfK3	Roches volcaniques associées à la Formation de l'Huisserie: tufs spilitiques (Carbonifère: Tournaisien)	12	Formations volcaniques basiques altérées

n° formation de la carte harmonisée	code formation de la carte harmonisée	description formation de la carte harmonisée	n° formation argileuse	formation argileuse
524	h1K3	Roches volcaniques associées à la Formation de l'Huisserie: spilites et volcanites associées.(Carbonifère: Tournaisien)		du Paléozoïque
276	kρtf	Tufs, cinérites, ponces des complexes volcaniques cambriens (Écouves-Multonne-Les Coëvrons, Vimarcé, etc)		
568	kρvs	Tuffites, pyroclastites remaniées (volcano- sédimentaire) associées aux complexes vocanique cambriens (Écouves, Multonne, Charnie, Coëvrons, Vimarcé, Voutré etc)		
592	η qN	Diorite de Neau (cycle cadomien tardif)		
593	ηqE	Diorite quartzique à grain fin à moyen		
594	ηE	Diorite à grain fin à moyen		
184	dε	Dolérites, microgabbros, en filons (Dévono- Carbonifère)		



Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 Service géologique régional Pays de la Loire 1, rue des Saumonières BP 92342 44323 - Nantes Cedex 3 - France Tél. : 02.51.86.01.51







