





# Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de Loire-Atlantique

Rapport final

**BRGM/RP-56818-FR**  
mars 2009

Étude réalisée dans le cadre de l'opération de service public 06RISD28 du BRGM

**C. Le Guern, A. Coulon**, avec la collaboration de **V. Baudouin, Y. Lotram, M. Montferrand, J-M. Schroetter, et F. Béchenec**

**Vérificateur :**

Nom : Marc Vincent

Date : 12 mars 2009

Signature :



**Approbateur :**

Nom : Pierre Conil

Date : 13 mars 2009

Signature :

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



**Mots clés :**

argiles, marnes, argiles gonflantes, smectites, retrait-gonflement, aléa, risque naturel, sinistre, sécheresse, catastrophe naturelle, géotechnique, cartographie, Loire-Atlantique, Pays de la Loire

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

**Le Guern C., Coulon A.** avec la collaboration de **Baudouin V., Lotram Y., Montferrand M., Schroetter J-M.** et **Béchenec F.** (2009) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de Loire-Atlantique. Rapport BRGM/RP-56818-FR, 131 p., 29 ill., 5 ann., 3 cartes h.-t.

## Synthèse

Les phénomènes de retrait-gonflement de certaines formations géologiques argileuses affleurantes provoquent des tassements différentiels qui se manifestent par des désordres affectant principalement le bâti individuel. En France métropolitaine, ces phénomènes, mis en évidence à l'occasion de la sécheresse exceptionnelle de l'été 1976, ont pris une réelle ampleur lors des périodes sèches des années 1989-91 et 1996-97, puis récemment au cours des étés 2003 et 2005.

La Loire-Atlantique fait partie des départements français touchés par le phénomène, puisque 344 sinistres imputés à la sécheresse y ont été recensés dans le cadre de la présente étude. A la date du 30 octobre 2008, 36 communes sur les 221 que compte le département ont été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle pour ce phénomène, pour des périodes comprises entre mai 1989 et septembre 2005, soit un taux de sinistralité de 16 %. Par ailleurs, d'après les données de la Caisse Centrale de Réassurance actualisées en septembre 2008, la Loire-Atlantique est située en 59<sup>ème</sup> position des départements français en termes de coût d'indemnisation pour ce phénomène, avec un montant cumulé évalué à 2,5 millions d'euros en coûts actualisés.

Afin d'établir un constat scientifique objectif et de disposer de documents de référence permettant une information préventive, le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT) a demandé au BRGM de réaliser une cartographie de cet aléa à l'échelle de tout le département de Loire-Atlantique, 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 concerna à terme l'ensemble du territoire métropolitain, dont les cinq départements des Pays de la Loire.

L'étude a été conduite par le Service Géologique Régional des Pays de la Loire, en collaboration avec le Service Aménagement et Risques Naturels du BRGM. Le financement en a été assuré à hauteur de 25 % par la dotation de service public du BRGM, le complément ayant été pris en charge par le Fonds national de prévention des risques naturels majeurs, dans le cadre d'une convention de cofinancement signée avec la Préfecture de la Loire-Atlantique.

La démarche de l'étude a d'abord consisté à établir une cartographie départementale synthétique des formations à dominante argileuse ou marneuse, affleurantes à sub-affleurantes, à partir d'une part de la carte géologique harmonisée du département, réalisée dans le cadre de la présente étude (Béchenec, 2007) et valide à l'échelle du 1/50 000, et d'autre part des cartes géologiques éditées par le BRGM à cette même échelle. Les 22 formations ainsi identifiées et cartographiées ont ensuite fait l'objet d'une hiérarchisation quant à leur susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Cette classification a été établie sur la base de trois critères principaux : la caractérisation lithologique de la formation, la composition minéralogique de sa phase argileuse et son comportement géotechnique, ce qui a conduit à l'établissement d'une carte départementale de susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement.

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

Sur cette carte, les zones d'affleurement des formations à dominante argileuse ou marneuse sont caractérisées par trois niveaux d'aléa (faible, moyen et fort), par comparaison avec les cartes établies dans d'autres départements avec la même approche et les mêmes critères.

- 0,11 % de la superficie départementale a été ainsi classé en aléa fort ;
- 5,54 % a été considéré en aléa moyen ;
- 67,2 % est classé en aléa faible ;
- 27,15 % correspond à des zones *a priori* non concernées par le phénomène.

Il n'est toutefois pas exclu que, sur ces derniers secteurs considérés comme non concernés par le phénomène, se trouvent localement des zones argileuses d'extension limitée, notamment dues à l'altération localisée des roches de socle (granites, schistes, micaschistes, grès...) ou à des lentilles argileuses non cartographiées, et susceptibles de provoquer quelques sinistres.

Cette carte d'aléa retrait-gonflement des sols argileux du département de la Loire-Atlantique, dont l'échelle de validité est le 1/50 000, pourra servir de base à des actions d'information préventive dans les communes les plus touchées par le phénomène. Elle constitue également le préalable à l'élaboration éventuelle de Plans de Prévention des Risques naturels (PPR), en vue d'attirer l'attention des constructeurs et maîtres d'ouvrages sur la nécessité de respecter certaines règles constructives préventives dans les zones soumises à l'aléa retrait-gonflement, en fonction du niveau de celui-ci. Cet outil réglementaire devra insister sur l'importance d'une étude géotechnique à la parcelle comme préalable à toute construction nouvelle dans les secteurs concernés par les formations géologiques à aléa fort, moyen ou faible, notamment en raison de la forte hétérogénéité des formations du département. 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

<b>1. Introduction.....</b>	<b>9</b>
<b>2. Méthodologie .....</b>	<b>11</b>
2.1. FACTEURS INTERVENANT DANS LE RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES ...	11
2.1.1. Facteurs de prédisposition .....	12
2.1.2. Facteurs de déclenchement.....	15
2.2. MÉTHODOLOGIE .....	16
2.2.1. Cartographie des formations argileuses ou marneuses.....	16
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
<b>3. Présentation du département de Loire-Atlantique .....</b>	<b>21</b>
3.1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE .....	21
3.2. CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE .....	22
3.3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE.....	23
3.4. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE.....	25
3.5. CONTEXTE CLIMATIQUE .....	26
<b>4. Identification et cartographie des formations géologiques à dominante argilo-marneuse.....</b>	<b>29</b>
4.1. ORIGINE DES ARGILES DANS LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL .....	29
4.2. DOCUMENTS ET MÉTHODOLOGIE UTILISÉS .....	30
4.2.1. Méthode utilisée .....	30
4.2.2. Établissement de la carte des formations à composante argileuse .....	32
4.3. LITHOSTRATIGRAPHIE DES FORMATIONS A COMPOSANTE ARGILEUSE.....	36
4.3.1. Formations superficielles du Quaternaire.....	36

4.3.2. Formations tertiaires .....	38
4.3.3. Formations du Paléozoïque et du Protérozoïque .....	41
4.4. REMARQUES SUR LES FORMATIONS NON ARGILEUSES .....	47
4.5. ANALYSE DES DISCONTINUITES AVEC LE DEPARTEMENT DU MAINE-ET-LOIRE.....	48
<b>5. Caractérisations lithologique, minéralogique et géotechnique des formations retenues .....</b>	<b>51</b>
5.1. CRITÈRES DE HIÉRARCHISATION.....	51
5.1.1. Critères retenus .....	51
5.1.2. Méthode de classification .....	51
5.2. CRITÈRE LITHOLOGIQUE .....	52
5.2.1. Définition du critère lithologique et barème .....	52
5.2.2. Caractérisation lithologique .....	53
5.3. CRITÈRE MINÉRALOGIQUE .....	53
5.3.1. Définition du critère minéralogique et barème .....	53
5.3.2. Caractérisation minéralogique .....	54
5.4. CRITÈRE GÉOTECHNIQUE .....	62
5.4.1. Définition du critère géotechnique et barème .....	62
5.4.2. Teneur en eau (Wn).....	63
5.4.3. Indice de plasticité (I <sub>p</sub> ) .....	64
5.4.4. Essais au bleu de méthylène (VB).....	64
5.4.5. Retrait linéaire (RI).....	65
5.4.6. Caractérisation géotechnique .....	65
<b>6. Élaboration de la carte de susceptibilité .....</b>	<b>67</b>
6.1. DÉTERMINATION DU DEGRÉ DE SUSCEPTIBILITÉ .....	67
6.2. CARTE DE SUSCEPTIBILITÉ .....	68
6.3. SYNTHÈSE .....	69
<b>7. Analyse de la sinistralité.....</b>	<b>71</b>
7.1. PROCÉDURE DE DEMANDE DE RECONNAISSANCE DE L'ÉTAT DE CATASTROPHE NATURELLE .....	71
7.2. IDENTIFICATION DES COMMUNES SINISTRÉES .....	72
7.2.1. Localisation des communes sinistrées .....	72



7.2.2. Analyse des périodes de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle .....	73
7.3. RECENSEMENT DES SINISTRES.....	76
7.3.1. Collecte des données.....	76
7.3.2. Bilan .....	76
7.3.3. Cas particulier des communes reconnues catastrophe naturelle.....	78
7.4. FRÉQUENCE D'OCCURRENCE RAPPORTÉE A LA SURFACE URBANISÉE .....	78
7.4.1. Détermination de la densité d'urbanisation par formation .....	79
7.4.2. Détermination du critère densité de sinistres .....	80
<b>8. Carte d'aléa .....</b>	<b>83</b>
8.1. DÉTERMINATION DU NIVEAU D'ALÉA.....	83
8.2. CARTE D'ALÉA .....	85
<b>9. Conclusion .....</b>	<b>87</b>
<b>10. Bibliographie.....</b>	<b>89</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 – Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche.	11
Illustration 2 – Carte de présentation du département de Loire-Atlantique (BD Carto, IGN).....	21
Illustration 3 – Schéma géologique simplifié (échelle du millionième) de la Loire-Atlantique .....	24
Illustration 4 – Modèle conceptuel des profils d'altération des roches (Wyns et al., 2004) .....	25
Illustration 5 – Données météorologiques de Loire-Atlantique (source : Météo-France)	27
Illustration 6 – Influence de la nature de la roche mère (magmatique) sur la composition des minéraux secondaires (Velde, 1992).....	30
Illustration 7 – Assemblage des cartes géologiques 1/50 000 de la Loire-Atlantique ...	31
Illustration 8 – Indices de présence d'argile en zone de socle sur le département de Loire-Atlantique .....	33
Illustration 9 – Carte des formations argileuses et marneuses de la Loire-Atlantique...	35
Illustration 10 – Barème du critère lithologique .....	52
Illustration 11 – Tableau de caractérisation lithologique des formations géologiques de la Loire-Atlantique .....	53
Illustration 12 – Barème du critère minéralogique .....	54
Illustration 13 – Caractéristiques minéralogiques des formations argileuses de la Loire-Atlantique .....	61
Illustration 14 – Notes minéralogiques affectées aux formations argileuses de la Loire-Atlantique .....	62

Illustration 15 – Barème du critère géotechnique suivant l'indice de plasticité .....	64
Illustration 16 – Barème du critère géotechnique suivant la valeur de bleu.....	64
Illustration 17 – Barème du critère géotechnique suivant le retrait linéaire .....	65
Illustration 18 – Tableau synthétique des données géotechniques de la Loire-Atlantique (*Données issues du département voisin du Maine-et-Loire).....	66
Illustration 19 – Susceptibilité des formations argileuses retenues .....	67
Illustration 20 – Carte départementale de susceptibilité au retrait-gonflement des sols argileux .....	68
Illustration 21 – Arrêtés interministériels et occurrences.....	73
Illustration 22 – Etat des reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle sécheresse et nombre de sinistres recensés et localisés par commune.....	75
Illustration 23 – Répartition géologique des sinistres recensés et localisés .....	77
Illustration 24 – Zones urbanisées en Loire-Atlantique (source BD Topo IGN) .....	79
Illustration 25 – Taux d'urbanisation et nombre de sinistres par formation.....	80
Illustration 26 – Sinistralité (densité de sinistres par formation argileuse) .....	81
Illustration 27 – Niveau d'aléa des formations .....	84
Illustration 28 – Classement des formations en fonction de leur niveau d'aléa .....	85
Illustration 29 – Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement de la Loire-Atlantique	86

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

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

## Liste des annexes

- Annexe 1 – Rappels sur le mécanisme de retrait-gonflement des argiles
- Annexe 2 – Modalités d'interprétation minéralogique des données de sol  
(granulométrie, CEC, ...) mises à disposition par la Chambre d'Agriculture de la  
Loire-Atlantique
- Annexe 3 – Liste et coordonnées des organismes ayant fourni des données de  
sinistres et/ou géotechniques
- Annexe 4 – Résultats d'analyses spécifiques des échantillons prélevés dans le  
département de Loire-Atlantique
- Annexe 5 – Sinistres

# 1. Introduction

Les phénomènes de retrait-gonflement de certains sols argileux provoquent des tassements différentiels qui se manifestent par des désordres affectant principalement le bâti individuel. En France métropolitaine, ces phénomènes ont été mis en évidence à l'occasion de la sécheresse exceptionnelle de l'été 1976. Ils ont pris depuis une ampleur importante lors des périodes sèches des années 1989-91 et 1996-97 et, plus récemment, au cours des étés 2003 et 2005.

Selon des critères mécaniques, les variations de volume du sol ou des formations lithologiques affleurantes à sub-affleurantes sont dues, d'une part, à l'interaction eau – solide, aux échelles microscopiques et macroscopiques, et, d'autre part, à la modification de l'état de contrainte en présence d'eau. Ces variations peuvent s'exprimer soit par un gonflement (augmentation de volume), soit par un retrait (réduction de volume). Elles sont spécifiques de certains matériaux argileux, en particulier ceux appartenant au groupe des smectites (dont fait partie la montmorillonite).

Sous un climat tempéré, les argiles situées à faible profondeur sont souvent déconsolidées, humidifiées et ont partiellement épuisé leur potentiel de gonflement à l'état naturel. Mais elles sont dans un état éloigné de leur limite de retrait (teneur en eau à partir de laquelle toute diminution de cette teneur provoquera une fissuration du matériau argileux par dessiccation) et peuvent se rétracter si leur teneur en eau diminue de façon notable. Dans ce contexte, les sinistres surviennent donc surtout lorsqu'une période de sécheresse intense ou prolongée provoque l'apparition de pressions interstitielles négatives dans la tranche superficielle du sol, soumise à évapotranspiration, d'autant que les bâtiments de type maisons individuelles 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), plus de 7 700 communes françaises, réparties dans 90 départements, ont été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle à ce titre. A fin 2006, le coût des sinistres dus à la sécheresse, indemnisés en France depuis 1989 au titre du régime des catastrophes naturelles, a été évalué par la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) à environ 4,3 milliards d'euros, ce qui en fait la deuxième cause d'indemnisation, juste derrière les inondations.

La région des Pays de la Loire est concernée par ce phénomène. Dans le département de Loire-Atlantique notamment, les montants cumulés d'indemnisation dans le seul cadre du régime des catastrophes naturelles pour des sinistres de ce type ont été évalués à 2,5 millions d'euros par la CCR (données de septembre 2008, en coûts actualisés). Ce département, d'une superficie d'environ 6 910 km<sup>2</sup>, compte un peu plus de 1,2 millions d'habitants (chiffres INSEE, 2005). A la date du 30 octobre 2008, 36 des 221 communes y ont été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle sécheresse, pour des périodes allant de mai 1989 à septembre 2005, soit un taux de sinistralité de 16 %.

Afin d'établir un constat scientifique objectif à l'échelle de tout le département et de disposer de documents de référence permettant une information préventive, le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT) a souhaité réaliser une carte de l'aléa retrait-gonflement afin 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 éventuel 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 Aménagement et Risques Naturels du BRGM. Le financement en a été assuré à hauteur de 25 % par la dotation de service public du BRGM, le complément ayant été pris en charge par le Fonds national de prévention des risques naturels majeurs, dans le cadre d'une convention de cofinancement signée avec la Préfecture de la Loire-Atlantique.

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

## 2. Méthodologie

### 2.1. FACTEURS INTERVENANT DANS LE RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES

Les phénomènes de retrait-gonflement sont dus pour l'essentiel à des variations de volume de sols argileux 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.

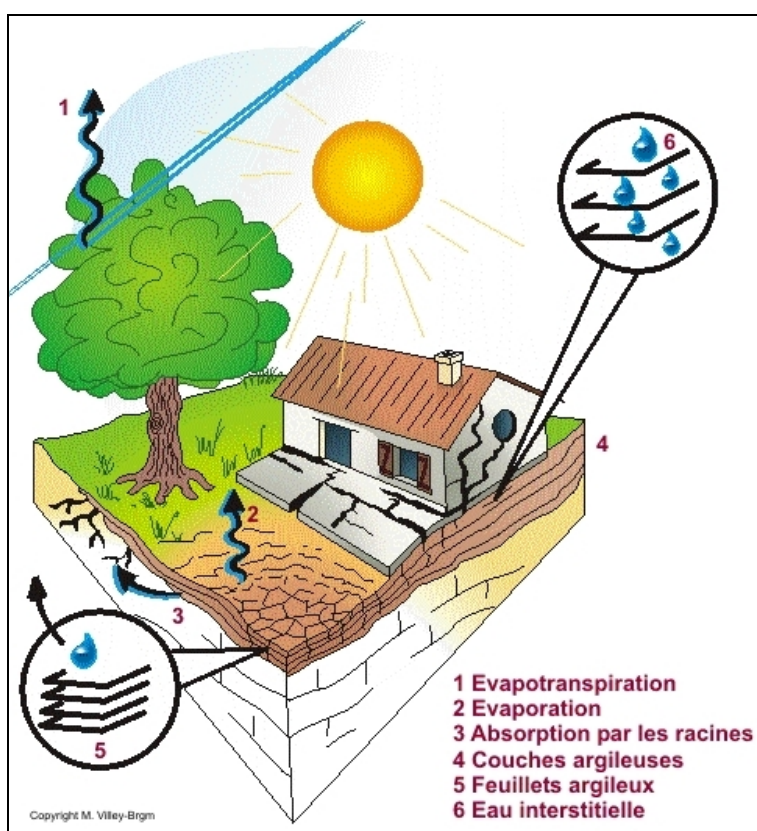


Illustration 1 – Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche

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**

### ***2.1.1.1. Nature du sol***

La nature du sol constitue un facteur de prédisposition prédominant dans le mécanisme de retrait-gonflement : seules les formations géologiques présentant des minéraux argileux sont sujettes au phénomène et leur susceptibilité dépend de leur lithologie, de leur géométrie, de leur minéralogie et de leur comportement géotechnique.

La procédure d'étude de la nature du sol, basée sur l'exploitation des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000 éditées par le BRGM, comporte un inventaire des formations affleurantes à sub-affleurantes, à composante argilo-marneuse, puis leur cartographie.

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

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

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

En moindre proportion mais non négligeable, la géométrie de la formation argileuse influe sur la susceptibilité au retrait-gonflement. Les effets du phénomène seront d'autant plus importants que la formation sera en position superficielle et que les niveaux argileux en son sein seront épais et continus. Une alternance de niveaux argileux et de lits plus perméables (sableux, par exemple), sièges de circulations d'eau temporaires, constitue également une configuration défavorable, car à l'origine de fréquentes variations de teneur en eau dans les parties argileuses.

Un facteur prépondérant qui détermine le degré de susceptibilité d'une formation argileuse au phénomène de retrait-gonflement, est sa composition minéralogique. Une formation sera d'autant plus susceptible au phénomène que sa fraction argileuse (au sens granulométrique) contiendra une forte proportion de minéraux argileux dits "gonflants". En effet, certains minéraux argileux présentent, par rapport à d'autres, une aptitude nettement supérieure vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Il s'agit essentiellement des smectites (dont font partie les montmorillonites), de certains minéraux argileux interstratifiés, de la vermiculite et de certaines chlorites.

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

### **2.1.1.2. 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.

### **2.1.1.3. 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

penne exposé au sud sera plus sensible à l'évaporation du fait de l'ensoleillement, qu'un terrain plat ou exposé différemment. En outre, les formations argileuses et marneuses qui affleurent sur le flanc des vallées peuvent occasionner, localement, un fluage lent du versant et la formation de loupes argileuses. Ce phénomène vient s'ajouter aux désordres consécutifs à la seule dessiccation du sol.

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

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

#### **2.1.1.4. Végétation**

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

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

Ainsi, on considère qu'un peuplier ou un saule adulte peut 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.

#### **2.1.1.5. Défauts de construction**

Ce facteur de prédisposition, dont l'existence peut être révélée à l'occasion d'une sécheresse exceptionnelle, se traduit par la survenance ou l'aggravation des désordres. L'importance de ce facteur avait déjà été mise en évidence par les études



menées en 1990 par l'Agence Qualité Construction et en 1991 par le CEBTP, lesquelles montraient que la plupart des sinistres concernaient des maisons individuelles dépourvues de chaînage horizontal et fondées sur semelles continues peu ou non armées et peu profondes (de 40 à 80 cm).

L'examen de dossiers d'expertises réalisées dans le département de Loire-Atlantique 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.

## **2.1.2. Facteurs de déclenchement**

### **2.1.2.1. 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.

### **2.1.2.2. Facteurs anthropiques**

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

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

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

## **2.2. MÉTHODOLOGIE**

La méthodologie de cartographie de l'aléa développée par le BRGM a été mise au point à partir d'études similaires menées d'abord dans le département des Alpes de Haute-Provence (Chassagneux *et al.*, 1995 ; Chassagneux *et al.*, 1996) et des Deux-Sèvres (Vincent *et al.*, 1998), puis dans l'Essonne (Prian *et al.*, 2000) et en Seine-Saint-Denis (Donsimoni *et al.*, 2001). Elle a été validée par le ministère en charge de l'environnement et est désormais appliquée dans le cadre d'un programme qui concernera à terme l'ensemble du territoire métropolitain (Vincent *et al.*, 2008).

### **2.2.1. Cartographie des formations argileuses ou marneuses**

Dans une première étape, les cartes géologiques éditées par le BRGM à l'échelle 1/50 000 et couvrant le département ont fait l'objet d'un travail d'harmonisation, afin d'en déduire une carte géologique départementale harmonisée (Béchenec, 2007). Ce document a servi de point de départ pour la cartographie des formations argileuses et marneuses du département qui intègre également certaines données ponctuelles issues de coupes de forage de la Banque des données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM, ou provenant de rapports d'expertise de sinistres.

Pour cela, toutes les formations argileuses ou marneuses du département, y compris les formations superficielles d'extension locale, ont été inventoriées puis cartographiées. Des regroupements ont été réalisés dans une seconde étape, en considérant que des natures lithologiques voisines laissent supposer des comportements semblables vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Cela a permis d'aboutir à la carte départementale synthétique des formations argileuses au

sens large. Cette cartographie a été réalisée à l'échelle 1/50 000 (qui correspond donc à l'échelle de validité de la donnée brute), numérisée, puis synthétisée et présentée hors-texte à l'échelle 1/125 000.

### **2.2.2. Caractérisation lithologique, minéralogique et géotechnique des formations**

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

L'analyse des notices des cartes géologiques, complétée par une revue bibliographique et des prélèvements sur le terrain, a permis de définir les caractéristiques minéralogiques des formations retenues, et en particulier de répertorier la présence et la proportion des minéraux gonflants (smectites, interstratifiés...) dans la fraction argileuse.

La caractérisation du comportement géotechnique des formations argileuses du département a été essentiellement établie sur la base du dépouillement et de la synthèse des très nombreuses études d'avant projets routiers collectés auprès de la Direction Départementale de l'Équipement (DDE), du Conseil Général et des sociétés d'autoroute (Cofiroute). D'autres études ont également été collectées auprès du Centre d'Études Techniques de l'Équipement, de bureaux d'études géotechniques (dont principalement Uretek, Fondasol, Coulais consultant, Arcadis), et de l'ensemble des communes du département. Enfin des rapports d'expertise de sinistres réalisés par différents bureaux d'études ont été collectés auprès de ces derniers, de certaines mutuelles d'assurance (MAIF, MAAF, Matmut), des communes et de la Préfecture.

Pour des formations géologiques qui s'étendent au delà du département et pour lesquelles les données sont rares, nous avons repris les caractéristiques recueillies dans le cadre de l'étude du département voisin du Maine-et-Loire.

### **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 sécheresse a été effectué par consultation des dossiers conservés par la Caisse Centrale de Réassurance et certaines mutuelles d'assurance (trois d'entre elles ont été consultées pour cela mais seule la MAIF a pu effectivement fournir quelques éléments). Les dossiers de plusieurs bureaux d'études ont aussi été consultés et exploités, ainsi que les dossiers archivés en préfecture.

Ces données ont été complétées par la consultation de l'ensemble des 221 communes du département par l'intermédiaire d'un questionnaire d'enquête. Rappelons que 36 de ces communes ont été, à ce jour, concernées par au moins un arrêté de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle au titre des mouvements de terrains différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols, pour des périodes comprises entre mai 1989 et septembre 2005.

Après élimination des doublons (sinistres récurrents sur un même site ou données identiques issues de sources différentes), ce sont 344 sinistres qui ont été recensés, dont 343 ont été effectivement localisés avec un niveau suffisant de précision sur les cartes topographiques de l'IGN à l'échelle 1/25 000. Ils sont répartis dans 72 communes et l'échantillon peut donc être considéré comme représentatif de l'occurrence spatiale du phénomène dans le département de Loire-Atlantique.

## **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 le taux d'urbanisation de chacune des formations géologiques. Ce taux a été calculé en exploitant la couche « bâti » de la BD Topo de l'IGN, mise à disposition du BRGM par la DDE, dans le cadre spécifique de la présente étude.

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

## **2.2.7. Carte d'aléa**

La carte départementale d'aléa a été établie à partir des contours de la carte de synthèse des formations argileuses ou marneuses : le niveau d'aléa vis à vis du phénomène de retrait-gonflement a été défini en croisant, pour chaque formation, la note de susceptibilité et la densité de sinistres ramenée à 100 km<sup>2</sup> 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 Loire-Atlantique

#### 3.1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE

Le département de Loire-Atlantique fait partie des cinq départements qui constituent les Pays de la Loire avec le Maine-et-Loire (49), la Mayenne (53), la Sarthe (72) et la Vendée (85). Il se trouve à l'ouest de la région, sur la côte atlantique française, juste au sud de la péninsule bretonne.

D'une superficie de 6 910 km<sup>2</sup>, il regroupe 221 communes réparties en 59 cantons (Illustration 2). Ses principales villes sont Nantes (préfecture), ainsi que Ancenis, Châteaubriant et Saint-Nazaire (sous-préfectures). En 2005, la population totale de la Loire-Atlantique a été évaluée à 1 209 000 habitants (données INSEE, 2005), ce qui plaçait le département en 13<sup>ème</sup> position parmi les départements français les plus peuplés (le 7<sup>ème</sup> en dehors de l'Île-de-France).

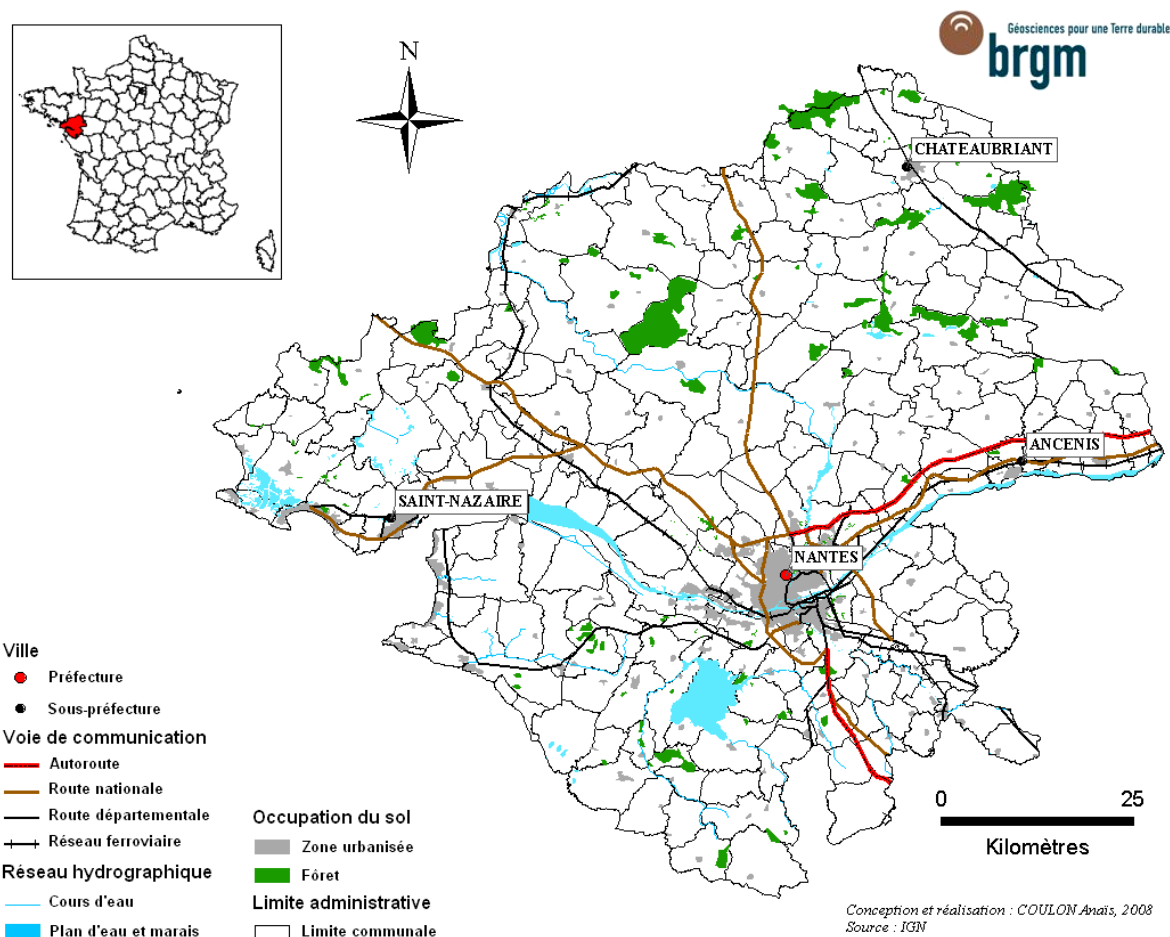


Illustration 2 – Carte de présentation du département de Loire-Atlantique (BD Carto, IGN)

La densité moyenne du département est de 177 habitants/km<sup>2</sup> (INSEE, 2005), mais cette valeur masque des disparités importantes. Les agglomérations de Nantes et de Saint-Nazaire concentrent à elles seules 70 % de la population de Loire-Atlantique. De fait, les trois-quarts des habitants du département résident le long de la Loire (principalement sur la rive droite), depuis Ancenis jusqu'à l'estuaire. La population de Loire-Atlantique, essentiellement urbaine, est répartie entre les villes de Nantes, Saint-Nazaire, Ancenis et Châteaubriant.

Le réseau routier du département est dense, avec des axes très fréquentés, qui se répartissent en étoile autour de Nantes.

L'agriculture de la Loire-Atlantique est basée sur l'élevage (bovin et porcin), associée à une modeste production de maïs et de blé. De plus, on trouve une agriculture maraîchère et des vergers dans la vallée de la Loire. Au nord de celle-ci, s'étend le bocage angevin, et au sud, le vignoble nantais, ainsi que le bocage vendéen.

Le taux de boisement du département est faible, de l'ordre de 10 % et il se concentre principalement sur le littoral.

Le relief du département est constitué d'un ensemble de plateaux et de collines, s'élevant à 100 m d'altitude en moyenne. Ces plateaux sont creusés par les vallées de la Loire et de l'Erdre, ainsi que leurs nombreux affluents. Au nord de la Loire, le sillon de Bretagne constitue le relief le plus marqué du département. Le point culminant (environ 115 m NGF) se situe plus à l'est dans la région de Châteaubriant (colline de la Bretèche). Au sud de la Loire, à l'est du lac de Grand-Lieu, débutent les collines des Mauges aux vallées relativement encaissées.

La cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles a déjà été réalisée dans le département limitrophe du Maine-et-Loire (Le Guern et Notturmo, 2005). Certaines des données récupérées durant cette étude ont permis de compléter les données de base pour la cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles de la Loire-Atlantique. Enfin, le programme est en cours dans les autres départements voisins de la Vendée, l'Ille-et-Vilaine et le Morbihan.

### **3.2. CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE**

Largement ouvert sur l'océan (133 km de façade maritime) et traversé sur 110 km d'est en ouest par la Loire vers laquelle affluent rivières (Sèvre et Erdre principalement, avec la ville de Nantes à leur confluence) et ruisseaux, parsemé de lacs (Grand-lieu), d'étangs ou encore de marais (Grande Brière), le département de Loire-Atlantique est fortement marqué par la présence de l'eau. Les zones humides occupent 700 km<sup>2</sup> du département, ce qui le classe au 2<sup>ème</sup> rang au niveau national. Sur les hauteurs, le réseau de ruisseaux et rivières est très dense et constitue la trame qui façonne tout le paysage rural.

- **La Loire, 110 km en Loire-Atlantique**

La Loire est un fleuve long de 1 020 kilomètres, ce qui en fait le plus long de France. Elle prend sa source en Ardèche, au Mont Gerbier de Jonc et se jette dans l'océan Atlantique à travers un estuaire, au niveau de Saint-Nazaire.



La Loire creuse une vallée dans les plateaux et les collines du Massif Armoricaïn. Ce paysage prend le nom de Val de Loire.

- **L'Erdre, 75 km en Loire-Atlantique**

L'Erdre, qui prend sa source à La Pouëze (étang du Clairêt), à une vingtaine de kilomètres au nord-ouest d'Angers dans le Maine-et-Loire, est un affluent de la Loire, dans laquelle elle se jette à Nantes.

- **La Sèvre nantaise, 74 km en Loire-Atlantique**

La Sèvre nantaise prend sa source à 215 m d'altitude sur le plateau de Gâtine, à l'Archerie sur la commune de Le Beugnon dans les Deux-Sèvres. Elle traverse ensuite les départements de la Vendée, de Maine-et-Loire et de la Loire-Atlantique selon une direction Nord-ouest, avant de se jeter dans la Loire à Nantes.

- **L'Acheneau, 40 km en Loire-Atlantique.**

L'Acheneau prend sa source dans le Lac de Grand-Lieu. Il traverse notamment les communes de Port-Saint-Père et de Rouans, puis se jette dans la Loire au nord de Rouans. Ce cours d'eau possède un dénivelé tellement faible (40 cm de bout en bout), que son cours peut s'inverser lors de fortes marées. Pour que ce problème ne se répercute pas sur le lac de Grand-Lieu, une écluse a été construite sur la rivière, afin de réguler son débit.

- **La Vilaine, 30 km en Loire-Atlantique**

Venant de l'Ille-et-Vilaine et servant de frontière naturelle entre ce département et la Loire-Atlantique, la Vilaine prend sa source en Mayenne.

- **Les zones humides**

La Loire-Atlantique est marquée par de nombreux marais, comme la Brière au nord de Saint-Nazaire ou les marais de Couëron en aval de Nantes. De manière générale, ce département est riche en zones humides.

Au sud de Nantes, le lac de Grand-lieu est l'un des plus grands lacs de France. Sa très faible profondeur (moins de 2 m) combinée à un fond en pente extrêmement faible rend sa superficie très variable (entre 35 et 65 km<sup>2</sup>).

Au nord de la Loire, au cœur de la presqu'île de Guérande, le marais de la Brière occupe une superficie de 470 km<sup>2</sup>.

### **3.3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE**

Le département de la Loire-Atlantique appartient au Massif Armoricaïn, tronçon affleurant de la chaîne varisque érigée au cours de l'ère primaire, qui, érodée, forme l'ossature principale de l'Europe occidentale. Sur ce socle ancien essentiellement cristallin et métamorphique repose d'une part, très localement, une couverture sédimentaire d'âge tertiaire et d'autre part une pellicule de formations superficielles d'âge quaternaire (Illustration 3).

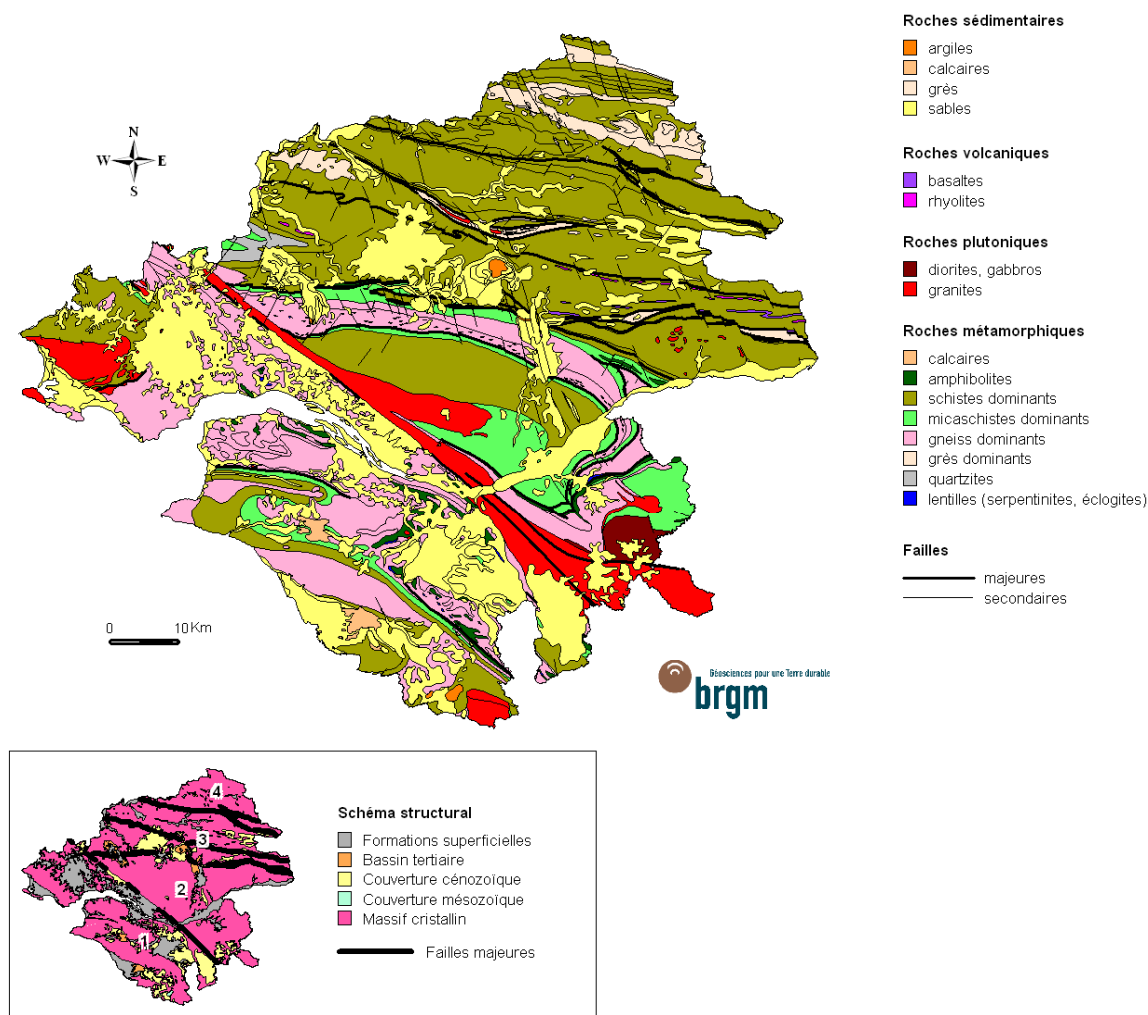


Illustration 3 – Schéma géologique simplifié (échelle du millionième) de la Loire-Atlantique

Le socle, du fait de son histoire longue et complexe, est organisé en quatre ensembles lithostructuraux, les domaines, séparés par des accidents régionaux d'importance cruciale, qui du Sud au Nord sont :

- Le domaine varisque sud-armoricain **(1)**
- Le domaine varisque nantais **(2)**
- Le domaine varisque ligéro-sénan **(3)**
- Le domaine varisque de Bretagne centrale **(4)**

Chaque domaine est lui-même constitué de plusieurs unités séparées par des contacts tectoniques et chacune de ces dernières comprend plusieurs formations. Globalement, l'importance du plutonisme (granites) et le degré du métamorphisme (micaschistes, gneiss) est nettement plus important dans les domaines 1 et 2, alors que les domaines 3 et 4 sont principalement composés de roches sédimentaires peu ou pas métamorphisées (schistes, grès, siltites, argilites).

La couverture sédimentaire bien que comportant très localement des reliques de sédiments d'âge crétacé supérieur est essentiellement composée de formations d'âge tertiaire. Ces dernières sont constituées principalement :

- soit de calcaires gréseux et accessoirement de marnes et d'argiles, localisées dans de petits bassins d'effondrement bien délimités (Machecoul, Arthon-en-Retz, Campbon et Saffré) ;
- soit de sables plus ou moins argileux. L'aire d'extension de ces formations tertiaires sableuses est nettement plus vaste. Elles se rencontrent sous forme de grandes nappes (région du Lac de Grandlieu ou région de Saint-Mars-la-Jaille) ou sont associées, comme les calcaires gréseux, à de petits bassins d'effondrement (Nort-sur-Erdre, Carquefou).

Les formations superficielles plio-quaternaires sont composées d'une part d'alluvions fluviales (sables, graviers, limons, argiles) et d'alluvions fluvio-marines (vases) et d'autre part, de placages plus ou moins argileux correspondant en partie à des altérites, plus ou moins remaniées, des roches sous-jacentes.

### 3.4. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Comme évoqué au chapitre précédent, le département de Loire-Atlantique repose principalement sur un socle, le Massif Armoricain. Composé à l'origine de roches compactes, le socle a subi postérieurement à sa formation, des altérations et une fracturation importante d'origine tectonique. Ces modifications au cours des temps géologiques y 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 de pluie, 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 à 60 mètres (Illustration 4).

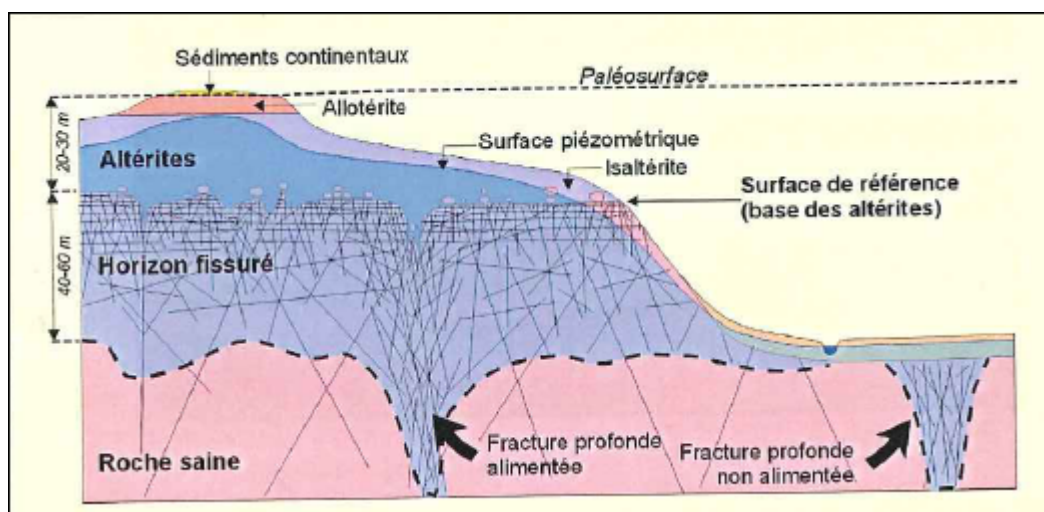


Illustration 4 – Modèle conceptuel des profils d'altération des roches (Wyns et al., 2004)

En outre, des bassins sédimentaires tertiaires reposent sur le Massif Armoricaïn. Ils renferment des aquifères directement alimentés par l'infiltration des eaux de ruissellement et de précipitation. C'est le cas notamment des recouvrements de Campbon et Saffré.

Enfin, le département est riche en *nappes alluviales*. Ces aquifères sont contenus dans les alluvions datant du Plio-Quaternaire. Leur alimentation est assurée par les rivières adjacentes, telles que la Loire, l'Erdre ou la Vilaine.

La capacité de production d'eau potable de ces aquifères sédimentaires et alluviaux est importante. Ils sont cependant pour la plupart vulnérables aux pollutions.

### **3.5. CONTEXTE CLIMATIQUE**

Avec sa façade océanique orientée vers l'Ouest et un relief peu accentué, le climat de la Loire-Atlantique est de type tempéré océanique et change peu d'un endroit à l'autre du département.

D'après les données de Météo-France (Illustration 5), le climat du département est caractérisé par des températures qui restent douces pendant la majeure partie de l'année avec en moyenne mensuelle 5°C en hiver et des étés relativement frais avec 18 °C en moyenne.

Les variations de températures apparaissent relativement faibles, sauf en périodes anormales, comme les hivers rigoureux de 1985 et 1986, la sécheresse de 1976, et plus récemment, celles de 1996 et 2003. Les températures maximales moyennes annuelles, voisines de 16°C, restent homogènes. Les températures maximales sont moins élevées le long du littoral, et augmentent vers l'intérieur des terres. Quant aux températures minimales moyennes annuelles, elles sont plus contrastées : de 9 à 10°C le long des côtes, elles décroissent vers l'intérieur des terres, pour atteindre 6 à 7°C, en particulier dans le nord-est, comme la région de Châteaubriant.

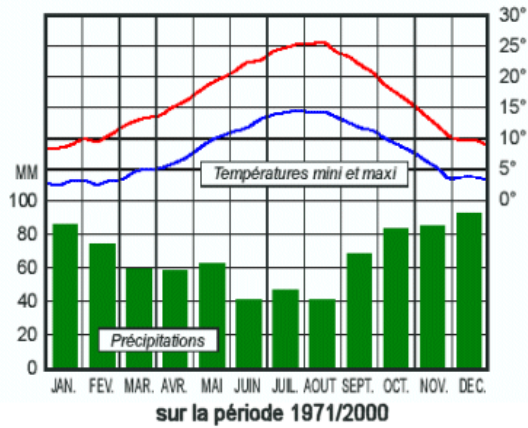
Les précipitations sont fréquentes (surtout en hiver et au printemps) mais rarement violentes ; le chiffre moyen de 820 mm de pluie par an masque par ailleurs une irrégularité des précipitations d'une année sur l'autre. Elles peuvent ainsi passer du simple au double d'une année sur l'autre (1087 mm à Nantes en 1999 par exemple). La zone littorale du Sud Loire jusqu'à la Grande Brière et la zone plus à l'est comprise entre les vallées de la Loire et de l'Erdre sont relativement sèches (autour de 700 mm de cumul moyen annuel de précipitation). A l'opposé, le sillon de Bretagne et la zone au sud située entre le lac de Grand Lieu et le bocage vendéen constituent les lieux les plus arrosés (autour de 850 mm).

L'ensoleillement moyen sur la Loire-Atlantique est de 2000 heures par an. Les régimes des vents sont fonction de la nature du climat, océanique pour le département. Les vents dominants soufflent du sud-ouest, apportant des perturbations océaniques. Le département connaît en moyenne 22 orages par an. La grêle y est de fréquence modéré. En outre on compte 40 jours de brouillard par an.

## LE CLIMAT DE LA LOIRE-ATLANTIQUE



### Normales de températures et de précipitations à Bouguenais



### Quelques records depuis 1945 à Bouguenais

Température la plus basse	-15,6 °C
Jour le plus froid	15/02/1956
Année la plus froide	1963
Température la plus élevée	40,3 °C
Jour le plus chaud	12/07/1949
Année la plus chaude	1989
Hauteur maximale de pluie en 24h	94,9 mm
Jour le plus pluvieux	07/07/1977
Année la plus sèche	1953
Année la plus pluvieuse	1999



Illustration 5 – Données météorologiques de Loire-Atlantique (source : Météo-France)



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

### 4.1. ORIGINE DES ARGILES DANS LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL

Avant de présenter la méthodologie d'élaboration et la carte des formations argileuses et marneuses, il apparaît indispensable d'évoquer l'origine des argiles et dans ce cadre l'altération du socle.

L'ensemble du Massif Armoricain a subi des phénomènes importants d'altération, avec des épisodes particulièrement marqués au Crétacé inférieur et à l'Éocène inférieur et moyen qui ont contribué à la création d'altérites meubles sur 20 à 30 m d'épaisseur (Lachassagne *et al.*, 2001 ; Wyns *et al.*, 2004 ; Lachassagne et Wyns, 2005).

Les marques de cette altération importante se retrouvent notamment au nord du département avec des restes de profils latéritiques surmontés par des cuirasses ferrugineuses, certaines ayant même fait l'objet d'exploitation minière. La carte géologique de Saint-Mars-la-Jaille (421) indique également une importante altération de l'ensemble des roches, particulièrement marquée à l'ouest de la carte. Dans le Sud-Ouest du département, les produits d'altération apparaissent mélangés avec des dépôts éoliens (limons, sables).

Ces produits d'altération peuvent présenter des quantités importantes d'argile. Une partie des argiles provient ainsi de la transformation de minéraux comme les micas, les feldspaths, les pyroxènes et les amphiboles. La composition des argiles rencontrées dans les altérites dépend du climat, de la nature de la roche mère, de la topographie et du temps (Weaver, 1989 ; Velde, 1992 ; Thorez, 1989 ; Chamley, 1989). Les principaux minéraux argileux rencontrés sont ainsi l'illite, la kaolinite, les vermiculites et les smectites (Illustration 6).

En fonction des processus d'altération, mais aussi de l'érosion ultérieure qui a pu décaper une partie plus ou moins importante des altérites, peuvent affleurer en surface soit des altérites argileuses, soit des altérites sableuses, soit des roches altérées mais non décomposées, soit des roches dures. Les produits d'altération décapés se retrouvent notamment dans les bassins sédimentaires. Dans ces derniers, les argiles peuvent provenir en outre de phénomènes de précipitation (minéraux néoformés) à partir de solutions enrichies lors des processus de dissolution des roches et de transport.

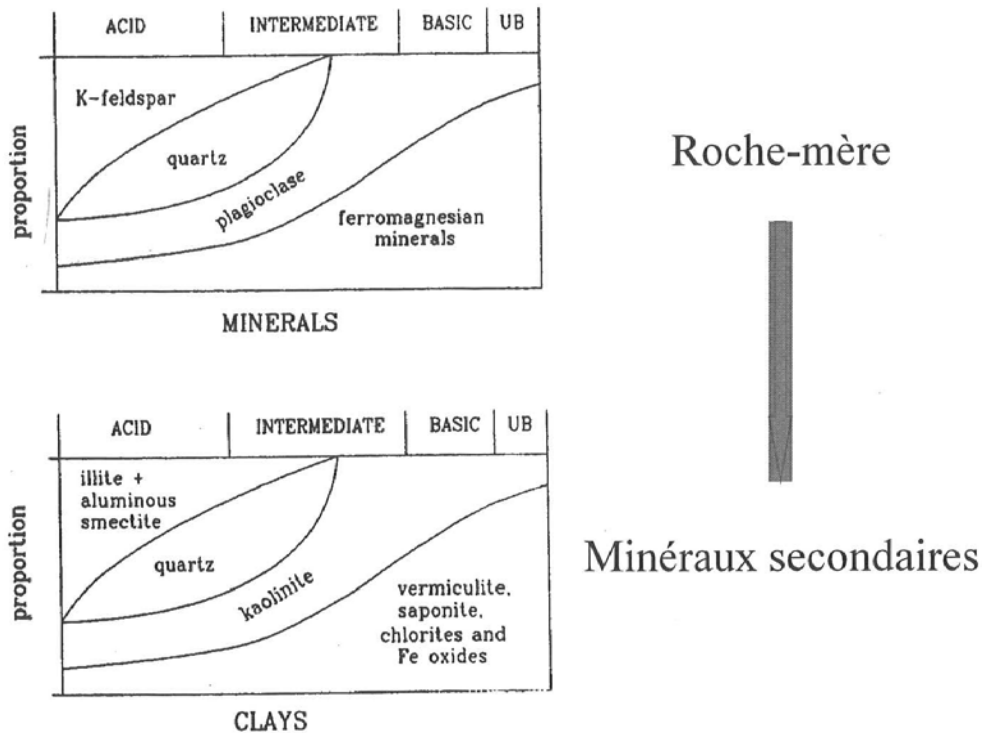


Illustration 6 – Influence de la nature de la roche mère (magmatique) sur la composition des minéraux secondaires (Velde, 1992)

## 4.2. DOCUMENTS ET MÉTHODOLOGIE UTILISÉS

### 4.2.1. Méthode utilisée

L'objectif est de disposer d'une carte des formations géologiques à dominante argilo-marneuse du département de Loire-Atlantique, afin d'identifier les zones sensibles au retrait-gonflement.

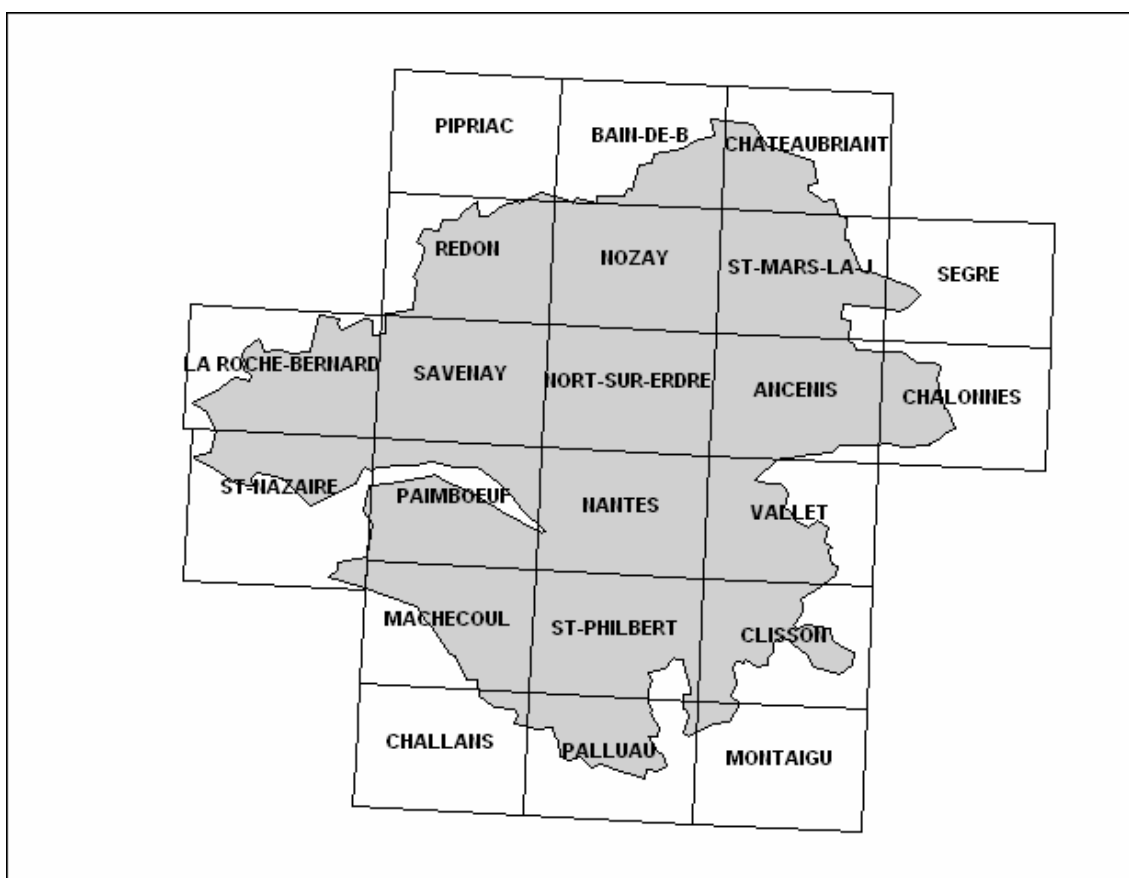
La première étape a consisté à cartographier les formations argilo-marneuses du département, y compris les formations superficielles d'extension locale, pour en dresser un inventaire et synthétiser les différentes cartes géologiques prises en compte. Des regroupements ont été réalisés dans une seconde étape, en considérant que des natures lithologiques voisines laissaient supposer des comportements semblables vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Cela a permis d'aboutir à la carte départementale synthétique des formations argileuses au sens large.

Les données utilisées pour mener à bien cette cartographie sont principalement la carte départementale géologique harmonisée (Béchenec, 2007) et les cartes géologiques du BRGM à l'échelle 1/50 000. La majorité des cartes géologiques au 1/50 000 couvrant le département de Loire-Atlantique ont été réalisées entre les années 1970 et 1985. Certaines sont toutefois plus récentes, en particulier dans le Nord où elles ont été éditées dans les années 1989-1995 et dans le Sud où la carte de



Palluau est en cours d'édition. Ces différentes cartes ne répondent pas aux mêmes objectifs cartographiques. Les formations superficielles, de grande importance pour cette présente étude, ont été davantage prises en compte dans les périodes très récentes, les travaux anciens étant en général davantage axés sur la représentation du substratum.

L'assemblage (illustration 7) des cartes géologiques comporte tout ou partie des 22 coupures suivantes (dont les références complètes figurent en bibliographie) : Pipriac (387), Bain-de-Bretagne (388), Châteaubriant (389), Redon (419), Nozay (420), St-Mars-la-Jaille (421), Segré (422), La Roche-Bernard (449), Savenay (450), Nort-sur-Erdre (451), Ancenis (452), Chalonnnes-sur-Loire (453), St-Nazaire (479), Paimboeuf (480), Nantes (481), Vallet (482), Ile-de-Noirmoutier (506), Machecoul (507), St-Philbert-de-Grand-Lieu (508), Clisson (509), Challans (534) et Palluau (535).



*Illustration 7 – Assemblage des cartes géologiques 1/50 000 de la Loire-Atlantique*

La représentation partielle et très variable d'une feuille à l'autre des altérites a représenté une difficulté majeure pour établir la carte des formations argileuses. La consultation de la Banque des données du Sous-Sol (BSS) du Service Géologique Régional a permis d'affiner la cartographie des altérites par endroit, mais pour une large partie du département, une cartographie spécifique des altérites aurait été nécessaire, afin de préciser l'extension des couvertures d'altérites argileuses. Un tel travail dépassait cependant largement le cadre de la présente étude.

L'analyse des publications scientifiques portant sur les formations géologiques du département a aussi permis d'améliorer la connaissance de l'extension, de la lithologie et de la minéralogie des formations. La cartographie des altérites sur l'agglomération nantaise, les observations et prélèvements de terrain effectués par la Chambre d'Agriculture dans le cadre du levé de la carte pédologique au 1/100 000 (programme IGCS : Inventaire, Gestion et Conservation des Sols), les indices kaolin issus de la prospection de matériaux dans les années 1980, ainsi que les descriptions lithologiques issues des dossiers d'études géotechnique collectés pour la caractérisation des formations argileuses et marneuses ont ainsi été exploités en complément de la carte géologique harmonisée et des données de la BSS. Quelques observations de terrain ont également été exploitées en complément.

La carte des formations argileuses et marneuses, établie en homogénéisant et raccordant entre elles les 22 coupures géologiques à l'échelle 1/50 000, prend ainsi en compte les formations argileuses et marneuses ainsi que toute formation pouvant renfermer des intercalations ou des lentilles argileuses ou marneuses. Elle servira de support à l'élaboration de la carte finale de l'aléa retrait-gonflement.

#### **4.2.2. Établissement de la carte des formations à composante argileuse**

L'illustration 8 présente l'exploitation cartographique des données utilisées en complément de la carte géologique harmonisée. L'analyse des épaisseurs d'argile dans les formations de socle et l'indication des roches affleurantes montre ainsi l'importance de la présence d'argile sur le département. Dans le nord du département, moins urbanisé, la faible densité d'indicateurs d'argile est en fait liée au manque de données disponibles (tant en BSS que dans les dossiers d'études géotechniques qui ont pu être recueillis).

En outre, la cartographie des altérites, même quand elle existe, n'apparaît que partielle. C'est le cas par exemple sur l'agglomération nantaise, où les contours des formations retenues comme argileuses ont été modifiés sensiblement, suite à la prise en compte des résultats d'une étude récente axée sur l'extension des altérites de socle sur ce secteur (Wuilleumier et al, 2009).

Là où la cartographie des altérites semblait cohérente avec les données exploitées, les roches supposées non altérées n'ont pas été prises en compte comme formations argileuses. Ces parties supposées non altérées peuvent néanmoins présenter localement des poches d'altérites non cartographiées. Les formations sans cartographie d'altérite, mais présentant manifestement des épaisseurs importantes d'argile au vu des données disponibles, ont été intégrées dans leur ensemble.

Pour les formations présentant peu de données exploitables, une analogie a été faite avec les autres formations de même nature. Enfin, certaines formations ont été considérées *a priori* comme non argileuses, supposant que leurs altérites seraient plutôt sableuses (ou décapées). Ces formations peuvent présenter néanmoins des poches d'argiles non cartographiées plus ou moins étendues. Certaines poches d'argiles ont été ajoutées lorsque les données complémentaires exploitées indiquent la présence significative d'argile.

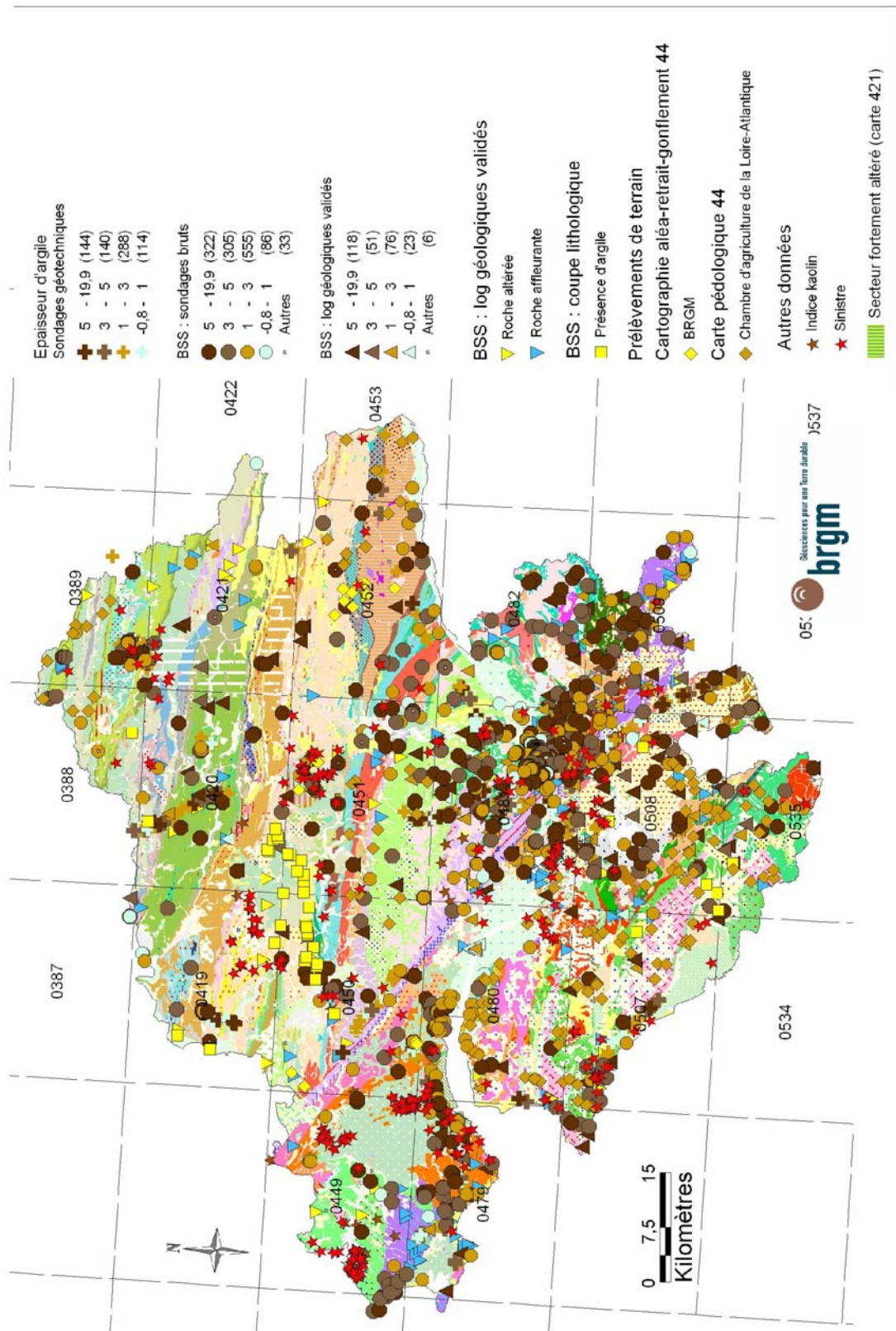


Illustration 8 – Indices de présence d'argile en zone de socle sur le département de Loire-Atlantique

Par ailleurs, les données de sondage recueillies dans le département de Loire-Atlantique ont conduit à corriger localement certains contours de la carte géologique harmonisée du département.

Il reste néanmoins sur cette carte de nombreuses incertitudes. La carte ainsi établie apparaît comme une première proposition, qui reflète l'état actuel des connaissances mais qui pourrait être significativement précisée à l'issue d'un travail systématique de caractérisation et de cartographie des altérites, mené de manière homogène sur l'ensemble du département.

La carte ainsi établie, comprend une seule formation où les argiles ou marnes constituent la majeure partie de la formation retenue. Il s'agit des *Argiles d'âge éocène à pliocène* (epA), qui présentent un faciès argilo-marneux sur l'essentiel de leur épaisseur. Le reste des formations géologiques argileuses ou marneuses du département de Loire-Atlantique sont hétérogènes ; il s'agit :

- soit de formations intrinsèquement hétérogènes (*Alluvions* par exemple), qui sont constituées d'un mélange de différents matériaux dont des argiles ou des marnes, mais également des éléments plus grossiers (limons, sables, graves...). L'argile est soit mélangée avec les autres constituants, soit présente sous forme de niveaux individualisés, séparés les uns des autres par des lits intercalaires non argileux, répartis selon une séquence complexe et qui peut présenter des variations spatiales. Dans ces conditions, il n'est pas possible, à l'échelle départementale, de distinguer précisément les zones contenant de l'argile de celles où elle est totalement absente, et l'ensemble de ces formations, par nature hétérogènes, a été considéré comme argileux ;
- soit de formations à la base très peu ou pas argileuses (formations de socle : *micaschistes, schistes, granite, gneiss, grès, gabbro, amphibolites, péridotites...*), mais qui, du fait de leur altération, présentent en de nombreux secteurs des faciès argileux, notamment dans les premiers mètres de sol. Lorsque 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.

L'hétérogénéité de ces formations est bien sûr prise en considération lors de la caractérisation de leur susceptibilité vis-à-vis du retrait-gonflement, notamment au travers de la note lithologique.

La carte des formations argileuses de la Loire-Atlantique ici présentée (

Illustration 9) constitue finalement une représentation interprétée des zones sujettes 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.

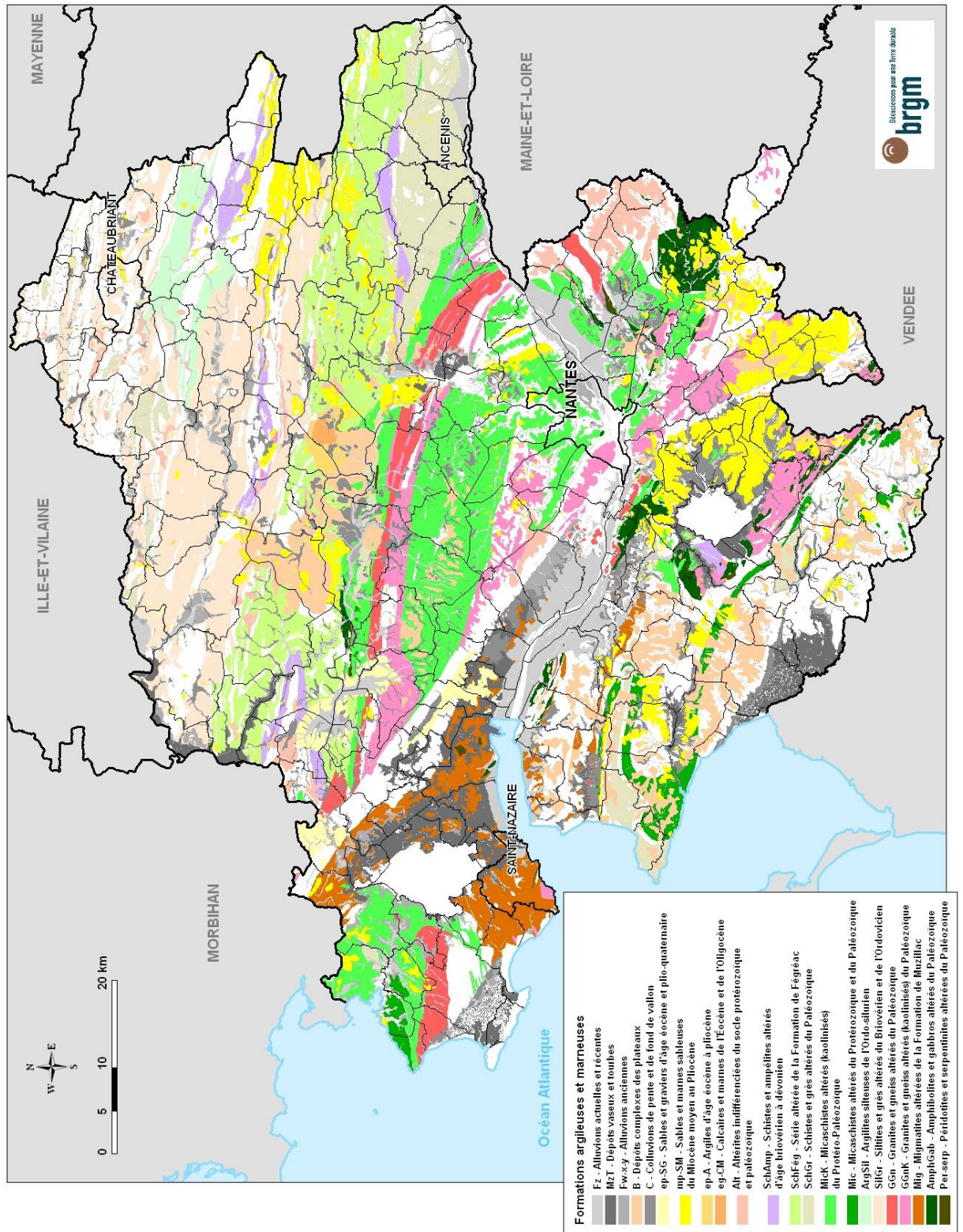


Illustration 9 – Carte des formations argileuses et marneuses de la Loire-Atlantique

### 4.3. LITHOSTRATIGRAPHIE DES FORMATIONS A COMPOSANTE ARGILEUSE

Ce chapitre dresse l'inventaire des formations géologiques argileuses *s.l.* du département de Loire-Atlantique retenues dans le cadre de cette étude. Une brève description en est présentée, basée principalement sur les notices des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000, l'analyse de la Banque des données du Sous-Sol (BSS) et des données de sondages géotechniques collectées dans le cadre de la présente étude.

Les 22 formations ainsi identifiées sont décrites depuis les plus récentes jusqu'aux plus anciennes. Leurs contours sont présentés sur la carte hors-texte à l'échelle 1/125 000 ainsi que sur l'

Illustration 9.

#### 4.3.1. Formations superficielles du Quaternaire

Ces formations quaternaires se présentent en général sous forme de lambeaux localisés ou de véritable couverture dont l'épaisseur peut varier de quelques décimètres à plusieurs mètres. Elles peuvent, dans certains cas, ne pas être représentées sur les cartes géologiques. En effet, une carte géologique est une **représentation interprétée** correspondant à des critères de choix du ou des auteurs en fonction des attentes de la communauté scientifique à l'époque de la réalisation de la carte. De plus, l'échelle du 1/50 000 est souvent mal adaptée à la représentation de plaquages superficiels de faible extension.

##### 4.3.1.1. *Formation 1- Alluvions actuelles et récentes (Fz)*

Les alluvions actuelles et récentes regroupent les alluvions fluviales récentes présentes dans les fonds de vallées de la Loire et les alluvions fluviomarines de l'estuaire de la Loire. Elles sont présentes sur l'ensemble du département. Ces dépôts sont datés de l'Holocène.

Leurs caractéristiques lithologiques varient en fonction des cours d'eau, des bassins versants et de leur position relative par rapport au cours d'eau (dépôts de bordure de méandres ou situés au cœur des chenaux). La plupart des auteurs des cartes géologiques du département décrivent des dépôts argilo-limoneux et des assises sablo-graveleuses plus ou moins argileuses, dans lesquels s'intercalent des horizons d'argiles franches grises, bleues ou noires.

L'épaisseur de ces alluvions varie selon les cours d'eau. Elle peut localement atteindre ou dépasser 40 mètres au niveau de l'estuaire de la Loire (feuille de Paimboeuf 480), mais est le plus souvent réduite à une dizaine de mètres. Elle ne dépasse en général pas quelques mètres dans les autres cours d'eau du département.

La fraction argileuse comprend, par ordre d'importance décroissante : illite, kaolinite, montmorillonite et chlorite (Clément, 1984).

Les alluvions actuelles et récentes représentent une superficie de 518 km<sup>2</sup> dans le département de Loire-Atlantique.

#### **4.3.1.2. Formation 2- Dépôts vaseux et tourbes (MzT)**

Les dépôts vaseux et les tourbes regroupent les dépôts marins et fluvio-lacustres, datés de l'Holocène et plus précisément du Flandrien. Ces formations sont présentes sur l'ensemble du département, au niveau des zones marécageuses (marais de la Brière, lac de Grand-Lieu, marais de la Guerche, etc.).

Les faciès rencontrés dans ces dépôts montrent des argiles grises ou bleues, des vases molles, grises ou noires, des argiles sableuses, des limons ou encore des tourbes récentes.

Ces dépôts argilo-tourbeux sont compressibles et peuvent donc induire des tassements différentiels, même s'il ne s'agit pas nécessairement à proprement parler de phénomènes de retrait-gonflement. L'épaisseur des sédiments est variable, de 1-2 mètres à plusieurs dizaines de mètres.

La proportion d'argile dépasse le plus souvent 50 % du poids total du sédiment. La fraction argileuse est essentiellement composée d'illite, de kaolinite, de montmorillonite et de chlorite (feuille de Challans 534).

Cet ensemble occupe une superficie d'environ 284 km<sup>2</sup> sur l'ensemble du département de Loire-Atlantique.

#### **4.3.1.3. Formation 3- Alluvions anciennes (Fw-x-y)**

Les alluvions anciennes, datées du Pléistocène moyen à supérieur, regroupent les alluvions des hautes, moyennes et basses terrasses. Elles sont présentes sur l'ensemble du département le long des principaux cours d'eaux et leur épaisseur est de l'ordre du mètre (8 m maximum).

Elles sont principalement constituées de sables grossiers (souvent feldspathiques), de graviers et de galets d'origine diverse (souvent des silex et des grès siliceux) emballées dans une matrice argileuse, parfois rubéfiée. De plus, localement, elles présentent des lentilles argileuses ou marneuses. L'extrême variabilité des faciès et le caractère aléatoire des zones argileuses, conduit à retenir l'ensemble de ces alluvions parmi les formations argileuses, bien que les argiles y soient minoritaires.

La fraction argileuse est caractérisée par la présence de kaolinite, d'illite (feuille de Redon 419), de vermiculite et de montmorillonite (Feuille de Bain-de-Bretagne 388).

Elles couvrent une superficie totale d'environ 116 km<sup>2</sup> dans la Loire-Atlantique.

#### **4.3.1.4. Formation 4- Dépôts complexes des plateaux (B)**

Ces dépôts sont constitués d'un mélange, en proportions très variables, de limon, d'argile, de sable, de cailloux et de blocs de quartz. Ils sont en général beiges en surface et jaunes en profondeur. Leur origine est en partie éolienne (périodes périglaciaires du Quaternaire). Cependant leur composition est fréquemment influencée par la nature de leur substrat. En effet les dépôts apparaissent souvent mélangés avec les produits d'altération du substratum tels que les particules argileuses et micacées arrachées au socle cristallin, les sables des alluvions anciennes de la Loire, les sables pliocènes, etc.

Ces limons sont en général peu épais : 0,50 à 1 mètre, et exceptionnellement 2 mètres (feuille de Clisson 509). Ils s'épaississent sur la feuille de Vallet (482) où ils atteignent 5 mètres à Saint-Laurent-des-Autels.

La fraction argileuse est en général complexe : sur la feuille de Nort-sur-Erdre (451), elle est constituée de kaolinite, d'illite, de montmorillonite et d'interstratifiés (illite-montmorillonite), alors que sur la feuille de Paimboeuf (480), elle montre une prédominance de l'illite accompagnée d'un peu de kaolinite.

Les dépôts complexes des plateaux représentent une surface d'environ 393 km<sup>2</sup>, répartie sur l'ensemble du département.

#### **4.3.1.5. Formation 5- Colluvions de pente et de fond de vallon (C)**

Cet ensemble regroupe d'une part les colluvions de pente et de fond de vallon et d'autre part, les épandages composites du Pléistocène. La plupart de ces dépôts ont été remaniés. Lorsque ces colluvions provenaient d'une formation unique elles ont été intégrées à la formation correspondante. Ces dépôts nappent le pied des versants et les fonds de vallons sur des épaisseurs variables, allant de quelques décimètres à 2 mètres. Sur la feuille de Redon (419), elles atteignent localement 4 mètres d'épaisseur.

Les sédiments proviennent de la mobilisation des altérites des formations géologiques, indurées ou non, déposées gravitairement sur les versants. La composition de ces colluvions est directement en rapport avec les formations géologiques qui les alimentent et apparaît de ce fait très hétérogène. Elles sont souvent constituées d'un mélange de matériaux fins et grossiers : argiles ou limons, sables, cailloutis, graviers ou blocs. La fraction argileuse présente elle aussi une nature variable.

Présents sur tout le département, ces dépôts occupent une superficie d'environ 365 km<sup>2</sup>.

### **4.3.2. Formations tertiaires**

#### **4.3.2.1. Formation 6- Sable et graviers d'âge éocène et plio-quadernaire (ep-SG)**

Cet ensemble regroupe les formations sableuses datées de l'Éocène et du Plio-Quaternaire. Elles sont présentes dans l'ouest du département. Ces sables représentent une superficie de 65 km<sup>2</sup> dans le département de Loire-Atlantique. Ils peuvent se décrire comme suit :

##### *Sables et graviers plio-quadernaire*

Ces formations sont présentes au niveau du bassin de Campbon. La puissance de ces dépôts est en moyenne de 2 à 3 mètres. Ce sont des formations qui sont essentiellement composées de sables, graviers et argiles. Elles sont très hétérogènes et les sédiments qui les constituent ont des origines différentes. Ainsi, les sables, graviers et galets sont apparentés aux matériaux pliocènes, les argiles et limons étant d'origine éolienne et alluviale. Certains éléments peuvent également provenir du remaniement d'altérites proches.



La fraction argileuse est essentiellement composée d'illite et de quelques traces de kaolinite (Esteoule-Choux, 1967).

#### *Sables de Savenay*

Les sables éocènes de Savenay résultent du remaniement de matériaux d'origines diverses. Ils dérivent des sédiments marins et d'un apport continental proche. D'une épaisseur de quelques mètres, cette formation sableuse présente trois faciès principaux : des sables grossiers jaunes à graviers, peu argileux ; des sables fins, blancs, jaunes ou rouges, très pauvres en argiles ; et des argiles beiges, grises ou violacées, riches en quartz et en kaolinite formant des bancs généralement minces (5 à 70 centimètres), qui s'intercalent dans les sables de façon discontinue.

#### **4.3.2.2. Formation 7- Sables et marnes sableuses du Miocène moyen au Pliocène (mp-SM)**

Cet ensemble regroupe les Faluns et les Sables rouges du Tertiaire. Ces formations ont été rassemblées du fait de leur similitude de lithologie et de minéralogie. Ils sont représentés sur l'ensemble du département avec une superficie d'environ 452 km<sup>2</sup>.

#### *Faluns du Miocène moyen au Pliocène*

Cette formation correspond à des dépôts marins du Miocène moyen. Ces derniers présentent des aspects variés : il s'agit de sables coquilliers calcaires, de calcaires grossiers à graviers de quartz, de sables quartzeux, de marnes, de calcaires fin argileux ou bien encore d'argiles grises ou noires plus ou moins coquillières. L'ensemble de la formation est riche en débris coquilliers. Ils se rencontrent au Nord-Est et au Sud du département. Leur épaisseur est très variable, de quelques mètres à plus d'une quinzaine de mètres (feuille de Palluau 535).

La fraction argileuse montre une forte dominance des smectites (environ 50 %), accompagnés de kaolinite et d'illite. Certains faluns sont exclusivement composés de montmorillonite (Esteoule-Choux, 1967).

#### *Sables rouges du Pliocène*

Ces sables représentent une superficie importante dans le département. Le faciès dominant des sables pliocènes est représenté par des sables rouges à fraction grossière ou fine, essentiellement quartzeuse, où s'intercalent des lits argileux localement noirâtres ou gris, qui peuvent atteindre 2 mètres d'épaisseur. Ces sables peuvent également être mêlés à des cailloutis, des graviers, et des galets remaniés. Ces dépôts sont d'origine marine. La fraction argileuse est à montmorillonite (90 %) et kaolinite (10 %) (Esteoule-Choux, 1967).

Leur puissance variable est liée à l'irrégularité naturelle de la série ainsi qu'à l'érosion : de moins de 1 mètre à plus de 22 mètres en sondage.

#### **4.3.2.3. Formation 8- Argiles d'âge éocène à pliocène (ep-A)**

Cet ensemble regroupe les formations essentiellement argileuses ou marneuses présentes sur le territoire de Loire-Atlantique. Ce sont des dépôts datés du Pliocène, de l'Oligocène et de l'Éocène. Les dépôts pliocènes sont répartis en petites entités sur l'ensemble du département tandis que les argiles éocènes et oligocènes sont

localisées dans le bassin tertiaire de Saffré. Cet ensemble représente une superficie totale de 17 km<sup>2</sup>.

#### *Argiles redoniennes (Pliocène)*

Les faciès rencontrés dans ces formations pliocènes montrent des argiles ou marnes noires fossilifères (d'origine marine), des argiles grises, parfois marneuses ou micacées, et des argiles sableuses avec des galets de quartz. La puissance de ces dépôts varie de 1 à 15 mètres.

La fraction argileuse montre une forte prédominance des smectites (70 %) associées à de la kaolinite et de l'illite (feuille de Redon 419).

#### *Argiles éocènes et oligocènes*

Ces formations sont datées de l'Éocène (Yprésien, Lutétien, Bartonien) et de l'Oligocène (Stampien). Elles se sont déposées en milieu continental ou laguno-lacustre. Les sédiments se sont retrouvés piégés dans de petits grabens de faible extension. L'épaisseur des dépôts est très importante puisqu'elle peut atteindre jusqu'à 170 mètres (feuille de Nort-sur-Erdre 451).

Trois faciès sont distingués, l'un correspondant à une argile sableuse, verte et noire, fossilifère, d'origine essentiellement détritique, un second à une argile gypsifère, grise à montmorillonite et attapulgite, et le troisième à une argile pyriteuse verte et grise, à dolomite.

La phase argileuse montre une dominante à smectite et à illite, accompagnée de kaolinite (traces). Certains niveaux sont également riches en attapulgite (argile fibreuse). L'origine probable de l'attapulgite serait la transformation de la smectite sous l'action des solutions riches en magnésium (feuille de Nozay 420). Les argiles gypsifères présentent de la montmorillonite dans leur fraction argileuse.

#### **4.3.2.4. Formation 9- Calcaires et marnes de l'Éocène et de l'Oligocène (eg-CM)**

Cet ensemble regroupe les formations à dominante calcaire. Ces dépôts, présents dans les petits bassins tertiaires du département (Saffré, Campbon, etc.), s'étendent sur une superficie de 8 km<sup>2</sup>.

##### *Les dépôts oligocènes (Stampien supérieur)*

Les formations datées de l'Oligocène sont localisées dans le bassin de Saffré. La puissance des sédiments est de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres. Il est possible de distinguer deux faciès différents, l'un marin et l'autre lacustre.

Le premier correspond à la série des calcaires à Archiacines. Ils sont constitués de marne grise, de calcaire marneux, de calcaire à grain fin et de calcaire grossier. La fraction argileuse est constituée soit par de l'illite soit par un mélange attapulgite-montmorillonite (Esteoule-Choux, 1967).

Le second faciès est formé de meulières compactes associées à des marnes jaunes ou s'intercalent des niveaux argileux. La phase argileuse est essentiellement constituée d'attapulgite (Esteoule-Choux, 1967).

#### *Les dépôts éocènes (Lutétien –Bartonien)*

Ces dépôts sont représentés par des épaisseurs parfois importantes, de plusieurs dizaines de mètres en moyenne (jusqu'à 40 mètres au Bas-Bergon, feuille de la Roche-Bernard 449). Ces formations se rencontrent dans les bassins de Campbon, d'Arthon et de Machecoul.

Les dépôts sont de nature variée : il s'agit de calcaires, calcaires gréseux, marneux ou dolomitiques, de marnes ou marnes sableuses et d'argiles. Les matériaux se présentent sous la forme de niveaux lenticulaires avec des passages latéraux de faciès fréquents et rapides.

Les niveaux argileux sont riches en attapulgite (feuille de Savenay 450).

### **4.3.3. Formations du Paléozoïque et du Protérozoïque**

#### **4.3.3.1. Formation 10- Altérites indifférenciées du socle protérozoïque et paléozoïque (Alt)**

Dans cette formation ont été regroupées toutes les altérites indifférenciées cartographiées des formations protérozoïques et paléozoïques. Elles sont présentes sur l'ensemble du département.

Ces dépôts sont représentatifs de la composition des roches sous-jacentes. Ils sont en général composés d'argiles, de sables et de fragments des roches sous-jacentes. Ces altérites se caractérisent par une oxydation et une kaolinisation des roches, associées à un développement de croûtes, voire de « cuirasses ferrugineuses ». Localement, ces concentrations ferrugineuses peuvent être très développées et ont été exploitées par le passé (région de Châteaubriant et de Bain-de-Bretagne).

D'après Clément (1984), la phase argileuse montre une prédominance de la kaolinite et peut être associée à de l'illite. A la base de la zone altérée, l'argile peut apparaître chargée en chlorite, montmorillonite et vermiculite. Les différents prélèvements effectués en Loire-Atlantique et Maine-et-Loire reflètent la diversité des minéraux argileux et la variabilité de leurs proportions relatives : kaolinite (34-96 %), illite et/ou micas (4-38 %), smectite et vermiculite (4-30 %)..

L'épaisseur des altérites, supposées d'âge Paléogène, varie de 1-2 mètres à une dizaine de mètres (14 mètres dans la carrière du Tertre Rouge, feuille de Saint-Mars-la-Jaille 421) et cette altération est relativement continue.

Cet ensemble représente une superficie de 124 km<sup>2</sup> sur le département de Loire-Atlantique.

#### **4.3.3.2. Formation 11- Schistes et ampélites altérés d'âge briovérien à dévonien (SchAmp)**

Cet ensemble regroupe des faciès lithologiquement proches et d'âge cambrien à dévonien. L'ensemble de ces formations présente un manteau d'altération riche en argiles et plus ou moins épais, de quelques mètres en moyenne, avec un minimum de 1 mètre et un maximum de 16 mètres (sondage BSS n° 0507-4X-0021/F).

Les schistes briovériens sont constitués de schistes phylliteux, légèrement gréseux. Leur altération conduit dans la plupart des cas à la formation massive de kaolinite souvent associée à du mica. Certaines zones d'altération montrent également la présence de chlorite gonflante, de montmorillonite et de vermiculite (Esteoule-Choux, 1967).

Les schistes cambriens, gris-vert, sont essentiellement composés de séricite et de chlorite. Les argiles d'altération sont caractérisées par l'association de mica dominant, de kaolinite et de traces de chlorite (Esteoule-Choux, 1967).

Les schistes ordoviciens correspondent à des schistes ardoisiers bleu-noir, épais d'une centaine de mètres. Ces roches sont des méta-argilites très homogènes, constituées entièrement de phyllites (muscovite et chlorite) en paillettes très fines (feuille de Redon 419). Leur altération conduit à la formation d'argiles caractérisées par un mélange d'illite dominante, de kaolinite et de chlorite (Esteoule-Choux, 1967).

Les schistes siluriens sont constitués d'ampélites et de schistes ampélitiques montrant de fines intercalations gréseuses. En surface, les schistes ampélitiques se transforment en argiles bariolées, brun-rougeâtre qui sont composées majoritairement d'illite associée à une petite quantité de kaolinite (Esteoule-Choux, 1967).

Les schistes dévoniens correspondent à des schistes argileux gris-vert qui renferment localement des nodules silico-argileux. Ils sont surmontés par des argilites micacées. L'altération de ces schistes aboutit à la formation d'argiles composées de kaolinite et de mica.

Ces terrains couvrent une surface d'environ 94 km<sup>2</sup> répartie sur l'ensemble du département.

#### **4.3.3.3. Formation 12- Série altérée de la Formation de Fégréac (SchFég)**

Cet ensemble regroupe des séries schisteuses, schisto-gréseuses et volcaniques rattachées à la Formation de Fégréac. Ce sont des dépôts datés de l'Ordovicien supérieur au Dévonien inférieur. Ils sont caractérisés par un faciès schisteux (argilo-silteux) très développé. Il s'agit de schistes satinés, à toucher savonneux dont la teinte varie de beige, à gris, au vert-amande et au rouge violacée. Les schistes verdâtres et lie-de-vin sont particulièrement fréquents.

Ces faciès sont recouverts d'un placage épais et continu d'altérites (5 mètres en moyenne, avec un minimum de 1 mètre), qui peut atteindre localement 12 mètres d'épaisseur (sondage BSS n° 0420-6X-0023/F). D'après l'analyse des échantillons prélevés en Maine-et-Loire et Loire-Atlantique, la phase argileuse présente une proportion variable d'argiles gonflantes (vermiculite ou smectite, de 8 à 50 %) associées à de l'illite et/ou micas (2 à 74 %) et à de la kaolinite (16 à 57 %).

Cette formation affleure dans le Nord du département et forme une large bande de Fégréac (à l'Ouest) à la Chapelle-Saint-Sauveur (à l'Est). Sa superficie est d'environ 400 km<sup>2</sup>.

#### **4.3.3.4. Formation 13- Schistes et grès altérés du Paléozoïque (SchGr)**

Les terrains qui sont regroupés ici présentent des faciès variés. Ce sont des schistes noirs, souvent charbonneux et parfois riches en empreintes végétales, des grauwackes, des grès-psammitiques grisâtres ou brunâtres plus ou moins fins et des conglomérats monogéniques ou polygéniques. La puissance de ces dépôts est en moyenne de 200 mètres (feuille de Savenay 450).

Cet ensemble est en général altéré sur plusieurs mètres. Ainsi, d'après la Banque des données du Sous-Sol (BSS), les altérites apparaissent discontinues. Leur épaisseur varie de 1 à 18 mètres (6 mètres en moyenne).

Des prélèvements de sol (SGR-PAL –Service Géologique Régional-Pays de la Loire : T7, T8, T10, T12) ont montré la présence de smectite, de vermiculite, d'illite et/ou mica, de kaolinite et d'interstratifié chlorite-smectite, en proportions variables.

Ce sont des dépôts datés du Cambrien au Carbonifère. Ils affleurent sur l'ensemble du département et s'étendent sur une superficie d'environ 289 km<sup>2</sup>.

#### **4.3.3.5. Formation 14- Micaschistes altérés (kaolinisés) du Protéro-Paléozoïque (Mick)**

Cet ensemble regroupe une grande partie des micaschistes du département. Quatre faciès sont distingués dans cet ensemble : *Micaschistes à muscovite et chlorite*, *Micaschistes à ocelles d'albite, muscovite et chlorite*, *Micaschistes albitiques à biotite et muscovite* et enfin *Micaschistes et gneiss*. Ils sont datés du Protérozoïque et du Paléozoïque.

Ces formations ont été regroupées dans les formations argileuses et marneuses car elles présentent un degré d'altération important qui se traduit par des dépôts argileux épais en surface (au minimum de 2 mètres), jusqu'à 25 mètres d'épaisseur (sondage BSS n° 0449-2X-0087/F). D'après les données de sondage de la BSS, l'altération de ces formations semble relativement continue avec néanmoins des épaisseurs variables, de l'ordre de 5 mètres en moyenne.

L'altération de ces micaschistes conduit à la formation d'argiles généralement composées de kaolinite et de mica (Esteoule-Choux 1967).

Ces micaschistes occupent une superficie d'environ 558 km<sup>2</sup> sur le département de Loire-Atlantique.

#### **4.3.3.6. Formation 15- Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque (Mic)**

Dans cet ensemble, ont été regroupés les micaschistes de la *Formation de Pornic*, de l'*Unité de Saint-Gilles* et de la *Formation de la Vilaine*. Ils sont datés du Protérozoïque et du Paléozoïque. Ces formations ont été rassemblées au sein d'un même ensemble car elles présentent des similitudes au niveau de la composition minéralogique de leurs argiles d'altération.

L'altération de ces terrains semble régulière. L'épaisseur des altérites varie de quelques mètres à une vingtaine de mètres (7 mètres en moyenne), d'après les sondages consultés en BSS.

La fraction argileuse des altérites de ces roches peut montrer la présence de smectite et/ou vermiculite (Roy, 2007 ; Esteoule-Choux, 1967), associées à de la kaolinite et de l'illite. Les proportions de smectite et/ou vermiculite apparaissent variables (nulle à majoritaire). La présence de smectite est susceptible d'avoir un lien avec la topographie, bien qu'un essai de corrélation avec la topographie actuelle ne soit pas parfaitement concluant. En effet, les parties topographiquement basses, telles que les zones marécageuses, favoriseraient la formation de ce minéral, plutôt que celle de kaolinite. Cela s'expliquerait par une désilicification moindre liée à un lessivage nettement plus réduit qu'en zone topographiquement plus haute (Gaudin, 2008).

Ces micaschistes sont principalement localisés dans le Sud du département, ainsi qu'à l'Ouest sur la commune de Mesquer. Leur superficie est de l'ordre de 73 km<sup>2</sup>.

Il est à noter que les altérites de la formation des Mauges pourraient être intégrées à cet ensemble de par la présence de vermiculite dans le cortège argileux. Toutefois, en l'absence de limite clairement cartographiées, il a été jugé préférable de les regrouper avec les altérites indifférenciées (formation n°10).

#### **4.3.3.7. Formation 16- Argilites silteuses de l'Ordo-silurien (ArgSil)**

Cet ensemble regroupe une partie des formations *de la Chesnaie, du Grand-Auverné, et de Traveusot*. Ces dépôts correspondent à des argilites silteuses (sub-ardoisières ou ardoisières), et à des pélites silteuses (sombres, à quartz, chlorite, séricite). Ils sont âgés de l'Ordovicien supérieur au Silurien Inférieur. Leur puissance est de l'ordre de la centaine de mètres, avec un maximum de 345 mètres sur la feuille de Nozay (420). La partie prise en compte correspond principalement au secteur indiqué comme fortement altéré sur la carte de Saint-Mars-la-Jaille (421).

L'épaisseur totale d'argile peut atteindre la dizaine de mètres (sondage BSS n° 0421-5X-0023).

La fraction argileuse montre une dominante à kaolinite et mica (sondage BSS n° 0420-8X-4003/GT). Des prélèvements dans le Maine-et-Loire ont permis de mettre en évidence la présence de kaolinite et de mica, également accompagné d'illite et d'interstratifié smectite-chlorite en faible quantité.

Les argilites silteuses très altérées occupent dans le Nord du département une superficie d'environ 83 km<sup>2</sup>.

#### **4.3.3.8. Formation 17- Siltites et grès altérés du Briovérien et de l'Ordovicien (SilGr)**

Les formations présentes dans cette unité correspondent aux formations *du Grès Armoricain, du Groupe de Saint-Perreux, de la Mayenne, de Pont-Réan et de Riadan-Renazé*. Ce sont des dépôts composés d'alternances de siltites argileuses micacées, de grès feldspathiques ou quartzites, de psammites et de microconglomérats. Ces différents faciès forment un ensemble sédimentaire détritique terrigène de composition assez homogène. Ils sont datés du Briovérien, de l'Ordovicien et du Silurien.

Les sondages disponibles en BSS mettent en évidence une altération importante de ces formations, avec des épaisseurs variant de 0,5 à 27 mètres (9 mètres en moyenne).

Les siltites sont composés de quartz, de séricite, de chlorite et de mica (muscovite, biotite). Les grès sont de nature variée : grès grauwackes, grès quartzeux. Les conglomérats sont constitués de galets de quartz, de phtanite, de grès dans une matrice quartzo-sériciteuse. Ils ont une puissance variant de 75 à plus de 200 mètres.

La fraction argileuse des siltites montre la présence de chlorite et de vermiculite (feuille de Nozay 420). Les argiles provenant de l'altération sont essentiellement composées de kaolinite (Esteoule-Choux, 1967) et d'illite.

Cet ensemble s'étend sur une superficie d'environ 532 km<sup>2</sup> au nord du département.

#### **4.3.3.9. Formation 18- Granites et gneiss altérés du Paléozoïque (GGn)**

Cet ensemble regroupe des orthogneiss, des leucogranites et des leptynites et gneiss anatectiques, datés de l'Ordovicien et du Carbonifère.

Suite à l'examen des sondages de la BSS, un manteau d'altération plus ou moins épais a été identifié sur ces formations. C'est une altération discontinue, qui se présente sous la forme de poches argileuses. Celles-ci ont une épaisseur variable, de 1 à 11 mètres, avec une moyenne de 4 mètres.

La fraction argileuse des altérites de ces formations contient une proportion significative de montmorillonite (Esteoule-Choux, 1967 ; Delfau et Le Berre, 1981 ; Roy, 2007) associée à de l'illite et de la kaolinite (Prélèvement SGR-PAL : T18).

Ces formations forment une bande de direction Nord-Ouest/Sud-Est qui traverse le département. La superficie de cet ensemble est de l'ordre de 130 km<sup>2</sup> en Loire-Atlantique.

#### **4.3.3.10. Formation 19- Granites et gneiss altérés (kaolinisés) du Paléozoïque (GGnK)**

Cette formation affleure dans la partie centrale du département. Elle regroupe des altérites de granites, granodiorites, gneiss, orthogneiss, leptynites, diatexites, métatexites et mylonites d'âge paléozoïque. L'altération de ces roches forme soit des poches argileuses, soit des arènes sableuses. Quelques formations (ou parties de formations) ont été retenues dans leur ensemble comme potentiellement argileuses lorsque les altérites n'étaient pas cartographiées spécifiquement.

D'une manière générale, l'épaisseur d'argile varie de un mètre à une vingtaine de mètres sur ces formations, d'après les sondages consultés en BSS.

Les argiles d'altération sont majoritairement constituées, par ordre décroissant, de kaolinite, d'illite et/ou mica et de quartz (Delfau et Le Berre, 1981).

La superficie de cet ensemble est de l'ordre de 268 km<sup>2</sup> en Loire-Atlantique.

#### **4.3.3.11. Formation 20- Migmatites (altérées) de la Formation de Muzillac (Mig)**

Cet ensemble regroupe les terrains rattachés à la *Formation de Muzillac*. Datés du Protéro-Paléozoïque, ils sont composés de migmatites, de gneiss migmatitiques à sillimanite, de paragneiss migmatitiques, de gneiss ocellés et de leptynites migmatitiques. Ces roches sont formées de quartz, plagioclase, biotite, muscovite, sillimanite, etc.

D'après les sondages disponibles en BSS, l'altération des migmatites est discontinue mais assez présente, et correspond en général à des poches argileuses d'épaisseur variable (entre 1 et 11 mètres).

D'après les prélèvements effectués (SGR-PAL : T5 et T6), les argiles d'altération de ces migmatites sont composées de kaolinite (44 à 66 %), d'illite et/ou micas (7 à 50 %) et de smectite (6 à 27 %). Les variations de la teneur en smectite pourraient être liées à la topographie, bien qu'un essai de corrélation avec la topographie actuelle ne soit pas parfaitement concluant. En effet, les parties topographiquement basses, telles que les zones marécageuses sont susceptibles de favoriser la formation de ce minéral par rapport à la kaolinite. Cela s'explique par un lessivage, donc une désilification, moindre qu'en position topographiquement haute (Gaudin, 2008).

Les migmatites de Muzillac représentent une superficie d'environ 164 km<sup>2</sup> et sont localisées dans l'Ouest du département.

#### **4.3.3.12. Formation 21- Amphibolites et gabbros altérés du Paléozoïque (AmphGab)**

Cet ensemble regroupe les amphibolites et gabbros du Paléozoïque. L'examen des sondages disponibles en BSS a mis en évidence le fait que certains faciès pouvaient être altérés dans leur ensemble. Des affleurements de roches massives existent néanmoins localement mais il n'a pas toujours été possible de les identifier de manière spécifique. L'altération de ces roches aboutit à la formation d'argiles en surface. Ce manteau argileux continu sur certains faciès a une puissance variant de 1 à 10 mètres (4 mètres en moyenne).

L'altération des amphibolites produit une argile gonflante à laquelle s'ajoutent des traces de kaolinite. Cette argile gonflante a les caractères de la montmorillonite et présente une analogie avec les vermiculites. Il est également possible d'observer un mélange de vermiculite et de chlorite gonflante. L'altération des gabbros conduit à la formation massive de montmorillonite (Esteoule-Choux, 1967).

Les amphibolites et gabbros s'étendent sur une superficie de l'ordre de 93 km<sup>2</sup> et occupent la partie sud du département.

#### **4.3.3.13. Formation 22- Péridotites et serpentinites altérées du Paléozoïque (PerSer)**

Cette formation regroupe les péridotites serpentinisées et les serpentinites du socle. Ce sont des roches noires ou verdâtres, essentiellement constituées d'antigorite et de minéraux secondaires : amphiboles souvent chloritisées, magnétites, chlorites.



Ce type de roches, d'origine profonde, est très instable en surface et présente une altération très marquée (Béchenec, 2008). Ainsi, les sondages disponibles en BSS mentionnent la présence d'argiles d'altération continues sur ces terrains, sur des épaisseurs atteignant de l'ordre de 10 à 16 mètres.

La fraction argileuse des altérites présente plus de 90 % de smectite, ainsi qu'une faible quantité de kaolinite (prélèvements SGR-PAL : T16, T17). On y observe aussi parfois des amas importants de vermiculite, associée à de la chlorite (Delfau, 1982).

Ces terrains représentent une superficie de l'ordre de 7,5 km<sup>2</sup>, au Sud du département.

#### 4.4. REMARQUES SUR LES FORMATIONS NON ARGILEUSES

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

C'est le cas notamment des formations de socle où les altérites et/ou formations superficielles semblent *a priori* suffisamment prises en compte. Parmi ces formations, situées dans la moitié sud du département, figurent des :

- granites et gneiss : *Granites de La Roche sur Yon ; Massif d'Orvault-Mortagne : granite à biotite et muscovite, orienté ; Massif d'Orvault-Mortagne : leucomonzogranite porphyroïde à biotite et muscovite ; Formation de Chauvé-l'Angle-Mervent : orthogneiss à biotite et muscovite ;*
- micaschistes : *Unité de Saint-Gilles-La Vilaine : micaschistes et gneiss micacés indifférenciés ; Formation de Saint-Hilaire : micaschistes et gneiss à albite, lentilles graphiteuses et phtanitiques ; Formation du Bois-de-Céné : micaschistes et gneiss à muscovite, biotite, chloritoïde, glaucophane, grenat et épidote ; Formation des Mauges : micaschistes albitiques ou quartzeux à biotite et muscovite (micaschistes du Fuilet) ;*
- autres roches : *Formation de Bourgneuf : grauwackes tufacées, pélites, micro-conglomérats (Cambrien supérieur probable) ; Formation des porphyroïdes de Vendée et de la Vilaine : méta-rhyolites, méta-tufs, méta-arkoses à muscovite.*

Par ailleurs, certaines formations de socle dont les altérites semblent plutôt sableuses n'ont pas été retenues comme formations argileuses. C'est le cas notamment de granites dont celui du *Massif de Sainte-Anne-d'Auray*. De la même manière, les formations sédimentaires *a priori* non argileuses comme les *Graves sableuses à graviers quartzeux roulés prédominants du Pliocène* n'ont pas été considérées.

Dans la moitié nord du département, la majorité des cartes géologiques apparaissent plus axées sur les formations de socle. La connaissance partielle des formations superficielles a conduit à opérer des choix concernant des formations entières. Ainsi certains choix de non prise en compte (comme de prise en compte) reposent sur l'état actuel des connaissances mais peuvent être remis en cause par de nouvelles informations (forages, ...). Quoi qu'il en soit, un ensemble de formations, bien que non

retenues comme potentiellement argileuses, peut présenter localement des poches d'argiles d'extension plus ou moins importante.

C'est le cas notamment des *Grès armoricains*, situés au nord du département. Plusieurs sondages disponibles dans la Banque des données du Sous-Sol (BSS) indiquent la présence d'argile sur des épaisseurs allant jusqu'à 8 m. Sur cette base, quelques poches d'altérites argileuses ont été cartographiées à partir des données de la BSS et des dossiers d'études géotechniques collectés. Ces poches ont été intégrées aux formations argileuses, comme les petites poches d'altérites très ferruginisées déjà cartographiées sur les cartes géologiques.

Une large partie des formations reste cependant lithologiquement mal caractérisée. Une étude de terrain serait nécessaire pour cartographier l'extension des altérites et préciser leur nature. Cela concerne ces grès mais aussi plus largement toute la moitié nord du département.

C'est le cas aussi de la *Formation de la Pile et la Boserie, grès verts psammitiques et schistes noirs (Arénig moyen-supérieur)*, pour laquelle la BSS indique localement des épaisseurs d'argiles allant jusqu'à 12 m.

La formation du *Lutétien supérieur, calcaires sableux et dolomitiques à Nummulites, sables et calcaires sableux à Orbitolites, meulière*s n'a pas non plus été retenue comme argileuse. Pourtant, l'analyse des données de CEC communiquées par la Chambre d'Agriculture de Loire-Atlantique indique des indices de présence d'associations d'argiles de type « kaolinite, illite, smectite et/ou vermiculite » ou « kaolinite, illite » dans les sols profonds.

Enfin, une partie des formations *de la Chesnaie, du Grand-Auverné et de Traveusot* non prises en compte dans la carte des formations argileuses, ainsi que la formation *de Saint-Perreux*, correspondant à des argilites silteuses, des pélites silteuses et des siltites sont également susceptibles de présenter localement des poches argileuses.

#### **4.5. ANALYSE DES DISCONTINUITES AVEC LE DEPARTEMENT DU MAINE-ET-LOIRE**

La carte ainsi établie montre plusieurs discontinuités avec celle du département voisin du Maine-et-Loire, déjà publiée (Le Guern et Notturmo, 2005).

Ainsi, le *Gabbro du Pallet et de Montfaucon, faciès doléritique de Tillières*, présent au sud de la Loire, a été intégré à la carte des formations argileuses de la Loire-Atlantique, alors qu'il n'avait pas été pris en compte dans celle du Maine-et-Loire. Ce choix est issu de l'analyse de l'épaisseur d'argiles à partir des sondages disponibles en BSS pour la Loire-Atlantique, laquelle indique une présence importante d'argiles sur cette formation géologique, même en dehors des altérites cartographiées.

Dans la partie limitrophe centrale, au nord de la Loire, les sables du Pliocène sont intégrés dans la carte des formations argileuses de la Loire-Atlantique, alors que ce n'est pas le cas dans la carte des formations argileuses du Maine-et-Loire. Une description différente de ces sables entre les cartes contiguës de Saint-Mars-la-Jaille (421) et de Segré (422) explique cette appréciation différente. La notice de la carte géologique de Segré (422), qui concerne la partie Maine-et-Loire indique la présence

de sable, et ne mentionne pas d'argile. En revanche, la notice de la carte géologique de Saint-Mars-la-Jaille, concernant la partie Loire-Atlantique indique la présence de sables argileux. Cette différence peut correspondre à des variations latérales de faciès, phénomène fréquemment rencontré dans ce type de formation sédimentaire.

Par ailleurs, il faut noter que la carte des formations argileuses du Maine-et-Loire a été établie avant que la carte géologique harmonisée de ce département ne soit disponible. La carte géologique harmonisée de la Loire-Atlantique (Béchenec, 2007), élaborée plus récemment, intègre en outre l'évolution des connaissances. Ceci peut expliquer une partie des différences entre les deux cartes de formations argileuses. Suite à l'élaboration de la carte géologique harmonisée de la Loire-Atlantique, une révision de celle du Maine-et-Loire a en outre été opérée.



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

### 5.1. CRITÈRES DE HIÉRARCHISATION

#### 5.1.1. Critères retenus

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

En effet, d'autres critères de susceptibilité au retrait-gonflement, tels que le contexte hydrogéologique, la topographie, la végétation ou le type de fondation du bâti, n'ont pas été pris en compte, la plupart de ces facteurs n'intervenant que de manière très locale et ne pouvant par conséquent être cartographiés à l'échelle départementale.

#### 5.1.2. Méthode de classification

Rappelons que le document de base utilisé pour élaborer la carte de susceptibilité est la carte synthétique des formations argileuses et marneuses du département, laquelle a été établie en tenant compte essentiellement de la nature lithologique des formations.

La seconde étape de cette cartographie consiste à hiérarchiser les formations argileuses et marneuses ainsi identifiées, en fonction de leur plus ou moins grande susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Cette hiérarchisation est basée sur la prise en compte de caractéristiques quantifiables, estimées pour chacune des 22 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 de méthylène, 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 22 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.

Il faut noter que cette caractérisation lithologique des formations est établie sur la base des données de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) et de l'expertise du géologue régional. Elle 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 utilisé pour distinguer les différentes classes lithologiques est donné dans le tableau de l'illustration 10.

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 10 – Barème du critère lithologique

## 5.2.2. Caractérisation lithologique

Sur la base de ces critères, le tableau de l'illustration 11 permet de synthétiser les différentes notes lithologiques attribuées aux 22 formations potentiellement sujettes au retrait-gonflement, à partir des descriptions établies dans les notices des cartes géologiques au 1/50 000.

N°	Code	Formation	Superficie (km <sup>2</sup> )	% surface département	Note lithologique
1	Fz	Alluvions actuelles et récentes	517,85	7,49%	2
2	MzT	Dépôts vaseux et tourbes	284,42	4,12%	4
3	Fw-x-y	Alluvions anciennes	115,65	1,67%	1
4	B	Dépôts complexes des plateaux	392,92	5,69%	1
5	C	Colluvions de pente et de fond de vallon	365,26	5,29%	2
6	ep-SG	Sables et graviers d'âge éocène et plio-quadernaire	65,31	0,95%	1
7	mp-SM	Sables et marnes sableuses du Miocène moyen au Pliocène	452,28	6,54%	2
8	ep-A	Argiles d'âge éocène à pliocène	17,08	0,25%	4
9	eg-CM	Calcaires et marnes de l'Éocène et de l'Oligocène	7,92	0,11%	3
10	Alt	Altérites indifférenciées du socle protérozoïque et paléozoïque	123,57	1,79%	2
11	SchAmp	Schistes et ampélites altérés d'âge briovérien à dévonien	94,21	1,36%	2
12	SchFég	Série altérée de la Formation de Fégréac	398,50	5,77%	2
13	SchGr	Schistes et grès altérés du Paléozoïque	288,97	4,18%	1
14	MicK	Micaschistes altérés (kaolinisés) du Protéro-Paléozoïque	558,07	8,08%	2
15	Mic	Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque	73,42	1,06%	2
16	ArgSil	Argilites silteuses de l'Ordo-silurien	83,41	1,21%	2
17	SilGr	Siltites et grès altérés du Briovérien et de l'Ordovicien	532,63	7,71%	1
18	GGn	Granites et gneiss altérés du Paléozoïque	130,01	1,88%	1
19	GGnK	Granites et gneiss altérés (kaolinisés) du Paléozoïque	268,47	3,88%	1
20	Mig	Migmatites altérées de la Formation de Muzillac	164,25	2,38%	1
21	AmphGab	Amphibolites et gabbros altérés du Paléozoïque	92,72	1,34%	1
22	Per-serp	Péridotites et serpentinites altérées du Paléozoïque	7,52	0,11%	2

Illustration 11 – Tableau de caractérisation lithologique des formations géologiques de la Loire-Atlantique

## 5.3. CRITÈRE MINÉRALOGIQUE

### 5.3.1. Définition du critère minéralogique et barème

Les phénomènes de retrait-gonflement s'expriment préférentiellement en présence des minéraux argileux appartenant au groupe des smectites (montmorillonite, beidellite, nontronite, saponite, hectorite, saunonite) 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 % (Illustration 12).

% 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 12 – Barème du critère minéralogique

### 5.3.2. Caractérisation minéralogique

En Loire-Atlantique, les données minéralogiques sont en nombre variable selon les formations géologiques. Les dossiers de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ne présentent aucune caractérisation des minéraux argileux et les rapports issus de bureaux d'études ne contiennent aucune donnée minéralogique.

Les données disponibles pour la Loire-Atlantique sont issues principalement des notices des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000, de rapports BRGM d'exploration à des fins industrielles de différentes argiles dans le Massif Armoricaïn, à la thèse de doctorat de Esteoule-Choux (1967) sur l'altération dans le Massif Armoricaïn et d'une analyse de la bibliographie régionale : Grès (1979), Proust (1981), Delfau (1982), Clément (1984), Esteoule-Choux *et al.* (1986), Fourniguet et Trautmann (1988), Borne *et al.* (1989), Chevalier et Delanoë (1989), Roy (2007).

Les données ont été enrichies grâce à l'exploitation des études de sols mises à disposition par la Chambre d'Agriculture de la Loire-Atlantique (lithologie, granulométrie, CEC, ...). Ces données, fournies au format numérique et géo-référencées, sont issues des prélèvements effectués dans le cadre de l'élaboration des cartes pédologiques (programme IGCS : Inventaire, Gestion et Conservation des Sols, coordonné par l'INHP pour la région des Pays de la Loire). L'Annexe 2 précise les modalités d'exploitation de ces données.

Les données départementales ont été enrichies également, en particulier pour les formations de socle, par les données du programme de cartographie de l'aléa retrait-gonflement du département voisin du Maine-et-Loire (le Guern et Notturmo, 2005).

L'illustration 13 décrit les caractéristiques minéralogiques de chacune des formations argileuses et l'illustration 14 précise les notes minéralogiques retenues.



Formation	Données minéralogiques dans la Loire-Atlantique	Données minéralogiques hors département
1-Alluvions actuelles et récentes (Fz)	<p><b>Chambre d'Agriculture :</b> (interprétation minéralogique des données de CEC) mélange de kaolinite, d'illite et de smectite et/ou vermiculite.</p> <p><b>Clément (1984) :</b> illite, kaolinite, montmorillonite, chlorite par ordre d'importance décroissant.</p> <p><b>Notice 388 :</b> matrice argileuse caractérisée par une richesse en chlorite.</p> <p><b>Notice 534 :</b> phase argileuse constituée essentiellement d'illite et de kaolinite.</p>	<p><b>Dépt 49 :</b></p> <p><b>Notice 454 :</b> Flaque d'argile avec prédominance de l'illite.</p> <p><b>Notice 455 :</b> Prédominance d'illite.</p> <p><b>Dép. 79 :</b> 16 % d'argiles gonflantes.</p>
2-Dépôts vaseux et tourbes (MzT)	<p><b>Notice 480 :</b> illite et kaolinite, chlorite et des micas.</p> <p><b>Notice 506 :</b> illite, kaolinite, montmorillonite et complexes gonflants, ainsi que de la chlorite.</p> <p><b>Notice 507 :</b> la fraction argileuse comprend, par ordre d'importance décroissante, illite, kaolinite, montmorillonite et chlorite.</p> <p><b>Notice 534 :</b> la proportion d'argile dépasse le plus souvent 50 % du poids total du sédiment [...] avec essentiellement de l'illite, de la kaolinite et [...] de la montmorillonite.</p>	
3-Alluvions anciennes (Fw-x-y)	<p><b>Chambre d'Agriculture :</b> kaolinite et illite.</p> <p><b>Notice 388 :</b> Dans tous les faciès des alluvions anciennes, sur le fond illito-kaolinique hérité des altérites tertiaires, la vermiculite et/ou la montmorillonite l'emportent sur la chlorite</p> <p><b>Notice 419 :</b> les terrasses Fy sont constituées de kaolinite (60 %) et d'illite (40 %) ; les terrasses Fx sont constituées de kaolinite (60 à 70 %), d'illite (30 à 40 %) et de vermiculite (traces).</p>	
4-Dépôts complexes des plateaux (B)	<p><b>Chambre d'Agriculture :</b> soit de la kaolinite et de l'illite, soit un mélange de kaolinite, de illite et de smectite et/ou vermiculite, soit de la smectite et/ou vermiculite.</p> <p><b>Notice 451 :</b> kaolinite, illite, montmorillonite et interstratifiés.</p> <p><b>Notice 480 :</b> dominance de l'illite, accompagnée d'un peu de kaolinite.</p>	<p><b>Dépt. 37 :</b> Prédominance d'argile micacée et de kaolinite, parfois présence de smectite, de vermiculite, de chlorite et d'interstratifiés.</p> <p><b>Dépt 49 : Clément (1991) :</b> valeur moyenne : 70% de kaolinite, 5 % d'illite, 25 % d'interstratifiés (illite-smectite dont 6 % de smectites).</p> <p><b>Esteoule et al. (1972) :</b> fraction argileuse constituée par l'assemblage kaolinite - mica blanc et un ensemble complexe de minéraux à 14 Å essentiellement constitué de feuillets de type vermiculite dont certains gonflent irrégulièrement, auxquels s'ajoutent de petites quantités de chlorite et de chlorite-vermiculite. Les limons sur dépôts pliocènes montrent une proportion notable de minéraux argileux à 14 Å (smectites?) associée à l'assemblage kaolinite - argile micacée.</p>

Formation	Données minéralogiques dans la Loire-Atlantique	Données minéralogiques hors département
5-Colluvions de pente et de fond de vallon (C)	<p>Formation très hétérogène.</p> <p><b>Chambre d'Agriculture</b> : soit de la kaolinite et de l'illite, soit un mélange de kaolinite, d'illite et de smectite et/ou vermiculite.</p>	
6-Sables et graviers d'âge éocène et plio-quadernaire (ep-SG)	<p><b>Borne et al. (1989)</b> : présence constante de kaolinite dans les horizons argileux ; dans les niveaux supérieurs apparaît l'illite.</p> <p><b>Chambre d'Agriculture</b> : kaolinite et illite.</p> <p><b>Esteoule-Choux (1967)</b> : les argiles de Savenay, en lentilles dans les sables, sont composées uniquement de kaolinite.</p> <p><b>Notice 388</b> : argiles à dominance kaolinique.</p> <p><b>Notice 419</b> : kaolinite = 40 à 100 %, illite = 10 à 60 % et interstratifiés = 0 à 40 %.</p> <p><b>Notice 450</b> : argiles riches en kaolinite.</p> <p><b>Notice 507</b> : les lentilles d'argile grise, parfois intercalées dans les sables, sont essentiellement kaoliniques.</p> <p><b>Notice 509</b> : les argiles sont des kaolinites, secondairement des illites.</p>	
7- Sables et marnes sableuses du Miocène moyen au Pliocène (mp-SM)	<p><b>Borne et al. (1989)</b> : formations marines caractérisées par de la smectite.</p> <p><b>Chambre d'Agriculture</b> : soit un mélange de kaolinite, d'illite et de smectite et/ou vermiculite, soit de la kaolinite et de l'illite.</p> <p><b>Chevalier et Delanoë (1989)</b> : la fraction argileuse montre une forte dominance des smectites (environ 50 %). La kaolinite et l'illite sont accompagnées de minéraux micacés.</p> <p><b>Esteoule-Choux (1967)</b> : la fraction argileuse des sables rouges du Pliocène est constituée par l'assemblage illite – kaolinite. [...] la zone d'argile grise dans les sables pliocènes est constituée pour 90 % de montmorillonite et 10 % de kaolinite.</p> <p><b>Esteoule-Choux (1967)</b> : prépondérance de la montmorillonite dans les faluns.</p> <p><b>Fourniguet et Trautmann (1988)</b> : la fraction argileuse des sables pliocènes présente de l'illite en faible proportion (10 %), de la kaolinite en quantité plus importante (50 %) et des interstratifiés (illite-smectite) en proportion presque équivalente (40 %).</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T1)</b> : smectite = 23%, illite et/ou micas = 15 %, kaolinite = 62 %</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T2)</b> : smectite = 58 %, illite et/ou micas = 4 %, kaolinite = 38 %</p>	<p><b>Dépt 49 :</b></p> <p><b>Notice 456</b> : 10 à 25 % d'illite et 50 à 90 % de smectite.</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T7)</b> : 67 % d'interstratifiés smectite/illite à 48 % de smectite, 20 % d'illite et 13 % de kaolinite.</p>

Formation	Données minéralogiques dans la Loire-Atlantique	Données minéralogiques hors département
8 – Argiles d'âge éocène à pliocène (ep-A)	<p><b>Chevalier, Delanoë (1989)</b> : kaolinite, illite et smectites bien représentés. Le taux relatif de ces minéraux varie avec la profondeur : smectites prépondérantes à la base (80 %) remplacées en surface par l'illite.</p> <p><b>Esteoule-Choux (1967)</b> : montmorillonite dominante, kaolinite, mica (traces)</p> <p><b>Esteoule-Choux et al. (1986)</b> : fraction fine constituée par l'association kaolinite, argile micacée, smectite.</p> <p><b>Notice 388</b> : argiles riches en smectites.</p> <p><b>Notice 419</b> : 80 % de montmorillonite, 10 % d'illite et 10 % de kaolinite.</p> <p><b>Notice 420</b> : prédominance d'illite et smectite. Apparition d'attapulгите (70-80 %) vers 8 m de profondeur. [...] Composition minéralogique de l'argile : smectite 80 %, illite 20 %, kaolinite en traces.</p> <p><b>Notice 508</b> : composée surtout de smectites (70 %), associée à la kaolinite et à l'illite.</p>	
9-Calcaires de l'Éocène et de l'Oligocène (eg-CM)	<p><b>BRGM, 1984</b> : zone riche en attapulгите située au niveau des marais de Campbon.</p> <p><b>Esteoule-Choux (1967)</b> : calcaires stampiens renferment seulement des traces d'argile représentée par l'illite ou par l'association attapulгите-montmorillonite. Les niveaux franchement argileux et les marnes sont caractérisés par l'attapulгите.</p> <p><b>Notice 450</b> : certains de ces niveaux argileux sont riches en attapulгите.</p>	
10-Altérites indifférenciées du socle protérozoïque et paléozoïque (Alt)	<p><b>Chambre d'Agriculture</b> : kaolinite.</p> <p><b>Clément J.-P. (1984)</b> : Indice 44-1 : argile essentiellement kaolinique. A la base de la zone altérée, l'argile peut se charger en chlorite, montmorillonite et vermiculite ; Indice 44-4 : Argile illito-kaolinique (illite 60 %, kaolinite 20 %, quartz 20 %).</p> <p><b>Notice 388</b> : faciès ferro-kaoliniques ou kaolinisés.</p> <p><b>Notice 389</b> : altérites kaolinisés peu ou pas ferruginisés.</p> <p><b>Notice 420</b> : niveau kaolinique à la base du profil, reposant sur un substratum diversifié.</p> <p><b>Notice 421</b> : constituée de kaolinite et d'une argile micacée [...] argile blanche (kaolinite associée à du mica et à de la pyrophyllite) [...] surmontée par une argile verte (illite ouverte associée à une faible quantité de kaolinite).</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T11)</b> : smectite + vermiculite = 30 %, illite et/ou micas = 36 %, kaolinite = 34 %.</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T19)</b> : vermiculite = 8 %, illite et/ou micas = 23 %, kaolinite = 69 %</p>	<p><b>Dépt 49 :</b></p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T4)</b> : 75 % kaolinite, 22 % illite et/ou mica, 3 % vermiculite et/ou interstratifié vermiculite-chlorite.</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T5)</b> : 96 % kaolinite, 4 % illite et/ou mica, interstratifié en traces</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T18)</b> : 62 % kaolinite, 38 % illite, et smectite ou vermiculite en traces</p> <p><b>Notice 389</b> : altérites kaoliniques peu ou pas ferruginisés.</p> <p><b>Notice 483</b> : partie supérieure : kaolinite + illite/mica et/ou halloysite, la cristallinité de la kaolinite augmente vers le sommet ; partie médiane : kaolinite + vermiculite + illite + interstratifiés chlorite-vermiculite et chlorite-smectite et dans certains sondages smectite/kaolinite ; partie profonde : illite + chlorite + interstratifiés chlorite-vermiculite associés à la kaolinite, la vermiculite + localement des smectites.</p> <p><b>Notice 512</b> : argile de type kaolinite.</p>

Formation	Données minéralogiques dans la Loire-Atlantique	Données minéralogiques hors département
<p>11-Schistes et ampélites altérés d'âge briovérien à dévonien (SchAmp)</p>	<p><b>Chambre d'Agriculture</b> : soit un mélange de kaolinite, d'illite et de smectite et/ou vermiculite, soit de la kaolinite et de l'illite.</p> <p><b>Delfau et Le Berre (1981)</b> : <u>Indice 44-1</u> : schistes argileux d'Abbaretz, illite 60 %, kaolinite 20 % et quartz 20 %.</p> <p><b>Esteoule-Choux (1967)</b> :</p> <p><u>Schistes briovériens</u> : formation massive de kaolinite associée à du mica. Certaines zones d'altération montrent également la présence de chlorite gonflante, de montmorillonite et de vermiculite.</p> <p><u>Schistes cambriens</u> : argiles d'altération caractérisées par l'association de mica dominant, de kaolinite et de traces de chlorite.</p> <p><u>Schistes ordoviciens</u> : leur altération conduit à la formation d'argiles caractérisées par un mélange d'illite dominante, de kaolinite et de chlorite.</p> <p><u>Schistes siluriens</u> : fraction argileuse des schistes siluriens altérés est constituée d'illite et de kaolinite. La fraction argileuse des schistes noirs du Silurien est constituée d'illite et d'un peu de kaolinite et goethite.</p> <p><u>Schistes dévoniens</u> : argiles composées de kaolinite et de mica.</p> <p><b>Notice 420</b> : formation entièrement kaolinisée.</p>	
<p>12-Série altérée de la Formation de Frégréac (SchFég)</p>	<p><b>Chambre d'Agriculture</b> : kaolinite et illite.</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T14)</b> : vermiculite = 8 %, illite et/ou micas = 35 %, kaolinite = 57 %</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T15)</b> : smectite = 10 %, illite et/ou micas = 74 %, kaolinite = 16 %</p>	<p><b>Dépt 49</b> :</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T14)</b> : altérites schisto-gréseuses et volcaniques : 58 % interstratifié illite-smectite avec 52 % smectite, 40 % kaolinite, 2 % illite et/ou mica.</p>
<p>13-Schistes et grès altérés du Paléozoïque (SchGr)</p>	<p><b>Chambre d'Agriculture</b> : soit de la kaolinite et de l'illite, soit un mélange de kaolinite, d'illite et de smectite et/ou vermiculite, soit de la smectite et/ou vermiculite.</p> <p><b>Esteoule-Choux (1967)</b> : mélange d'illite et de chlorite avec quelques traces de goethite.</p> <p><b>Esteoule-Choux (1967)</b> : l'altération des grès conduit directement à la kaolinite, soit pure, soit associée à du mica.</p> <p><b>Notice 534</b> : localement kaolinisée.</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T7)</b> : smectite = 39 %, illite et/ou micas = 15 %, kaolinite = 46 %</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T8)</b> : vermiculite = 4 %, illite et/ou micas = 13 %, kaolinite = 83 %</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T10)</b> : interstratifié chlorite-smectite = 16 %, illite et/ou micas = 55 %, kaolinite = 29 %</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T12)</b> : vermiculite = 18 %, illite et/ou micas = 67 %, kaolinite = 15 %</p>	

Formation	Données minéralogiques dans la Loire-Atlantique	Données minéralogiques hors département
14 – Micaschistes altérés (kaolinisés du Protéro-Paléozoïque (Mick))	<p><b>Chambre d'Agriculture</b> : soit de la kaolinite, soit de la kaolinite et de l'illite.</p> <p><b>Clément (1984)</b> : argile essentiellement kaolinique. A la base de la zone altérée, au contact de la roche, l'argile peut se charger en chlorite, montmorillonite et vermiculite.</p> <p><b>Esteoule-Choux (1967) :</b>  <u>La Sennetière</u> : micaschistes transformés en argile gris-bleu micacée constituée par de la kaolinite associée à un mélange de chlorite et de mica.  <u>Vertou</u> : présence de kaolinite, mica et quartz.  <u>Ancenis</u> : au mica en voie d'altération s'ajoute soit une chlorite, soit une montmorillonite, soit enfin de la kaolinite.  <u>Saffré</u> : mica associé à une petite quantité de montmorillonite.  <u>Campbon</u> : chlorite associé à une petite quantité de kaolinite.</p>	
15- Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque (Mic)	<p><b>Chambre d'Agriculture</b> : soit de la kaolinite et de l'illite, soit un mélange de kaolinite, d'illite et de smectite et/ou vermiculite, soit de la smectite et/ou vermiculite.</p> <p><b>Esteoule-Choux (1967) :</b>  <u>Arthon</u> : argile bleue formée d'un mélange de montmorillonite avec des traces de kaolinite et de quartz.  <u>Savenay</u> : quantité non négligeable de montmorillonite.</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T3)*</b> : Illite et/ou micas = 16 %, kaolinite = 84 %  <b>Prélèvement SGR-PAL (T4)*</b> : Illite et/ou micas = 23 %, kaolinite = 77 %</p> <p><i>*N.B. : Micaschistes de Mesquer (Cf. Prélèvements T3 et T4) présentent probablement des placages d'Eocène, riches en smectite.</i></p> <p><b>Roy R. (2007)</b> : fraction argileuse ~ 14 %, Minéraux argileux : Kaolinite (fréquente à faible), vermiculite (faible), smectite (traces), interstratifié vermiculite/illite (fréquent à trace).</p>	
16-Argilites silteuses de l'Ordo-silurien (ArgSil)	<p><b>Chambre d'Agriculture</b> : kaolinite et illite.  <b>Sondage BSS n° 0420-8X-4003/GT</b> : kaolinite 83 %, mica 15 % et quartz 1 %.</p>	<p><b>ARG49 :</b>  <b>Prélèvement SGR-PAL (T6)</b> : 83 % mica, 12 % kaolinite, 5 % interstratifié smectite-chlorite.  <b>Prélèvement SGR-PAL (T21)</b> : 35 % kaolinite, 61 % illite et/ou mica, 4 % chlorite.</p>

Formation	Données minéralogiques dans la Loire-Atlantique	Données minéralogiques hors département
17-Siltites et grès altérés du Briovérien et de l'Ordovicien (SilGr)	<p><b>Chambre d'Agriculture</b> : kaolinite et illite.</p> <p><b>Notice 388</b> : pôles pélitiques à muscovite, chlorite, illite.</p> <p><b>Notice 389</b> : pélites plus ou moins silteuses et micacées, à chlorite, illite, quartz.</p> <p><b>Notice 420</b> : argilite silteuse faite d'un feutrage phylliteux très fin (chlorite, muscovite ou vermiculite).</p> <p><b>BRGM (1996)</b> : les argiles résultant de l'altération des schistes intermédiaires des grès armoricains sont essentiellement kaoliniques.</p>	
18-Granites et gneiss altérés du Paléozoïque (GGn)	<p><b>Chambre d'Agriculture</b> : soit un mélange de kaolinite, d'illite et de smectite et/ou vermiculite, soit de la smectite et/ou vermiculite.</p> <p><b>Delfau et Le Berre (1981)</b> :</p> <p><u>Indice 44-2</u> : kaolin de Guérande montre la présence de feldspath, de quartz ou de montmorillonite.</p> <p><b>Esteoule-Choux (1967)</b> : gneiss à Campbon est transformé en montmorillonite associée à une faible proportion de kaolinite.</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T18)</b> : smectite = 21 %, illite et/ou micas = 11 %, kaolinite = 68 %</p> <p><b>Roy (2007)</b> : fraction argileuse ~ 15 %, Minéraux argileux : kaolinite (faible), vermiculite et smectite (abondante à fréquente).</p>	
19-Granites et gneiss (kaolinisés) du Paléozoïque (GGnK)	<p><b>Chambre d'Agriculture</b> : soit un mélange de kaolinite, d'illite et de smectite et/ou vermiculite, soit de la kaolinite et de l'illite, soit de la kaolinite.</p> <p><b>Delfau et Le Berre (1981)</b> :</p> <p><u>Indice 44-3</u> : massif granitique de Nozay, kaolinite 83 %, mica 15 % et quartz 1 %.</p> <p><u>Indice 44-4</u> : kaolin provenant de gneiss quartzitiques granitisés.</p> <p><u>Indice 44-6</u> : granite du Bignon kaolinisé.</p> <p><b>Esteoule-Choux (1967)</b> : gneiss granulitique de Corcoué-sur-Logne montrent de la kaolinite et du quartz.</p> <p><b>Notice 420</b> : granite le plus souvent arenisé et kaolinisé.</p>	
20-Migmatites de la Formation de Muzillac (Mig)	<p><b>Chambre d'Agriculture</b> : kaolinite et illite.</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T5)</b> : smectite = 6 %, illite et/ou micas = 50 %, kaolinite = 44 %</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T6)</b> : smectite = 27 %, illite et/ou micas = 7 %, kaolinite = 66 %</p>	

Formation	Données minéralogiques dans la Loire-Atlantique	Données minéralogiques hors département
21- Amphibolites et gabbros du Paléozoïque (AmphGab)	<p><b>Chambre d'Agriculture</b> : soit de la vermiculite, soit un mélange de kaolinite, d'illite et de smectite et/ou vermiculite.</p> <p><b>Esteoule-Choux (1967)</b> :</p> <p><u>Altération amphibolites</u> : argile gonflante à laquelle s'ajoutent des traces de kaolinite. Cette argile gonflante a les caractères de la montmorillonite et présente une analogie avec les vermiculites. Il est également possible d'avoir un mélange de vermiculite et de chlorite gonflante.</p> <p><u>Altération gabbro</u> : formation massive de montmorillonite.</p> <p><b>Proust (1981)</b> : au sein d'une arène d'orthoamphibolite [...], l'altération d'une chlorite [...] donne naissance à un interstratifié chlorite-vermiculite [...] ou à une vermiculite.</p> <p><b>Roy (2007)</b> :</p> <p><u>Sol issu d'une amphibolite</u> : fraction argileuse ~ 10 %, Minéraux argileux : kaolinite (faible), vermiculite et smectite (fréquente)</p> <p><u>Sol issu d'un gabbro</u> : fraction argileuse ~ 28 %, Minéraux argileux : kaolinite (traces), vermiculite (faible) et smectite (abondante à traces).</p>	
22- Péridotites et serpentinites du Paléozoïque (PerSer)	<p><b>Delfau (1982)</b> : massifs de serpentinite de Donges : amas importants de vermiculite.</p> <p><b>Grès (1979)</b> : massif de péridotite de Donges : vermiculite et chlorite.</p> <p><b>Notice 450</b> : développement de zones réactionnelles à vermiculite.</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T16)</b> : smectite = 97 %, kaolinite = 3 %</p> <p><b>Prélèvement SGR-PAL (T17)</b> : smectite = 94 %, kaolinite + interstratifié kaolinite-smectite = ~5 %, talc possible : &lt;1 %.</p> <p><b>Roy (2007)</b> : fraction argileuse de 14 à 39 %, Minéraux argileux : kaolinite (fréquente), chlorite (faible), vermiculite.</p>	

Illustration 13 – Caractéristiques minéralogiques des formations argileuses de la Loire-Atlantique

N°	Code	Formation	Note minéralogique
1	Fz	Alluvions actuelles et récentes	1
2	MzT	Dépôts vaseux et tourbes	1
3	Fw-x-y	Alluvions anciennes	1
4	B	Dépôts complexes des plateaux	1
5	C	Colluvions de pente et de fond de vallon	2
6	ep-SG	Sables et graviers d'âge éocène et plio-quadernaire	1
7	mp-SM	Sables et marnes sableuses du Miocène moyen au Pliocène	3
8	ep-A	Argiles d'âge éocène à pliocène	3
9	eg-CM	Calcaires et marnes de l'Éocène et de l'Oligocène	2
10	Alt	Altérites indifférenciées du socle protérozoïque et paléozoïque	1
11	SchAmp	Schistes et ampélites altérés d'âge briovérien à dévonien	1
12	SchFég	Série altérée de la Formation de Fégréac	2
13	SchGr	Schistes et grès altérés du Paléozoïque	1
14	MicK	Micaschistes altérés (kaolinisés) du Protéro-Paléozoïque	1
15	Mic	Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque	2
16	ArgSil	Argillites silteuses de l'Ordo-silurien	1
17	SilGr	Siltites et grès altérés du Briovérien et de l'Ordovicien	1
18	GGn	Granites et gneiss altérés du Paléozoïque	2
19	GGnK	Granites et gneiss altérés (kaolinisés) du Paléozoïque	1
20	Mig	Migmatites altérées de la Formation de Muzillac	1
21	AmphGab	Amphibolites et gabbros altérés du Paléozoïque	3
22	Per-serp	Péridotites et serpentinites altérées du Paléozoïque	4

Illustration 14 – Notes minéralogiques affectées aux formations argileuses de la Loire-Atlantique

## 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  $\mu\text{m}$ ), et les analyses aux rayons X, permettant de distinguer le pourcentage de minéraux gonflants sont plus rarement réalisées ;

- caractériser l'état du sol, et notamment son état de dessiccation en effectuant des mesures de teneurs en eau, généralement à plusieurs profondeurs. En comparant ces valeurs avec les limites d'Atterberg du matériau, il est possible de savoir dans quel état de consistance se trouve le matériau *in situ* (état solide avec ou sans retrait, plastique ou liquide). D'autres essais peuvent également être mis en œuvre, comme la mesure du rapport de gonflement.

Seuls les résultats des essais correspondant aux caractéristiques intrinsèques du sol sont pris en compte dans le cadre de cette étude, puisqu'il s'agit de déterminer la susceptibilité au retrait-gonflement de chaque formation. En effet, les résultats des essais caractérisant l'état du matériau varient au cours du temps en fonction de l'humidité du sol : ils sont donc utiles aux experts, pour diagnostiquer les causes d'un sinistre et déterminer dans quel état se trouve le sol par rapport au niveau d'équilibre, mais ne sont pas pertinents pour caractériser la susceptibilité du matériau au retrait-gonflement.

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

Les principaux essais dont les résultats ont été ici utilisés pour caractériser le comportement géotechnique du matériau vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement sont la valeur de bleu, le retrait linéaire, et l'indice de plasticité. Ces essais sont présentés dans les paragraphes suivants, sachant que les deux essais les plus représentatifs de l'aptitude d'un sol au retrait-gonflement sont la valeur de bleu et le retrait linéaire.

#### **5.4.2. Teneur en eau ( $W_n$ )**

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 ( $I_p$ )

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 ( $W_L$ ) et la limite de plasticité ( $W_P$ ) 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 (Chassagneux *et al.*, 1995) que la susceptibilité d'une argile au retrait-gonflement varie en fonction de l'indice de plasticité  $I_p$  de la manière suivante (Illustration 15) :

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

Illustration 15 – Barème du critère géotechnique suivant l'indice de plasticité

### 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 NF P 18-592, AFNOR, 1993). 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.*, 1995) que la sensibilité d'un matériau argileux varie de la manière suivante en fonction de la valeur de bleu (Illustration 16). Ce paramètre permet, avec le concours avantageux des limites d'Atterberg, une analyse statistique du comportement au retrait-gonflement.

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 16 – Barème du critère géotechnique suivant la valeur de bleu

### 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 17).

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

Illustration 17 – Barème du critère géotechnique suivant le retrait linéaire

### 5.4.6. Caractérisation géotechnique

Les données géotechniques recueillies pour caractériser les formations argileuses et marneuses du département proviennent de différentes sources.

Elles résultent tout d'abord des rapports de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelles et surtout des études géotechniques réalisées dans le cadre d'expertises post-sinistres. Ces dossiers ont été collectés soit auprès des communes, soit auprès de la Caisse Centrale de Réassurance (CCR), soit auprès du service de protection civile de la préfecture de Loire-Atlantique, soit directement auprès des bureaux d'études (cf. annexe 3). Certains dossiers ont également été fournis par les assurances (MAIF principalement).

La seconde partie des données provient de l'exploitation des archives du Conseil Général de Loire-Atlantique, de la DDE et des Archives Départementales. Cofiroute, le Centre Technique de l'Équipement (CETE Ouest) et Fondasol ont également mis à disposition des études de sol réalisées principalement dans le cadre de construction de routes ou d'autoroutes. Les communes du département ont été en outre sollicitées par courrier pour recueillir des dossiers d'étude géotechnique réalisées avant la construction de bâtiments. Les données contenues dans la Banque des données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM ont été utilisées également.

Par ailleurs, un certain nombre de données sont directement issues de l'étude de cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles effectués dans le département voisin du Maine-et-Loire, notamment en ce qui concerne la formation 10 (*Altérites argileuses du socle protérozoïque et paléozoïque*).

Enfin, 9 échantillons ont été prélevés sur le terrain dans le département de Loire-Atlantique. Ils ont fait l'objet d'une caractérisation géotechnique (valeur au bleu de méthylène). Les résultats détaillés sont précisés en annexe 4.

L'ensemble de ces données est synthétisé dans le tableau de l'illustration 18.

Au total, 1247 données de caractérisation géotechnique (dont 1014 concernent effectivement des formations retenues comme argileuses) ont été exploitées.

- Pour l'indice de plasticité, 892 données ont permis la caractérisation des formations argileuses ;
- Pour la valeur de bleu, 122 données ont été utilisées ;

Aucune donnée de coefficient de gonflement ni de retrait linéaire n'a été recueillie.

Les données recueillies permettent ainsi de caractériser les 22 formations argileuses du département de Loire-Atlantique.

N°	Code	Formation	IP (%)					VBs (g/100 g)					Note géotech
			Nb	Moy	Min	Max	Ecart type	Nb	Moy	Min	Max	Ecart type	
1	Fz	Alluvions actuelles et récentes	49	35,7	9	117	25,9	6	4,2	0,6	9,8	4,3	3
2	MzT	Dépôts vaseux et tourbes	39	45,8	10	113	26,3						4
3	Fw-x-y	Alluvions anciennes	17	23,3	9	35	7,32	6	1,2	1,0	1,6	0,29	1
4	B	Dépôts complexes des plateaux	26	16,7	8	55	10,2	8	1,7	0,6	2,5	0,61	1
5	C	Colluvions de pente et de fond de vallon	30	17,5	8	67	12,1						1
6	ep-SG	Sables et graviers d'âge éocène et plio-quadernaire	1	34	34	34		1	2,6	2,6	2,6		2
7	mp-SM	Sables et marnes sableuses du Miocène moyen au Pliocène	98	21,5	7	75	12,6	5	2,1	0,7	6,1	2,3	2
8	ep-A	Argiles d'âge éocène à pliocène	0					2	1,8	1,4	2,1	0,6	1
9	eg-CM	Calcaires et marnes de l'Éocène et de l'Oligocène	2	38	26	50	17,0						2
10	Alt	Altérites indifférenciées du socle protérozoïque et paléozoïque	1 *11	21 *23,8	21 *9	21 *69		*82	*2,18	*0,3	*6,9		1
11	SchAmp	Schistes et ampélites altérés d'âge briovérien à dévonien	4	13,4	11	18,6	3,6						1
12	SchFég	Série altérée de la Formation de Fégréac	25	16,8	13	25	2,9	5	1,6	1,1	2	0,4	1
13	SchGr	Schistes et grès altérés du Paléozoïque	40	17,7	5,9	36	7,7	7	1,6	0,9	3,1	0,8	1
14	MicK	Micaschistes altérés (kaolinisés) du Protéro-Paléozoïque	229	16,7	8	38	5,4	22	1,7	0,2	6,6	1,7	1
15	Mic	Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque	10	25,3	7	98	28,0	10	3,5	0,5	9,8	3,3	3
16	ArgSil	Argilites silteuses de l'Ordo-silurien	19	16,9	8	38	6,5	2	0,6	0,3	1,0	0,5	1
17	SilGr	Siltites et grès altérés du Briovérien et de l'Ordovicien	60	14,4	8	24	3,4	5	1,4	1,0	2,2	0,5	1
18	GGn	Granites et gneiss altérés du Paléozoïque	3	30,3	21,6	34,7	7,5	1	2,8	2,8	2,8		2
19	GGnK	Granites et gneiss altérés (kaolinisés) du Paléozoïque	164	18,4	7	39	6,9	30	1,2	0,3	4,4	0,8	1
20	Mig	Migmatites altérées de la Formation de Muzillac	67	22,8	9	63	11,0	7	2,5	0,7	8	2,6	1
21	AmphGab	Amphibolites et gabbros altérés du Paléozoïque	7	15,1	11	23	4,2	3	5,6	4,5	6,8	1,2	3
22	Per-serp	Péridotites et serpentinites altérées du Paléozoïque	1	43	43	43		2	12,5	11,4	13,5	1,5	4
Total			892					122					

Illustration 18 – Tableau synthétique des données géotechniques de la Loire-Atlantique (\*Données issues du département voisin du Maine-et-Loire)

## 6. Élaboration de la carte de susceptibilité

### 6.1. DÉTERMINATION DU DEGRÉ DE SUSCEPTIBILITÉ

Au total, chaque formation a donc été caractérisée par trois notes, une pour chacun des critères pris en compte selon les classifications présentées précédemment. La moyenne des trois notes obtenues permet de calculer, pour chaque formation, un degré de susceptibilité générale vis-à-vis du retrait-gonflement.

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 :

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

Moyennant ce traitement, les notes de susceptibilité attribuées aux 22 formations retenues comme argileuses sont les suivantes (Illustration 19) :

N°	Code	Formation	Note lithologique	Note minéralogique	Note géotechnique	Moyenne	Note de susceptibilité
1	Fz	Alluvions actuelles et récentes	2	1	3	2,00	1
2	MzT	Dépôts vaseux et tourbes	4	1	4	3,00	2
3	Fw-x-y	Alluvions anciennes	1	1	1	1,00	1
4	B	Dépôts complexes des plateaux	1	1	1	1,00	1
5	C	Colluvions de pente et de fond de vallon	2	2	1	1,67	1
6	ep-SG	Sables et graviers d'âge éocène et plio-quatenaire	1	1	2	1,33	1
7	mp-SM	Sables et marnes sableuses du Miocène moyen au Pliocène	2	3	2	2,33	2
8	ep-A	Argiles d'âge éocène à pliocène	4	3	1	2,67	2
9	eg-CM	Calcaires et marnes de l'Éocène et de l'Oligocène	3	2	2	2,33	2
10	Alt	Altérites indifférenciées du socle protérozoïque et paléozoïque	2	1	1	1,33	1
11	SchAmp	Schistes et ampélites altérés d'âge briovérien à dévonien	2	1	1	1,33	1
12	SchFég	Série altérée de la Formation de Fégréac	2	2	1	1,67	1
13	SchGr	Schistes et grès altérés du Paléozoïque	1	1	1	1,00	1
14	MicK	Micaschistes altérés (kaolinisés) du Protéro-Paléozoïque	2	1	1	1,33	1
15	Mic	Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque	2	2	3	2,33	2
16	ArgSil	Argilites silteuses de l'Ordo-silurien	2	1	1	1,33	1
17	SilGr	Siltites et grès altérés du Briovérien et de l'Ordovicien	1	1	1	1,00	1
18	GGn	Granites et gneiss altérés du Paléozoïque	1	2	2	1,67	1
19	GGnK	Granites et gneiss altérés (kaolinisés) du Paléozoïque	1	1	1	1,00	1
20	Mig	Migmatites altérées de la Formation de Muzillac	1	1	1	1,00	1
21	AmphGab	Amphibolites et gabbros altérés du Paléozoïque	1	3	3	2,33	2
22	Per-serp	Péridotites et serpentinites altérées du Paléozoïque	2	4	4	3,33	3

Illustration 19 – Susceptibilité des formations argileuses retenues

## 6.2. CARTE DE SUSCEPTIBILITÉ

L'illustration 20 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 19.

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, orange et rouge) selon leur degré de susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement.

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

D'après la carte ainsi établie, près de 73 % de la surface du département apparaît comme susceptible au retrait-gonflement des argiles.

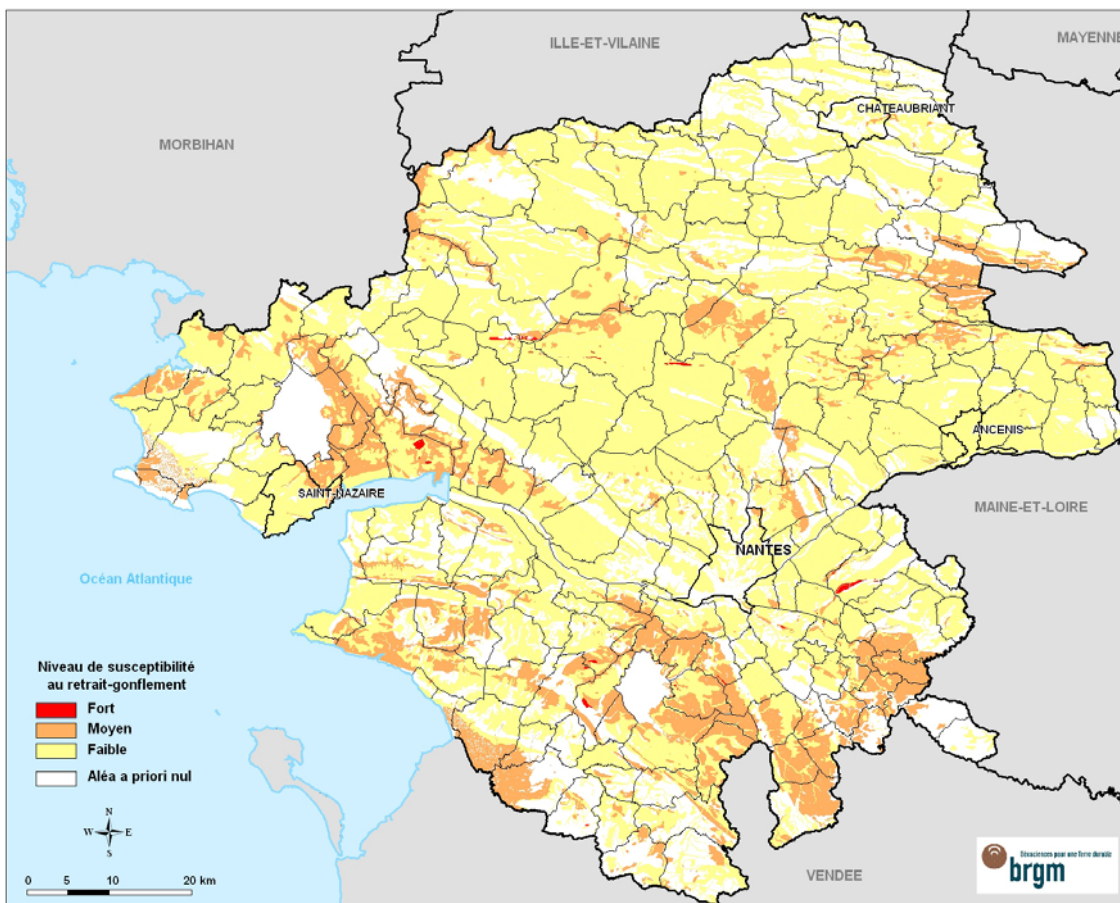


Illustration 20 – Carte départementale de susceptibilité au retrait-gonflement des sols argileux

### 6.3. SYNTHÈSE

Les formations jugées faiblement susceptibles couvrent environ 59,3 % de la superficie totale du département. Quinze formations ont été rattachées à cette catégorie, il s'agit des :

- 1- Alluvions actuelles et récentes (Fz)
- 3- Alluvions anciennes (Fw-x-y)
- 4- Dépôts complexes des plateaux (B)
- 5- Colluvions de pente et de fond de vallon (C)
- 6- Sables et graviers d'âge éocène et plio-quadernaire (ep-SG)
- 10- Altérites indifférenciées du socle protérozoïque et paléozoïque (Alt)
- 11- Schistes et ampélites altérés d'âge briovérien à dévonien (SchAmp)
- 12- Série altérée de la Formation de Fégréac (SchFég)
- 13- Schistes et grès altérés du Paléozoïque (SchGr)
- 14- Micaschistes altérés (kaolinisés) du Protéro-Paléozoïque (Mick)
- 16- Argilites silteuses de l'Ordo-silurien (ArgSil)
- 17- Siltites et grès altérés du Briovérien et de l'Ordovicien (SilGr)
- 18- Granites et gneiss altérés du Paléozoïque (GGn)
- 19- Granites et gneiss altérés (kaolinisés) du Paléozoïque (GGnK)
- 20- Migmatites altérées de la Formation de Muzillac (Mig)

Les formations moyennement susceptibles couvrent quant à elles environ 13,4 % de la superficie du département. Les six formations suivantes ont été rattachées à cette catégorie :

- 2- Dépôts vaseux et tourbes (MzT)
- 7- Sables et marnes sableuses du Miocène moyen au Pliocène (mp-SM)
- 8- Argiles d'âge éocène à pliocène (ep-A)
- 9- Calcaires et marnes de l'Éocène et de l'Oligocène (eg-CM)
- 15- Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque (Mic)
- 21- Amphibolites et gabbros altérés du Paléozoïque (AmphGab)

Une seule formation a été considérée comme fortement susceptible. Il s'agit de la formation 22 des *Péridotites et serpentinites altérées du Paléozoïque* (PerSer), laquelle ne couvre que 0,1 % de la superficie départementale.

Il est à noter que les formations *a priori* non argileuses n'occupent qu'environ 23,8 % de la surface du département, le réseau hydrographique couvrant pour sa part 3,4 % de la superficie départementale.





## 7. Analyse de la sinistralité

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

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

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

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

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

Depuis décembre 2000, l'analyse du contexte climatique est confiée à Météo-France et effectuée sur la base d'un suivi de l'état hydrique des sols. Celui-ci est calculé dans 92 stations de référence au moyen d'un modèle à double réservoir, sur la base d'une réserve utile de 200 mm, dont on suit le niveau de remplissage au pas de temps décennal. La comparaison de l'état hydrique des sols (qui dépend essentiellement des précipitations et de l'évapotranspiration) par rapport aux moyennes trentenales, permet d'identifier les périodes de sécheresse exceptionnelles qui ont d'abord été définies comme étant des périodes de quatre trimestres consécutifs pour lesquels la réserve en eau du sol est inférieure à la normale, avec au moins une décennie située au cours du premier trimestre (janvier à mars, période de recharge hivernale) où la réserve en eau est inférieure à 50 % de la normale. Ces critères ont été modifiés pour la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle concernant les sinistres survenus au cours de l'été 2003.

Les études menées en vue de la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ne sont habituellement réalisées que sur quelques cas de désordres de bâtis par

commune. L'ensemble des sinistres d'une commune est rarement pris en compte et il n'est pas rare qu'un seul sinistre permette de classer l'ensemble de la commune en état de catastrophe naturelle. Par ailleurs, dès lors qu'une commune a été reconnue une fois, il n'est pas exigé d'étude géotechnique supplémentaire pour définir une nouvelle période de reconnaissance.

En outre, ces études préalables sont généralement succinctes. Une visite de terrain permet notamment de réaliser un descriptif des sinistres, de noter les dates d'apparition des premiers désordres, d'observer la nature des terrains. L'examen de la carte géologique du BRGM à l'échelle du 1/50 000, complétée 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 constituent donc une première approche du problème. Après reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle dans la commune, des études plus approfondies sont généralement réalisées à la demande des compagnies d'assurance afin de déterminer le niveau de remboursement des dégâts et proposer des solutions de confortement. Les experts en charge de ces diagnostics font alors souvent appel à des bureaux d'études spécialisés pour réaliser des études géotechniques qui permettent de préciser l'origine des désordres. Ces études de sols ne sont cependant pas systématiques.

## **7.2. IDENTIFICATION DES COMMUNES SINISTRÉES**

### **7.2.1. Localisation des communes sinistrées**

Dans le département de Loire-Atlantique, à la date du 30 octobre 2008 (

Annexe 5), 36 communes ont été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle au titre de mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols, pour des périodes comprises entre mai 1989 et septembre 2005.

Les 36 communes reconnues représentent 16 % des 221 communes du département et couvrent 1315 km<sup>2</sup>, soit 19 % de sa superficie totale.

Au total, 19 arrêtés interministériels successifs reconnaissant l'état de catastrophe naturelle sécheresse ont été pris à ce jour dans le département de Loire-Atlantique, dont les dates s'échelonnent entre le 14 janvier 1992 et le 7 août 2008. Le nombre total d'occurrences reconnues, en distinguant par commune et par période, s'élève à 45. L'illustration 21 présente le nombre de communes concernées par les différents arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse au cours de cette période.

D'après les données disponibles en octobre 2008 sur le site internet [www.prim.net](http://www.prim.net) du MEEDDAT, ce nombre d'occurrences reconnues placerait le département à la 53<sup>e</sup> position des départements français les plus touchés, loin derrière certains du Sud-Ouest (1 395 occurrences reconnues en Haute-Garonne, 1 251 dans le Gers, 1 071 en Dordogne, par exemple). Si l'on se réfère au classement des départements français en

termes de coût d'indemnisation, la Loire-Atlantique occupait la 59<sup>e</sup> place en septembre 2008, avec un cumul indemnisé, dans le seul cadre du régime des catastrophes naturelles, estimé par la CCR à 2,5 millions d'euros en coûts actualisés.

Arrêté interministériel	Nombre de communes
14/01/1992	14
25/01/1993	7
06/12/1993	1
02/02/1998	1
12/03/1998	1
26/05/1998	1
12/06/1998	1
23/02/1999	1
19/05/1999	1
22/11/2005	3
09/01/2006	2
06/02/2006	1
30/03/2006	4
03/08/2006	1
10/11/2006	2
18/10/2007	1
20/02/2008	1
26/06/2008	1
07/08/2008	1

*Illustration 21 – Arrêtés interministériels et occurrences*

La liste des communes concernées est présentée en

Annexe 5, ainsi que les périodes de reconnaissance, les dates des arrêtés interministériels et les dates de leur publication au Journal Officiel. La carte de l'illustration 22 permet de localiser les 36 communes qui ont fait l'objet d'au moins un arrêté de reconnaissance à ce jour, ainsi que les sinistres recensés et localisés dans le cadre de la présente étude.

Cette carte illustre le caractère diffus du phénomène dans le département.

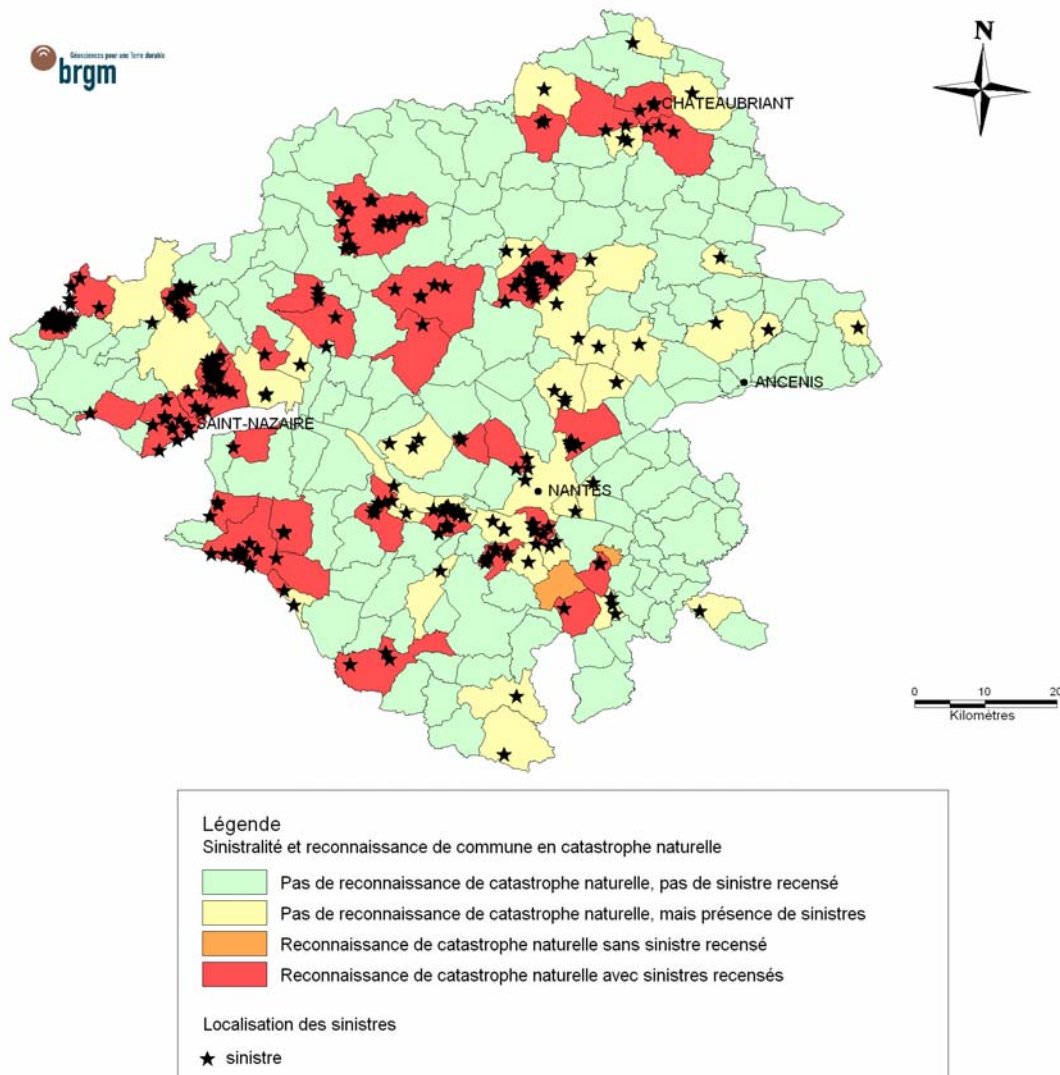
### **7.2.2. Analyse des périodes de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle**

Sept communes ont bénéficié de plusieurs arrêtés sécheresse. Il s'agit des communes de Châteaubriant et Saint-Aignan-de-Grand-Lieu (3 arrêtés), ainsi que les communes de Campbon, Mesquer, Rezé, Saffré, Saint-Aubin-des-Châteaux (2 arrêtés chacune). La commune de Châteaubriant a été reconnue de façon continue sur la période allant du 1<sup>er</sup> mai 1989 au 31 décembre 1997 par les deux premiers arrêtés. Le troisième arrêté porte sur la période du 1<sup>er</sup> juillet au 30 septembre 2003. La commune de Saint-Aignan-de-Grand-Lieu a été reconnue de façon continue du 1<sup>er</sup> janvier 1995 au 31 décembre 1996. Parmi les communes reconnues à deux reprises, celles de

Campbon et Saffré ont été reconnues pour les sécheresses de 1989-1990 et de 1996. Deux autres (Mesquer et Saint-Aubin-des-Châteaux) ont été reconnues pour les sécheresses de 1989-91 et de 2003. Enfin, la commune de Rezé a été reconnue pour les périodes de 1989-1991 et 2005. Les 29 autres communes n'ont été reconnues en état de catastrophe naturelle sécheresse qu'une seule fois chacune. Parmi elles, 18 ont été reconnues pour la sécheresse de 1989-1990, 1 pour la sécheresse de 1996 et 11 autres pour la sécheresse de 2003.

Le département a donc été marqué par les trois périodes de sécheresse enregistrées ces dernières années avec un impact manifestement plus marqué en 1989-90 et 2003 qu'en 1996.

Rappelons au passage qu'il existe, depuis septembre 2000, un système de modulation de franchise qui prévoit une augmentation de la franchise à chaque nouvel arrêté (compté désormais sur les 5 dernières années, suite à l'arrêté du 4 août 2003, et non plus depuis 1995 comme initialement), à défaut d'élaboration de documents de prévention de type Plans de Prévention des Risques naturels (PPR).



*Illustration 22 – Etat des reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle sécheresse et nombre de sinistres recensés et localisés par commune*

## **7.3. RECENSEMENT DES SINISTRES**

### **7.3.1. Collecte des données**

Le recensement des sinistres a été réalisé à partir de sources d'informations complémentaires, à savoir la consultation des dossiers de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle archivés au service départemental de défense et de protection civile (Préfecture de la Loire-Atlantique), à la Caisse centrale de réassurance (CCR), dans plusieurs bureaux d'études (Annexe 3) et assurances (MAIF principalement), ainsi que d'une enquête auprès des 221 communes du département. Sur les 344 sinistres recensés, 343 ont pu faire l'objet d'une localisation avec un degré de précision jugé satisfaisant, un seul n'ayant pu être localisé.

L'enquête effectuée auprès des communes s'est faite par envoi d'un courrier, accompagné d'une lettre circulaire du Préfet de la Loire-Atlantique, aux 221 maires. Les courriers ont été envoyés depuis le Service Géologique Régional des Pays de la Loire du BRGM en mai 2007. Une première relance par téléphone a été faite dans le courant de l'été 2007 auprès des mairies qui n'avaient pas répondu à l'enquête. D'autres relances ont ensuite été effectuées par voie téléphonique et par voie postale, plus ciblées cette fois auprès des communes où le BRGM avait eu la connaissance de sinistre(s) par d'autres sources (préfecture, CCR..). Le taux de réponse final atteint 62 % pour l'ensemble des communes, 89 % pour les communes reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle. Environ 90 communes se déclarent non concernées. Par ailleurs, quelques sinistres déclarés n'ont finalement pas été retenus car leur origine n'était manifestement pas liée au retrait-gonflement des argiles. Quatre communes ayant bénéficié d'une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse n'ont pas répondu à l'enquête.

### **7.3.2. Bilan**

Finalement, 344 sinistres ont été recensés, répartis dans 71 communes du département. La localisation des sinistres a été effectuée sur fonds topographiques de l'IGN à 1/25 000. Ce travail a été réalisé grâce aux plans de localisation (renvoyés par les communes, figurant dans les dossiers préfectoraux ou dans les dossiers d'expertise sécheresse), ainsi que par la consultation des sites internet [www.maporama.fr](http://www.maporama.fr), [www.viamichelin.fr](http://www.viamichelin.fr), [www.pagesjaunes.fr](http://www.pagesjaunes.fr) et du cadastre en ligne.

Le nombre de sinistres par commune est très variable : 58 (soit 82 %) des 71 communes concernées comptent seulement 1 à 5 sinistres. Quatre communes concentrent près de 40 % des sinistres du département : Mesquer (44), Saffré (39), Saint-Malo-de-Guersac (27) et Plessé (23). Enfin 5 autres communes totalisent 10 sinistres recensés ou plus : Saint-Jean-de-Boiseau (17), Pornic (17), La Chapelle-des-Marais (16), Saint-Nazaire (15) et Saint-Aignan-de-Grandlieu (10).

D'un point de vue géographique, les sinistres se répartissent dans l'ensemble du département (Illustration 23), de manière assez inégale comme en témoignent les

zones de concentrations (cf. communes listées ci-dessus). Des corrélations étroites ressortent avec certaines formations géologiques.

La liste des sinistres avec leurs coordonnées en projection Lambert II étendu est présentée en

Annexe 5. Pour des raisons de confidentialité, les noms et adresses des sinistrés ne figurent pas dans ce tableau.

L'examen des études réalisées après sinistres indique que 96,5 % des sinistres localisés (331 sur 343) sont répartis sur les formations retenues comme argilo-marneuses, ces dernières occupant il est vrai 73 % de la surface du département (Illustration 23).

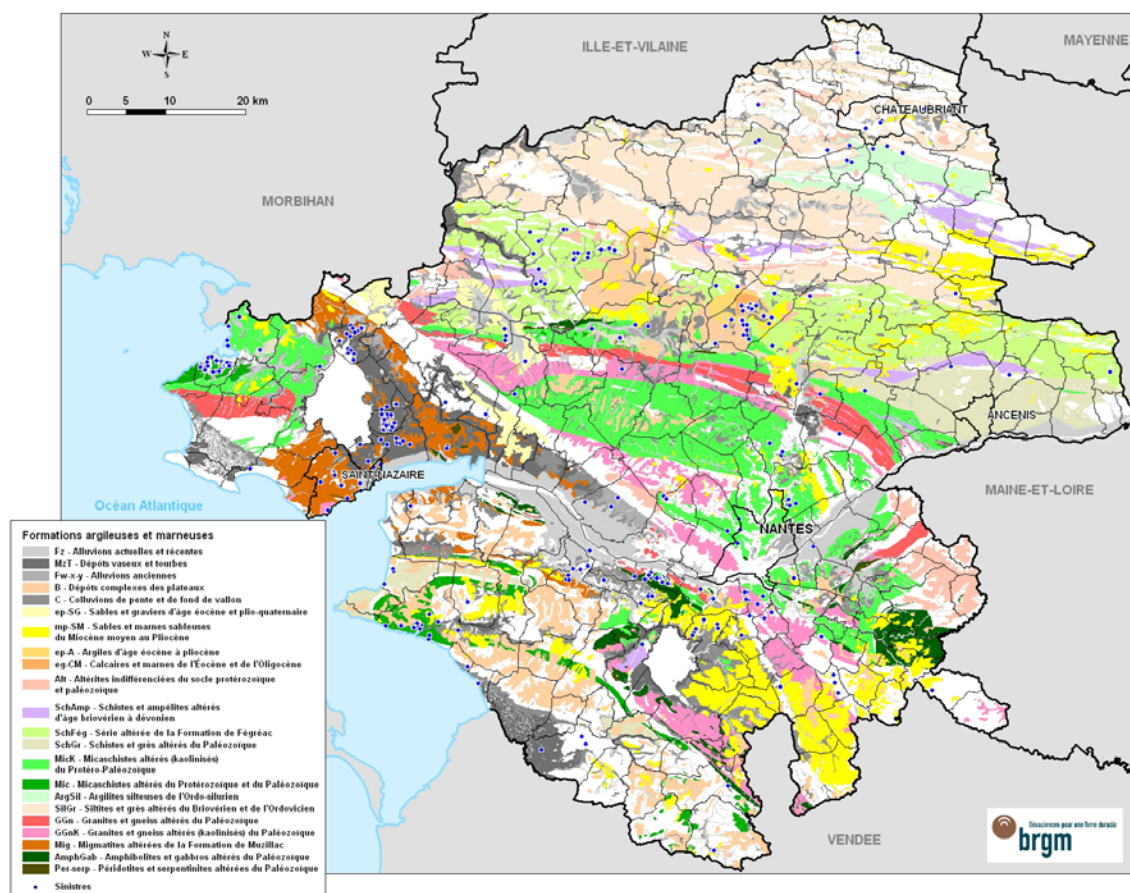


Illustration 23 – Répartition géologique des sinistres recensés et localisés

12 sinistres ne concernent *a priori* pas des formations argilo-marneuses. Il n'est pas exclu que ces derniers soient liés à des niveaux d'altération non cartographiés du substratum (altérites), ou bien encore à d'autres causes que le phénomène de retrait-gonflement.

Rappelons en effet que certaines formations considérées comme *a priori* non argileuses peuvent contenir localement des lentilles ou des placages d'argiles non cartographiés. Ceci concerne notamment des colluvions superficielles ou des altérites de socle. Par ailleurs, il peut arriver que des sinistres attribués au retrait-gonflement des argiles soient dus en réalité à d'autres phénomènes (tassement de remblais ou de

sols compressibles, fluages sur des colluvions instables, défauts de construction, choc thermique sur les enduits de façade, etc.). Enfin, il est possible que certains contours de formations géologiques puissent être localement inexacts ou que des sinistres soient mal localisés.

Parmi les formations retenues comme argileuses au sens large, 13 présentent chacune plus de 10 sinistres. Il faut cependant noter que plusieurs de ces formations affleurent largement sur le département, ce qui traduit en réalité une (très) faible densité de sinistres de ces formations. Il s'agit notamment des formations suivantes :

- 1- Alluvions récentes et actuelles
- 4- Dépôts complexes des plateaux
- 5- Colluvions de pente et de fond de vallon
- 14-Micaschistes altérés (kaolinisés) du Protéro-Paléozoïque

Parmi les formations argilo-marneuses, une seule ne compte aucun sinistre recensé à ce jour. Il s'agit de la formation 22- *Péridotites et serpentinites altérées du Paléozoïque*. Il faut cependant noter que cette formation n'affleure que très peu dans le département (sur quelques kilomètres carrés seulement).

### **7.3.3. Cas particulier des communes reconnues catastrophe naturelle**

L'illustration 22 démontre que les 36 communes reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle sécheresse sont inégalement concernées par le phénomène. Parmi les communes reconnues en état de catastrophe naturelle, deux ne présenteraient même aucun sinistre recensé au vu des informations recueillies.

Les dossiers dépouillés à la CCR et à la préfecture comportent parfois des différences notables avec les réponses des communes reconnues en état de catastrophe naturelle. Ils reflètent en effet les déclarations préliminaires des sinistrés, mais certains de ces derniers abandonnent leurs démarches en cours ou n'en tiennent pas informée la mairie. Inversement, une fois la commune reconnue en état de catastrophe naturelle, il arrive que de nouveaux propriétaires déclarent un sinistre à leur assurance, sans nécessairement en avertir la mairie qui n'est alors plus concernée par la procédure.

On peut remarquer cependant que les informations se complètent selon les sources, ce qui confirme la nécessité de procéder à un recensement des maisons sinistrées par divers moyens en parallèle.

## **7.4. FRÉQUENCE D'OCCURRENCE RAPPORTÉE A 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 km<sup>2</sup> 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 peut donc biaiser l'analyse sur les densités de sinistres par



formation. En effet, une formation géologique s'étendant principalement en milieu rural peu bâti sera nécessairement moins touchée qu'une formation aussi susceptible mais très urbanisée. C'est pourquoi les densités de sinistres par formation géologique ont été rapportées à 100 km<sup>2</sup> de surface effectivement urbanisée, 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, issues de la BD Topo de l'IGN (communiquée pour les besoins de l'étude par la DDE), ont été superposés à la carte synthétique des formations argileuses et marneuses. Ceci a permis de calculer, pour chacune des 22 formations retenues, la surface d'affleurement qui se trouve être réellement urbanisée. Ces contours sont donnés à titre indicatif et peuvent présenter quelques décalages avec la réalité, notamment dans les secteurs urbanisés très récemment.

La surface totale des zones urbanisées du département a été ainsi estimée à 97 km<sup>2</sup>, soit environ 1,4 % de la superficie totale (Illustration 24).

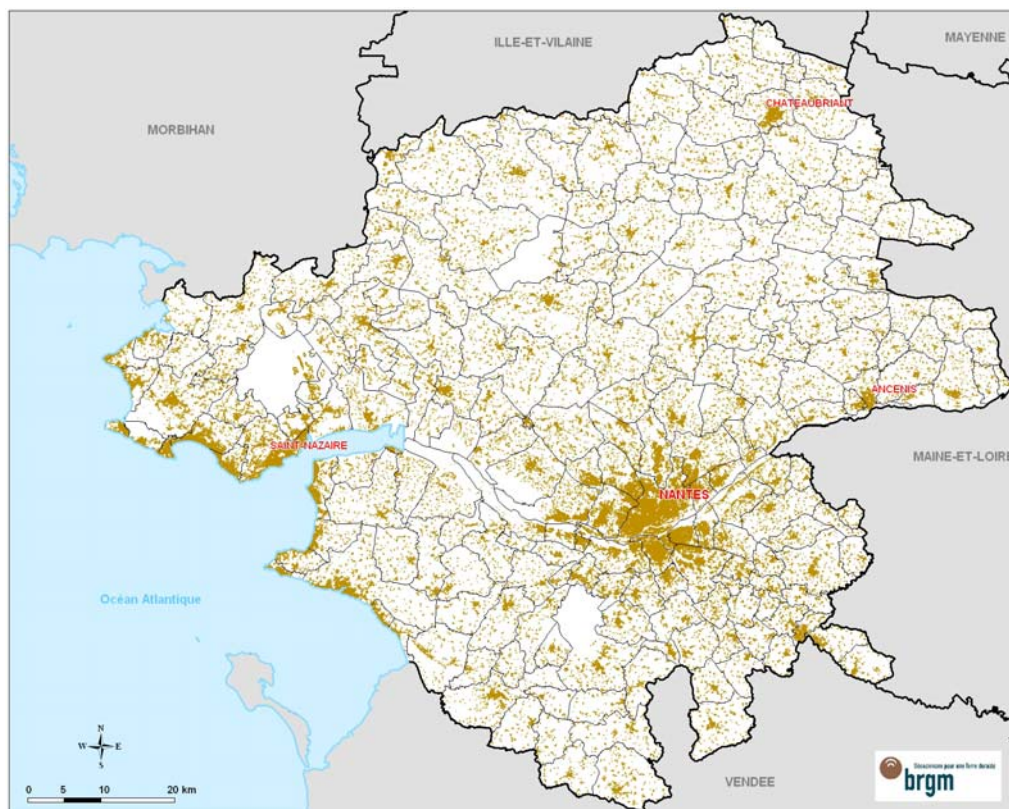


Illustration 24 – Zones urbanisées en Loire-Atlantique (source BD Topo IGN)

La superposition de la carte synthétique des formations argileuses et marneuses avec celle des zones urbanisées permet d'estimer la surface totale occupée par les zones urbanisées dans les formations retenues à 65 km<sup>2</sup>, soit environ 1,3 % de leur surface totale d'affleurement. Les surfaces urbanisées et le nombre de sinistres recensés sont indiqués pour chaque formation dans le tableau de l'illustration 25.

N°	Formations argilo-marneuses	Affleurement		Sinistres		Urbanisation	
		Superficie (km²)	% affleurement	Nombre de sinistres	% sinistres	Surface bâtie (km²)	Taux de surface bâtie
1	Alluvions actuelles et récentes	517,8	7,5%	19	5,5%	3,34	3,4%
2	Dépôts vaseux et tourbes	284,4	4,1%	19	5,5%	1,79	1,8%
3	Alluvions anciennes	115,6	1,7%	19	5,5%	2,72	2,8%
4	Dépôts complexes des plateaux	392,9	5,7%	21	6,1%	2,82	2,9%
5	Colluvions de pente et de fond de vallon	365,3	5,3%	18	5,2%	4,24	4,4%
6	Sables et graviers d'âge éocène et plio-quadernaire	65,3	0,9%	5	1,5%	0,62	0,6%
7	Sables et marnes sableuses du Miocène moyen au Pliocène	452,3	6,5%	36	10,5%	5,79	6,0%
8	Argiles d'âge éocène à pliocène	17,1	0,2%	5	1,5%	0,08	0,1%
9	Calcaires et grès de l'Éocène et de l'Oligocène	7,9	0,1%	15	4,4%	0,12	0,1%
10	Altérites indifférenciées du socle protérozoïque et paléozoïque	123,6	1,8%	4	1,2%	0,99	1,0%
11	Schistes et ampélites altérés d'âge briovérien à dévonien	94,2	1,4%	2	0,6%	0,65	0,7%
12	Série altérée de la Formation de Fégréac	398,5	5,8%	25	7,3%	2,83	2,9%
13	Schistes et grès altérés du Paléozoïque	289,0	4,2%	10	2,9%	4,12	4,3%
14	Micaschistes altérés (kaolinisés) du Protéro-Paléozoïque	558,1	8,1%	13	3,8%	13,77	14,2%
15	Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque	73,4	1,1%	37	10,8%	1,59	1,6%
16	Argilites silteuses de l'Ordo-silurien	83,4	1,2%	4	1,2%	0,55	0,6%
17	Siltites et grès altérés du Briovérien et de l'Ordovicien	532,6	7,7%	3	0,9%	3,60	3,7%
18	Granites et gneiss altérés du Paléozoïque	130,0	1,9%	1	0,3%	1,95	2,0%
19	Granites et gneiss altérés (kaolinisés) du Paléozoïque	268,5	3,9%	9	2,6%	6,41	6,6%
20	Migmatites altérées de la Formation de Muzillac	164,3	2,4%	48	14,0%	5,21	5,4%
21	Amphibolites et gabbros altérés du Paléozoïque	92,7	1,3%	18	5,2%	2,09	2,2%
22	Péridotites et serpentinites altérées du Paléozoïque	7,5	0,1%	0	0,0%	0,07	0,1%
<b>Total formations argileuses</b>		<b>5 034,4</b>	<b>72,8%</b>	<b>331</b>	<b>96,5%</b>	<b>65,3</b>	<b>67,4%</b>
Formations a priori non argileuses		1 641,2	23,7%	12	3,5%	31,56	32,6%
Réseau hydrographique		235,2	3,4%	0	0,0%	0,00	0,0%
<b>TOTAL DEPARTEMENT</b>		<b>6 910,9</b>	<b>100%</b>	<b>343</b>	<b>100%</b>	<b>96,9</b>	<b>100%</b>

Illustration 25 – Taux d'urbanisation et nombre de sinistres par formation

#### 7.4.2. Détermination du critère densité de sinistres

Comme précisé précédemment, les densités de sinistres par formation géologique (illustration 26) ont été calculées en prenant en compte la surface urbanisée de la formation. La prise en compte du taux d'urbanisation modifie en effet 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.

La densité ainsi calculée est en moyenne pour les formations retenues comme argileuses de 1 400 sinistres pour 100 km² d'affleurement réellement bâti.

Les formations présentant une sinistralité particulièrement élevée (plus de 1 400 sinistres pour 100 km² d'affleurement bâti) sont les suivantes :

- 8- Argiles d'âge éocène à pliocène (5 915)
- 9- Calcaires et marnes de l'Éocène et de l'Oligocène (12 938)
- 15- Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque (2 325)

Afin de hiérarchiser les formations argileuses selon leur degré de sinistralité, les coupures suivantes ont été retenues pour l'attribution de notes caractérisant la sinistralité :

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

- note 3 : plus de 3 000 sinistres pour 100 km<sup>2</sup> de surface bâtie dans la formation.

Deux formations obtiennent ainsi une note de densité de sinistres de 3 : les *Argiles d'âge éocène à pliocène* et les *Calcaires et marnes de l'Éocène et de l'Oligocène*. Deux autres formations reçoivent une note de sinistralité moyenne (les *Dépôts vaseux et tourbes*, et les *Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque*). Toutes les autres formations argileuses du département sont caractérisées par une sinistralité faible au vu des éléments recueillis.

Il est à noter que la formation 22 (*Péridotites et serpentinites altérées du Protérozoïque*) n'a pas été caractérisée par une note de sinistralité car la densité de sinistres calculée sur la base des données recueillies n'a pas été jugée significative. Aucun sinistre n'a été déclaré sur cette formation mais l'extension géographique des zones bâties y est particulièrement faible (0,07 km<sup>2</sup>, ce qui correspond à quelques centaines de maisons seulement), de telle sorte que la probabilité d'occurrence de sinistres est nécessairement faible. Mais un seul sinistre survenu sur cette formation ferait d'emblée passer la densité de sinistres de 0 à plus de 1 400. C'est pourquoi il est jugé préférable, conformément à la démarche adoptée pour les autres cartes d'aléa déjà établie avec la même méthodologie, de ne pas attribuer de note de sinistralité à cette formation et d'afficher comme niveau d'aléa la même classe que celle caractérisant sa susceptibilité.

N°	Formations argilo-marneuses	Nombre de sinistres	Surface bâtie (km <sup>2</sup> )	Densité de sinistre pour 100 km <sup>2</sup> de formation argileuse bâtie	Note de densité de sinistres
1	Alluvions actuelles et récentes	19	3,34	569,5	1
2	Dépôts vaseux et tourbes	19	1,79	1 063,0	2
3	Alluvions anciennes	19	2,72	698,5	1
4	Dépôts complexes des plateaux	21	2,82	743,5	1
5	Colluvions de pente et de fond de vallon	18	4,24	424,2	1
6	Sables et graviers d'âge éocène et plio-quatenaire	5	0,62	809,0	1
7	Sables et marnes sableuses du Miocène moyen au Pliocène	36	5,79	621,5	1
8	Argiles d'âge éocène à pliocène	5	0,08	5 914,6	3
9	Calcaires et marnes de l'Éocène et de l'Oligocène	15	0,12	12 938,0	3
10	Altérites indifférenciées du socle protérozoïque et paléozoïque	4	0,99	406,1	1
11	Schistes et ampélites altérés d'âge briovérien à dévonien	2	0,65	309,1	1
12	Série altérée de la Formation de Fégréac	25	2,83	883,2	1
13	Schistes et grès altérés du Paléozoïque	10	4,12	242,8	1
14	Micaschistes altérés (kaolinisés) du Protéro-Paléozoïque	13	13,77	94,4	1
15	Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque	37	1,59	2 325,4	2
16	Argilites silteuses de l'Ordo-silurien	4	0,55	731,8	1
17	Siltites et grès altérés du Briovérien et de l'Ordovicien	3	3,60	83,3	1
18	Granites et gneiss altérés du Paléozoïque	1	1,95	51,3	1
19	Granites et gneiss altérés (kaolinisés) du Paléozoïque	9	6,41	140,4	1
20	Migmatites altérées de la Formation de Muzillac	48	5,21	921,4	1
21	Amphibolites et gabbros altérés du Paléozoïque	18	2,09	861,8	1
22	Péridotites et serpentinites altérées du Paléozoïque	0	0,07	0,0	NS
<b>Total formations argileuses</b>		331	65,3	1 401,5	
Formations a priori non argileuses		12	31,56	38,0	
Réseau hydrographique		0	0,00	0,0	
<b>TOTAL DEPARTEMENT</b>		343	96,9	1 286,3	

<= moyenne de densité de sinistres

Illustration 26 – Sinistralité (densité de sinistres par formation argileuse)



## 8. Carte d'aléa

### 8.1. DÉTERMINATION DU NIVEAU D'ALÉA

L'aléa retrait-gonflement des argiles est, par définition, la probabilité d'occurrence du phénomène. Le niveau d'aléa a été ici évalué de manière purement qualitative, pour chaque formation argileuse et marneuse, 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 peut prendre la valeur 1, 2 ou 3.

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

Étant donné que la susceptibilité des formations géologiques a été définie en se basant sur trois critères différents (lithologique, minéralogique et géotechnique) et qu'elle représente une caractéristique intrinsèque de la formation, il a été décidé d'accorder deux fois plus de poids à l'indice de susceptibilité qu'à la note de densité de sinistres, ceci conformément à la méthodologie retenue au niveau national.

Pour chaque formation argileuse ou marneuse, on calcule donc un indice d'aléa en additionnant la note de 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 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.

Le classement ainsi obtenu est présenté sur le tableau de l'illustration 27. Une seule formation, celle des *Péridotites et serpentinites altérées du Paléozoïque* (22). Est ainsi considérée en aléa fort vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement, du fait d'une forte susceptibilité associée à une sinistralité non caractérisée. Cette formation ne couvre que 0,11 % de la superficie départementale totale (Illustration 28).

Quatre formations sont classées en aléa moyen. Toutes résultent d'une susceptibilité moyenne associée à une densité de sinistres moyenne à forte : les *Dépôts vaseux et tourbes* (2), les *Argiles d'âge éocène à pliocène* (8), les *Calcaires et marnes de l'Éocène et de l'Oligocène* (9), et les *Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque* (15). Ces quatre formations couvrent 5,54 % de la superficie départementale.

N°	Formations argilo-marneuses	Note de susceptibilité	Note de sinistralité	Indice d'aléa	Niveau d'aléa
1	Alluvions actuelles et récentes	1	1	3	Faible
2	Dépôts vaseux et tourbes	2	2	6	Moyen
3	Alluvions anciennes	1	1	3	Faible
4	Dépôts complexes des plateaux	1	1	3	Faible
5	Colluvions de pente et de fond de vallon	1	1	3	Faible
6	Sables et graviers d'âge éocène et plio-quadernaire	1	1	3	Faible
7	Sables et marnes sableuses du Miocène moyen au Pliocène	2	1	4	Faible
8	Argiles d'âge éocène à pliocène	2	3	8	Moyen
9	Calcaires et marnes de l'Éocène et de l'Oligocène	2	3	8	Moyen
10	Altérites indifférenciées du socle protérozoïque et paléozoïque	1	1	3	Faible
11	Schistes et ampélites altérés d'âge briovérien à dévonien	1	1	3	Faible
12	Série altérée de la Formation de Fégréac	1	1	3	Faible
13	Schistes et grès altérés du Paléozoïque	1	1	3	Faible
14	Micaschistes altérés (kaolinisés) du Protéro-Paléozoïque	1	1	3	Faible
15	Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque	2	2	6	Moyen
16	Argilites silteuses de l'Ordo-silurien	1	1	3	Faible
17	Siltites et grès altérés du Briovérien et de l'Ordovicien	1	1	3	Faible
18	Granites et gneiss altérés du Paléozoïque	1	1	3	Faible
19	Granites et gneiss altérés (kaolinisés) du Paléozoïque	1	1	3	Faible
20	Migmatites altérées de la Formation de Muzillac	1	1	3	Faible
21	Amphibolites et gabbros altérés du Paléozoïque	2	1	4	Faible
22	Péridotites et serpentinites altérées du Paléozoïque	3	NS	-	Fort

Illustration 27 – Niveau d'aléa des formations

Les autres formations, au nombre de 17 et couvrant au total 67,20 % de la superficie départementale, sont considérées comme présentant un aléa faible. Elles résultent toutes d'une susceptibilité faible à moyenne assortie d'une sinistralité faible.

L'ensemble des formations argileuses potentiellement sujettes au phénomène de retrait-gonflement couvre ainsi 72,85 % de la superficie départementale totale, même si seulement 5,65 % de cette superficie est exposé à un aléa moyen à fort, pour lequel des mesures de prévention sont particulièrement justifiées.

Il est néanmoins important de garder en tête que cette analyse reflète l'état actuel des connaissances quant à la nature lithologique des formations affleurantes à sub-affleurantes, telle qu'issue pour l'essentiel des cartes géologiques actuellement disponibles. Il est ainsi probable qu'une cartographie plus poussée des formations superficielles et en particulier des altérites du socle, conduite de manière homogène à l'échelle départementale, permettrait, en précisant l'extension des couvertures d'altérites argileuses, de corriger significativement ce résultat. On note en effet que les *Amphibolites et gabbros altérés du Paléozoïque*, et dans une moindre mesure la *Série altérée de la Formation de Fégréac*, présentent un nombre significatif de sinistres, ce qui laisse penser qu'une cartographie plus précise des argiles conduirait probablement à revoir localement le niveau d'aléa de certains secteurs de ces formations. Par ailleurs, des variations de composition minéralogique des argiles peuvent se produire au sein des altérites (ceci semble être le cas notamment des *Migmatites altérées de la Formation de Muzillac*), ce qui pourrait aussi expliquer certaines concentrations locales de sinistres.

N°	Code	Formation	Superficie (km <sup>2</sup> )	% surface département	Niveau d'aléa
22	Per-serp	Péridotites et serpentinites altérées du Paléozoïque	7,52	0,11%	Fort
<b>Total aléa fort</b>			7,52	0,11%	
2	MzT	Dépôts vaseux et tourbes	284,42	4,12%	Moyen
8	ep-A	Argiles d'âge éocène à pliocène	17,08	0,25%	Moyen
9	eg-CM	Calcaires et marnes de l'Éocène et de l'Oligocène	7,92	0,11%	Moyen
15	Mic	Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque	73,42	1,06%	Moyen
<b>Total aléa moyen</b>			382,84	5,54%	
1	Fz	Alluvions actuelles et récentes	517,85	7,49%	Faible
3	Fw-x-y	Alluvions anciennes	115,65	1,67%	Faible
4	B	Dépôts complexes des plateaux	392,92	5,69%	Faible
5	C	Colluvions de pente et de fond de vallon	365,26	5,29%	Faible
6	ep-SG	Sables et graviers d'âge éocène et plio-quadernaire	65,31	0,95%	Faible
7	mp-SM	Sables et marnes sableuses du Miocène moyen au Pliocène	452,28	6,54%	Faible
10	Alt	Altérites indifférenciées du socle protérozoïque et paléozoïque	123,57	1,79%	Faible
11	SchAmp	Schistes et ampélites altérés d'âge briovérien à dévonien	94,21	1,36%	Faible
12	SchFég	Série altérée de la Formation de Fégréac	398,50	5,77%	Faible
13	SchGr	Schistes et grès altérés du Paléozoïque	288,97	4,18%	Faible
14	MicK	Micaschistes altérés (kaolinisés) du Protéro-Paléozoïque	558,07	8,08%	Faible
16	ArgSil	Argilites silteuses de l'Ordo-silurien	83,41	1,21%	Faible
17	SilGr	Siltites et grès altérés du Briovérien et de l'Ordovicien	532,63	7,71%	Faible
18	GGn	Granites et gneiss altérés du Paléozoïque	130,01	1,88%	Faible
19	GGnK	Granites et gneiss altérés (kaolinisés) du Paléozoïque	268,47	3,88%	Faible
20	Mig	Migmatites altérées de la Formation de Muzillac	164,25	2,38%	Faible
21	AmphGab	Amphibolites et gabbros altérés du Paléozoïque	92,72	1,34%	Faible
<b>Total aléa faible</b>			4 644,08	67,20%	
0	Formation <i>a priori</i> non argileuse		1 641,2	23,75%	
999	Réseau hydrographique		235,2	3,40%	
<b>Total aléa a priori nul</b>			1 876,44	27,15%	
<b>Total département</b>			6 910,9		

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 ou marneuse, en attribuant à chacune des formations identifiées la classe d'aléa définie ci-dessus. Elle est présentée sur l'illustration 29 et en carte hors-texte à l'échelle 1/125 000 (où les sinistres, les zones urbanisées et les contours des communes sont également reportés). Son échelle de validité est le 1/50 000, puisque les contours sont issus des cartes géologiques éditées à cette même échelle.

Les formations retenues sont représentées par couleurs (jaune, orange et rouge) correspondant à leur niveau d'aléa retrait-gonflement (respectivement faible, moyen et fort). Les zones blanches de la carte correspondent aux formations *a priori* non argileuses, et donc théoriquement dépourvues de tout aléa. Elles couvrent 27,15 % 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 existe quelques discontinuités des tracés au niveau de la jonction entre la carte d'aléa de la Loire-Atlantique et celle du département limitrophe du Maine-et-Loire. Ces discontinuité correspondent à celles mentionnées au niveau de la carte des formations argileuses (§4.5).

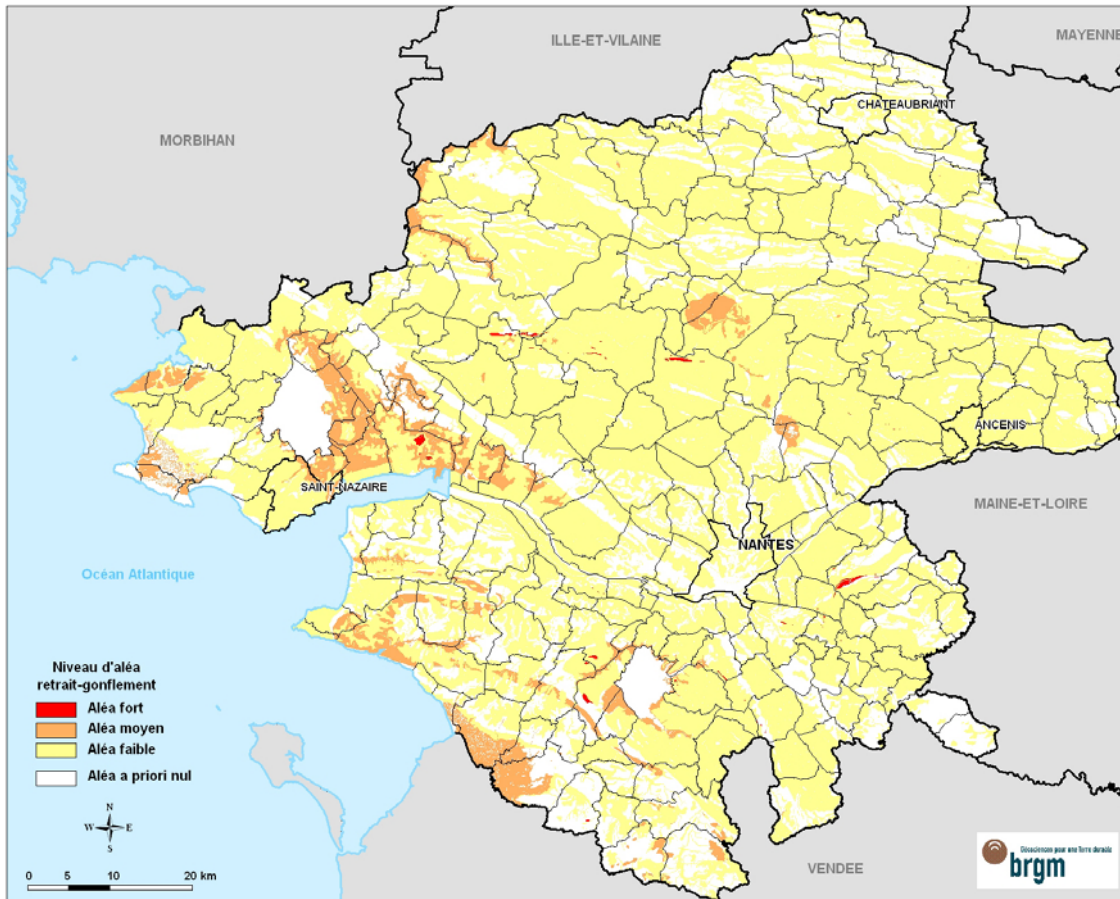


Illustration 29 – Carte départementale de l'aléa retrait-gonflement de la Loire-Atlantique



## 9. Conclusion

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

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

La démarche de l'étude a d'abord consisté en l'établissement d'une cartographie départementale synthétique des formations argilo-marneuses affleurantes à sub-affleurantes, à partir de la synthèse des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000 et d'observations bibliographiques existantes. La carte synthétique recense en définitive 22 formations, dont l'une des caractéristiques est la forte hétérogénéité, liée à leurs conditions de formation ou leur altération superficielle.

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

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

En définitive, la carte départementale d'aléa a été établie à partir de la carte synthétique des formations à dominante argilo-marneuse, en se basant sur leur hiérarchisation qui combine leur susceptibilité et la sinistralité associée. Cette dernière a été évaluée à partir du recensement des sinistres, en calculant pour chaque formation une densité de sinistres, rapportée à la surface d'affleurement réellement urbanisée, ceci afin de permettre des comparaisons fiables entre elles. Au total, 344 sinistres répartis dans 71 communes du département ont ainsi été recensés dont 343 ont pu être localisés avec une précision suffisante. Cet échantillon, bien

qu'assurément non exhaustif, paraît très largement représentatif du phénomène tel qu'il a été observé à ce jour dans le département.

En appliquant au département de Loire-Atlantique la méthodologie mise au point au niveau national, trois niveaux d'aléa (faible, moyen et fort) ont été distingués afin de caractériser les formations argileuses ou marneuses vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. Sur une superficie départementale totale de 6 911 km<sup>2</sup> ;

- 0,11 % a été ainsi classé en aléa fort ;
- 5,54 % a été considéré en aléa moyen ;
- 67,2 % est classé en aléa faible ;
- 27,15 % correspond à des zones a priori non concernées par le phénomène.

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

Cette carte d'aléa retrait-gonflement des terrains argileux du département de Loire-Atlantique, dont l'échelle de validité est le 1/50 000 et qui est présentée sous format papier 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 (PPR), en vue d'attirer l'attention des constructeurs et maîtres d'ouvrages sur la nécessité de respecter certaines règles constructives préventives dans les zones soumises à l'aléa retrait-gonflement, en fonction du niveau de celui-ci. Cet outil réglementaire devra insister sur l'importance d'une étude géotechnique à la parcelle comme préalable à toute construction nouvelle dans les secteurs concernés par les formations géologiques à aléa fort, moyen ou faible, notamment en raison de la forte hétérogénéité des formations du département. 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.

**Béchenec F.** (2007) - *Carte géologique harmonisée du département de Loire-Atlantique*. BRGM/RP-55703-FR, 369 p., 2 fig., 2 tab., 3 pl. h.-t.

**Béchenec F.** (2008) – Communication personnelle

**Borne V., Chevalier M., Olivier-Pierre M.-F.** (1989) - *Les premiers dépôts paléogènes (yprésiens) de la bordure méridionale du Massif armoricain; aspects sédimentologique, tectonique et paléogéographique*. Géologie de la France, vol.1989, n°.1-2, pp.11-20

**BRGM** (1984) - *Compatibilité entre l'exploitation des attapulgites et celle de l'eau dans les bassins tertiaires de Campbon et de Saffré (Loire-Atlantique)*. BRGM, Orléans.

**BRGM** (1996) - *Guide des ressources minérales en Pays de la Loire. Première partie : panorama de l'activité*. BRGM R40004, 80 p., 3 fig., 10 tabl., 1 ann.

**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.

**Chamley** (1989) - *Clay sedimentology*. Springer-Verlag.

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

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

**Chevalier M. et Delanoë Y.** (1989) - *Etude géophysique et sédimentologique du petit graben redonien pliocène de la Marnière (La Limouzinière, Loire-Atlantique)*. Géologie de la France, vol.1989, n°.1-2, pp.103-116

**Clément J.-P.** (1984) - *Formations argileuses des Pays de Loire pouvant servir à la fabrication de produits en argile stabilisée à froid*. BRGM, Orléans

**Clément J.-P.** avec la collaboration de **Wienstroer J.** (1991) - *Recherche d'argiles pour des utilisations médicinales sur la commune de Fulelet (Maine-et-Loire)*. BRGM/R33570 PAL 4S/91

**Delfau M.** (1982) - *Recherche de zones favorables à la prospection de vermiculite en France (Massif Central, Bretagne, Corse)*. BRGM, Orléans

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

**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 la Seine-Saint-Denis.* BRGM/RP-51198-FR, 125 p., 7 fig., 13 tabl., 2 ann., 5 pl. h.-t.

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

**Esteoule J., Esteoule-Choux J., Perret P.** (1972) - *Etude des formations superficielles du Massif armoricaïn; caractères distinctifs et passage des altérites et des dépôts tertiaires aux formations quaternaires.* Bulletin de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne, série C, vol.4, n° 2, pp.97-106

**Esteoule-Choux J., Margerel J.-P., Guernet C., Rivoalland H.** (1986) - *Données nouvelles sur le bassin stampien de Quessoy (Massif Armoricaïn); étude sédimentologique et micropaléontologique du gisement du Moulin de Boguet.* Revue de Micropaléontologie, vol.28, n° 4, pp.243-254

**Fourniguet J. et Trautmann F.** (1988) - *Etude sédimentologique du redonien de Saint-Jean-la-Poterie (Morbihan).* Géologie de la France, vol.1989, n° 1-2, pp.55-62

**Gaudin A.** (2008) Communication personnelle

**Grès M.** (1979) - *Mémento substances utiles : la vermiculite.* BRGM Orléans

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

**Lachassagne P., Wyns R., Bérard P., Bruel T., Chéry L., Coutand T., Desprats J.-F., Le Strat P.** (2001) - *Exploitation of high-yield in hard-rock aquifers: Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones.* Ground Water, 39, (4), pp. 568-581

**Lachassagne,P., Wyns,R** (2005) - *Aquifères de socle : nouveaux concepts - Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau,* Géosciences, n° 2, septembre 2005

**Le Guern C., Notturmo L.** avec la collaboration de **Béchenec 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, 145 p., 28 ill., 5 ann., 3 cartes h.-t.

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

**Morel** (1996) Les sols cultivés. Lavoisier, 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.

**Proust D.** (1981), *Supergene alteration of metamorphic chlorite in an amphibolite from massif central, France*. Clay Minerals, vol.17, n° 2, pp.159-173.

**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'études des nouvelles AOC des Muscadet de la région nantaise. Thèse de l'Université de Nantes

**Thorez J.** (1989) - *Argilloscopy of weathering and sedimentation*. Bull. Soc. Geol. Belgique 98-2, 245-267

**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

**Velde** (1992) - *Introduction to clay minerals*. Chapman and Hall.

**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 n° R 39967, 89 p., 14 fig., 13 tabl., 6 ann., 2 cartes h.-t.

**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) – *Etude 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<sup>ème</sup> 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

**Weaver** (1989) - *Clay, muds, and shale. Developments in sedimentology* 44, Elsevier

**Wuilleumier A., Monnot P., Conil P., Prognon F., Lacquement F., Bourguine B., Baudouin V.** (2009) – *Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole*. Rapport Final. BRGM/RP-56333-FR, 243 pages, 46 figures, 16 tableaux et 23 annexes.

**Wyns R., Baltassat J. M., Lachassagne P., Legtchenko A., Vairon J.** (2004) - *Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France)*. Bulletin de la Société Géologique de France, 175, (1), 21-34

### **Références des cartes géologiques à 1/50 000 utilisées**

**Audren C., Jégouzo P., Barbaroux L., Bouysse P.** (1975) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille La Roche-Bernard (449) - BRGM, Orléans. Carte géologique par C. Audren, P. Jégouzo, L. Barbaroux, P. Bouysse (1975)

**Bambier A., Flageollet J.C., Forestier F.H., Viaud J.M.** (1982) – Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Clisson (509) - BRGM, Orléans. Carte géologique par F.H. Forestier, B. Lasnier, J.P. Burg, J.C. Flageollet, L. Poncet, J.M. Viaud (1982)

**Barbaroux L., Cavet P.** (1983) – Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Nort-sur-Erdre (451) - BRGM, France. Carte géologique par L. Barbaroux, P. Cavet, J. Marchand, B. Lasnier, G. Godard, J.P. Margerel, B. Bousquet, D. Sellier, G. Carlier (1983)

**Cavet P., Arnaud A., Blaise J., Gruet M., Lardeux H., Rivière L.M., Chauris L., Guigues J.** (1970) – Notice explicative carte géol. France (1 /50 000), feuille Chalonnes-sur-Loire (453) - BRGM, France. Carte géologique par P. Cavet, J. Blaise, M. Gruet, H. Lardeux, L.M. Rivière, A. Arnaud, L. Barbaroux, R. Brossé, H. Jourdainne, L. Chauris (1970)

**Cavet P., Arnaud A., Blaise J., Gruet M., Lardeux H., Marchand J., Nicolas A., Rivière L.M., Rossignol J.C.** (1978) – Notice explicative carte géol. France (1 /50 000), feuille Ancenis (452) - BRGM, France. Carte géologique par P. Cavet, J. Marchand, M. Gruet, H. Lardeux, L.M. Rivière, A. Arnaud (1978)

**Cogné J., Hassendorfer B., Barbaroux L.** (1973) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Saint-Nazaire (479) - BRGM, Orléans. Carte géologique par B. Hassendorfer, L. Barbaroux, L. Berthois (1973)

**Dadet P., Herrouin Y., Bardy P., Lebret P., Trautmann F., Carn A.** (1995) – Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Pipriac (387) - BRGM, Orléans. Carte géologique par P. Dadet, Y. Herrouin, C. Blanchet, P. Bardy , A. Colleau (1995)

**Dubreuil M., Cavet P., Blaise J., Estéoule-Choux J., Gruet M., Lardeux H.** (1989) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Saint-Mars-la-Jaille - BRGM, Orléans. Carte géologique par M. Dubreuil, J. Blaise, P. Cavet, H. Diot, M. Gruet (1988)

**Fourniguet J., Trautmann F.** (1985) - Notice explicative, carte géol. France (1/50 000), feuille Redon (419) – BRGM, France. Carte géologique par F. Trautmann, J. Delfour, J. Fourniguet, J.Y. Scanvic, G. Dubreuil, B. Pivette, J.P. Prian, C. Militon, B. Manigault (1984)

**Godard G., Bouton P., Poncet D., Roy C.** (2005) – Notice explicative carte géol. France (1/50 000) feuille Montaigu (536) – BRGM, Orléans. Carte géologique par G. Godard, D. Poncet, M. Chevalier, P. Bouton, G. Carlier (2005)

**Herrouin Y., Rabu D., Chantraine J., Chauvel J.J., Etienne H.** (1990) - Notice explicative, carte géol. France (1/50 000), feuille Châteaubriant (389) - BRGM, France. Carte géologique par Y. Herrouin, D. Rabu, J. Fourniguet (1988)

**Herrouin Y., Dadet P., Guigues J., Laville P., Talbo H.** (1989) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), Feuille Bain-de-Bretagne (388), *Ed. BRGM*. Carte géologique par P. Dadet, Y. Herrouin, P. Laville, F. Paris (1987)

**Janjou D, Lardeux H, Chantraine J, Callier L, Etienne H,** (1998). Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Segré (422) - BRGM, Orléans. Carte géologique par D.Janjou, M. Gruet, C. Penecki (1998)

**Lahondère D., Chèvremont P., Godard G., Stussi JM., Bouton P. et la collaboration de Viaud JM., Rebay G., Cocherie A. et Roy C.** (in prép.) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), Feuille Palluau (535), *Ed. BRGM* Carte géologique par Lahondère D., Bouton P., Chèvremont P., Béchenec F., Godard G., Santarelli N., Viaud J.M. (2007)

**Marchand J., Perrin J., Weecksteen G.** (1969) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Vallet (482) - BRGM, Orléans. Carte géologique par J. Marchand, J. Perrin, G. Weecksteen, F. H. Forestier, B. Lasnier (1969)

**Marchand J., Bossière G., Sellier D.** (1989) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Savenay (450) - BRGM, Orléans. Carte géologique par J. Marchand, D. Sellier, G. Bossière, G. Carlier, C. Deniel, B. Lasnier (1988)

**Ters M., Bambier A., Chantraine J., Châteauneuf J.J., Godard G., Greber C., Limasset O., Viaud J.M., Visset L.** (1982) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Saint-Philbert-de-Grand-Lieu (508) - BRGM, Orléans. Carte géologique par M. Ters (1979)

**Ters M., Marchand J., Ottmann F., Biteau F., Talbo H., Limasset O., Guigues J., Bambier A.** (1978) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Paimboeuf (480) - BRGM, Orléans. Carte géologique par M. Ters, J. Marchand, F. Ottmann (1978)

**Ters M., Marchand J., Weeckstein G.** (1969) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Nantes (481) - BRGM, Orléans. Carte géologique par M. Ters, B.Barthélémy, J. Marchand, R. Richard, G. Weecksteen, F.H. Forestier, B. Lasnier (1969)

**Ters M., Ollivier-Pierre M.F., Châteauneuf J.J., Féraud, J.** (1979) – Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Machecoul (507) – BRGM, Orléans. Carte géologique par M. Ters, J. Mounès, D. Gouleau (1978)

**Ters M., Viaud J.M.** (1983) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Challans (534) - BRGM, Orléans. Carte géologique par M. Ters, J.M. Viaud, F. Verger, D. Gouleau (1983)

**Ters M., Viaud J.M., Châteauneuf J.J., Ollivier-Pierre M.F., Vaudois N., Gautier M.** 1978 – Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Ile-de-NoirMoutier/Pointe de Saint-Gildas (506/533) - BRGM, Orléans. Carte géologique par M. Ters, D. Gouleau, J.R. Vanney (1978)

**Trautmann F.** (1988) - Notice explicative carte géol. France (1/50 000), feuille Nozay (420) - BRGM, Orléans. Carte géologique par F. Trautmann, M. Donnot, D. Lemaire, M.P. Cagnet-Mawhin (1987)

### **Autres références thématiques**

- AFNOR (1995 a) – Géotechnique. Essais de reconnaissance des sols. AFNOR, T1.
- AFNOR (1995 b) – Essai de gonflement à l'oedomètre. Norme française XP P94-091.
- AFNOR (1997) – Essai de dessiccation : détermination conventionnelle de la limite de retrait sur le passant à 400 µm d'un matériau. Norme française XP P94-060-1.
- Alba J.M., Dufor M. (1993) – Phénomènes de gonflement-retrait dans les sols marno-argileux. *Ann. Inst. Tech. BTP.*, Sols et Fondations, 514 p.
- Amars S., Baguelin F., Canepa Y. (1987) – Influence de la nappe sur les paramètres mesurés des sols. 9<sup>e</sup> 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.
- 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. hors-texte.
- 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.
- Donsimoni M. et Giraud F. (2005) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département des Yvelines. BRGM/RP-53074-FR, 287 p., 7 fig., 24 tabl., 6 ann., 3 pl. h.-t.



Donsimoni M., Hatton C., Giraud F. (2004) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Val-d'Oise. BRGM/RP-52598-FR, 163 p., 8 fig., 22 tabl., 4 ann., 4 pl. h.-t.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vincent M. (2003) – Retrait-gonflement des sols argileux : méthode cartographique d'évaluation de l'aléa en vue de l'établissement de PPR. – 3<sup>ème</sup> 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*, 3, mars 2006, pp.50-55.

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

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

### **Sites internet**

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

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

<http://www.meteofrance.fr> : site internet de Météo France

<http://www.prim.net> : site internet du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT), sur la prévention des risques majeurs, affichant les risques naturels et technologiques ainsi que les reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle

<http://cg44.fr> : site internet du Conseil Général de Loire-Atlantique



## **Annexe 1**

### **Rappels sur le mécanisme de retrait-gonflement des argiles**



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

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

À l'échelle microscopique, les minéraux argileux se caractérisent par une structure minéralogique en feuillets. Ceux-ci sont constitués d'un assemblage de silicates ( $\text{SiO}_3$ ) et d'aluminates ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) entre lesquels viennent s'interposer des molécules d'eau. La majorité des minéraux argileux appartient à la famille des phyllosilicates 2:1 (deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique). La structure des assemblages cristallins est variable selon le type d'argile. Certains d'entre eux, telle que la montmorillonite, présentent des liaisons faibles entre feuillets, ce qui permet l'acquisition ou le départ de molécules d'eau.

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

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

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

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

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

Les sols argileux se caractérisent donc par une grande influence de la teneur en eau sur leur comportement mécanique. En géotechnique, on identifie d'ailleurs les

différents types de sols argileux sur la base de ce critère. Pour cela on détermine les teneurs en eau (dites limites d'Atterberg) à partir desquelles le comportement du matériau se modifie. Atterberg, puis par la suite Casagrande, ont défini de façon conventionnelle, à partir de la teneur en eau, les limites de divers états de consistance d'un sol donné :

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

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

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

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

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

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

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



## **Annexe 2**

### **Modalités d'interprétation minéralogique des données de sol (granulométrie, CEC, ...) mises à disposition par la Chambre d'Agriculture de la Loire- Atlantique**



Plus de 400 analyses de sols, correspondant à plus de 100 profils de sols, ont été mises à disposition par la Chambre d'Agriculture de la Loire-Atlantique (Programme IGCS : **Inventaire, Gestion et Conservation des Sols, coordonné par l'INHP pour la région des Pays de la Loire**). Dans un premier temps, les sols profonds, 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 13).

1- Bibliographie : CEC des minéraux argileux

Minéral	Surface interne (m <sup>2</sup> /g)	Surface externe (m <sup>2</sup> /g)	Surface totale (m <sup>2</sup> /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

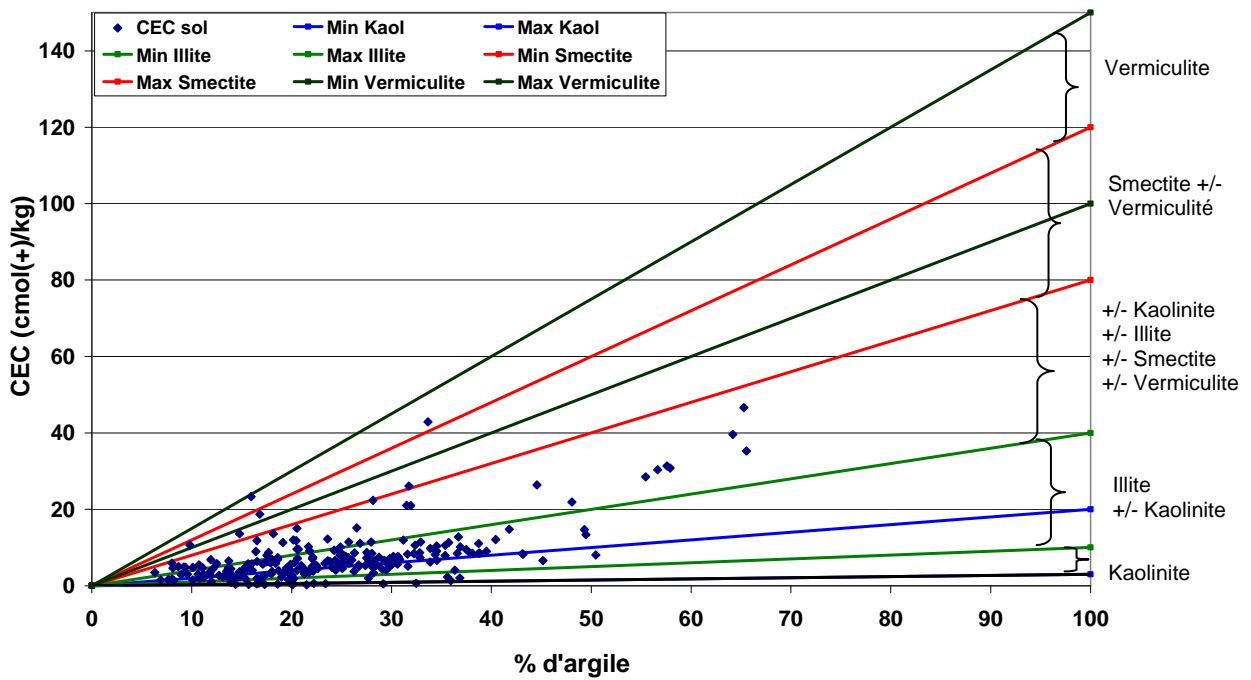
*Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux (d'après MOREL)*

MOREL R. (1996) - Les sols cultivés. Lavoisier, Paris.

Cation Exchange Capacities (meq/100 g) of Clay Minerals (from Drever, 1982, p. 82)		
<b>smectites</b>		<b>80-150</b>
<b>vermiculites</b>		<b>120-200</b>
<b>illites</b>		<b>10- 40</b>
<b>kaolinite</b>		<b>1- 10</b>
<b>chlorite</b>		<b>&lt;10</b>
Cation exchange capacities and surface charge densities		
Clay mineral group	Cation exchange capacity (CEC) (cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Surface charge density (τ) (cmol (-) m <sup>-2</sup> )
Kaolinites	3-20	2-6 × 10 <sup>-4</sup>
Illites	10-40	1-2 × 10 <sup>-4</sup>
Smectites	80-120	1-1.5 × 10 <sup>-4</sup>
Vermiculites	100-150	3 × 10 <sup>-4</sup>

*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**

### **Liste et coordonnées des organismes ayant fourni des données de sinistres et/ou géotechniques**



Source des données de sinistres	Nombre d'adresses de sinistres	Commentaires
ARCADIS	7	223 adresses provenant d'une source unique
CCR	18	
COULAIS CONSULTANT	3	
FONDASOL	1	
MAIF	4	
MAIRIE	119	
PREFECTURE	55	
SIC INFRA 49	3	
URETEK	13	
PREFECTURE ; Mairie ; URETEK	3	121 adresses provenant de plusieurs sources
PREFECTURE ; Mairie	75	
CCR ; Mairie	37	
COULAIS CONSULTANT; PREFECTURE	2	
FONDASOL ; MAIRIE	1	
MAIRIE ; URETEK	1	
PREFECTURE ; URETEK	1	
ARCADIS ; URETEK	1	
Total	344	

Source des données géotechniques	Nombre de données	Commentaire
Archives Départementales 44	53	1175 données hors sinistres
Autoroute	27	
BSS	22	
Conseil Général 44	204	
DDE	817	
FONDASOL	11	
Mairie	41	
ARCADIS	7	37 données liées à des sinistres
CCR	3	
Coulais consultant 49	7	
Préfecture	2	
SIC INFRA 49	2	
URETEK	16	
Total	1212	

## **BUREAUX D'ETUDES**

### **ARCADIS ESG :**

17 pl Magellan  
44800 St Herblain

Tél. : 02 40 92 19 36  
Fax. Fax : 02 40 92 11 31

### **COULAIS Consultants :**

Centre d'affaires "Les Loges"  
ZAC des Couflans  
49480 St Sylvain d'Anjou

Tél : 02 41 42 56 10  
Fax. Fax : 02 41 42 56 75

### **SIC INFRA :**

21 r Paul Pousset  
49130 Les Ponts de Cé

Tél. 02.41.21.03.80  
Fax. 02.41.21.03.81

### **FONDASOL :**

12 Rue Léon Gaumont, ZAC de la Pentecôte  
44700 Orvault

Tél. 02 51 77 86 50  
Fax. 02 51 78 65 15

### **URETEK Bretagne**

Za la marre  
35780 La Richardais

Tél. 02 99 16 33 91  
Fax. 02 99 46 22 56



Coordonnées de l'Union Syndicale de Géotechnique

**USG**

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

**CONCESSIONNAIRE AUTOROUTIER**

**Cofiroute :**

Autoroute A10  
45770 SARAN

0892 70 26 34

**ADMINISTRATIONS**

**DDE de la Loire-Atlantique :**

10, Boulevard Gaston Serpette,  
BP 53606  
44036 Nantes Cedex 1  
Tel. accueil : 02.40.67.26.26  
Fax : 02.40.67.25.52

**Conseil Général de Loire-Atlantique**

23 rue Pitre Chevalier  
44000 NANTES

Tél : 02 40 99 19 02

**AUTRES ENTITES**

**CETE de l'Ouest – LRPC d'Angers**

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

Tél. : 02 4179 1300  
Fax : 02 4144 3276

**MAIF**

11 rue André Meynier  
35069 Rennes cedex

Tél. : 02 99 59 90 01

## **Annexe 4 – Résultats d'analyses spécifiques des échantillons prélevés dans le département de Loire- Atlantique**

- Localisation
  
- Analyses minéralogiques par diffraction des Rayons X  
Service Métrologie, Monitoring, Analyses  
(BRGM Orléans)
  - Analyses géotechniques (VB)  
Service Métrologie, Monitoring, Analyses  
(BRGM Orléans)



**1- LOCALISATION DES ECHANTILLONS**

Nom de l'échantillon	Coordonnées Lambert II Etendu	Profondeur de l'échantillon	Lithologie de l'échantillon	Formation	Commune
T1	X : 236333,50 Y : 2278541,80	1-1,2	Argile sableuse, ocre, rouge	7- Sables et marnes sableuses du Miocène moyen à Pliocène	MESQUER
T2	X : 236259,30 Y : 2278299,20	1-1,2	Argile sableuse, ocre, rouge	7- Sables et marnes sableuses du Miocène moyen à Pliocène	MESQUER
T3	X : 235626,30 Y : 2278024,80	1-1,2	Argile	15- Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque	MESQUER
T4	X : 236038,60 Y : 2277690,30	1-1,2	Argile entre le grains	15- Micaschistes altérés du Protérozoïque et du Paléozoïque	MESQUER
T5	X : 250680,00 Y : 2263190,00	1	Argiles	20- Migmatites altérées de la Formation de Muzillac	SAINT-NAZAIRE
T6	X : 259330,00 Y : 2271470,00	0,8	Limon argileux	20- Migmatites altérées de la Formation de Muzillac	SAINT-MALO-DE-GUERSAC
T7	X : 329 552,2 Y : 2 278 626,9	0,6	Sablo-argileux	13- Schistes et grès altérés du Paléozoïque	TEILLE
T8	X : 327 622,5 Y : 2 278 481,5	0,8	Argile rouge-orangé avec petits éléments	13- Schistes et grès altérés du Paléozoïque	TEILLE
T9	X : 330 527,1 Y : 2 277 876,2	0,8	Sablo-argileux	13- Schistes et grès altérés du Paléozoïque	MESANGER
T10	X : 330 858,6 Y : 2 276 943,1	0,6	Argiles grise à ocre	13-Schistes et grès altérés du Paléozoïque	MESANGER
T11	X : 330 157,2 Y : 2 272 736,0	0,6	Argiles marron	10- Altérites indifférenciées du socle protérozoïque et paléozoïque	MESANGER
T12	X : 329 232,7 Y : 2 276 578,4	0,7	Argiles	13-Schistes et grès altérés du Paléozoïque	MESANGER

T13	X : 328 399,5 Y : 2 279 677,1	0,6	Limon argileux	12-Série schisto-gréseuse et volcanique altérée de la Formation de Frégréac	TEILLE
T14	X : 326 498,2 Y : 2 280 953,0	0,6	Argiles	12-Série schisto-gréseuse et volcanique altérée de la Formation de Frégréac	TEILLE
T15	X : 330 085,8 Y : 2 279 797,2	0,6	Argiles bleues et ocre	12-Série schisto-gréseuse et volcanique altérée de la Formation de Frégréac	TEILLE
T16	X : 267 961,1 Y : 2 269 852,8	1	Argiles ocre bariolées	22-Péridotites et serpentinites du Paléozoïque	DONGES
T17	X : 267 606,8 Y : 2 269 725,2	0,5	Argiles	22-Péridotites et serpentinites du Paléozoïque	DONGES
T18	X : 261 831,8 Y : 2 285 099,6	1	Argiles	18-Granites et gneiss altérés du Paléozoïque	MISSILLAC
T19	X : 263 679,8 Y : 2 286 905,8	0,5	Argiles	10- Altérites indifférenciées du socle protérozoïque et paléozoïque	MISSILLAC
T20	X : 302 454,5 Y : 2 285 867,7	0,8	Argiles	8- Argiles d'âge Eocène à Pliocène	PUCEUL
T21	X : 306 293,3 Y : 2 283 303,5	0,6	Argiles	8- Argiles d'âge Eocène à Pliocène	SAFFRE

**2 – COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DE LA FRACTION ARGILEUSE**  
**(fraction < 2 µm) - précision ± 5 %**

Nom de l'échantillon	Smectite	Vermiculite	Interstratifié chlorite-smectite	Illite et/ou micas	Kaolinite
T1	23%			15%	62%
T2	58%			4%	38%
T3				16%	84%
T4				23%	77%
T5	6%			50%	44%
T6	27%			7%	66%
T7	39%			15%	46%
T8		4%		13%	83%
T10			16%	55%	29%
T11	30%			36%	34%
T12		18%		67%	15%
T14		8%		35%	57%
T15	10%			74%	16%
T16	97%				3%
T17	94%				kaolinite + interstratifié kaolinite-smectite : ~5% ; Talc possible (< 1%)
T18	21%			11%	68%
T19		8%		23%	69%

### 3 – BILAN GRANULOMETRIQUE

Référence de l'échantillon	Fraction > 80µm en %	Fraction < 80µm en %
T2	16,18	83,82
T4	36,67	63,33
T6	34,44	65,56
T7	47,23	52,77
T14	26,13	73,87

### 4 – RESULTATS DES ESSAIS D'ADSORPTION DE BLEU DE METHYLENE

Référence de l'échantillon	VBS en g de bleu /100g de matériau
T1	2,60
T2	6,55
T7	2,01
T8	1,24
T16	13,54
T17	11,39
T18	2,76
T20	2,14
T21	1,36



## **Annexe 5 – Sinistres**

- Nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle au titre des mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols par commune (données actualisées au 30 octobre 2008)
- Nombre de sinistres recensés par commune
- Dates des périodes de reconnaissance, de l'arrêté, et de parution de l'arrêté au Journal Officiel
- Liste des sinistres localisés et formations géologiques identifiées



Nombre d'arrêtés par commune

Assérac	1
Bernerie-en-Retz	1
Besné	1
Bignon	1
Blain	1
Brains	1
Campbon	2
Carquefou	1
Chapelle-des-Marais	1
Châteaubriant	3
Château-Thébaud	1
Chauvé	1
Corsept	1
Erbray	1
Baule-Escoublac	1
Fay-de-Bretagne	1
Lusanger	1
Machecoul	1
Mesquer	2
Montbert	1
Montoir-de-Bretagne	1
Orvault	1
Plessé	1
Pornic	1
Rezé	2
Rouans	1
Saffré	2
Saint-Aignan-Grandlieu	3
Sainte-Anne-sur-Brivet	1
Saint-Aubin-des-Châteaux	2
Saint-Fiacre-sur-Maine	1
Saint-Malo-de-Guersac	1
Saint-Michel-Chef-Chef	1
Saint-Nazaire	1
Sautron	1
Trignac	1

Dates par commune (périodes de reconnaissance, arrêté, parution au Journal Officiel)

<b>Commune</b>	<b>Début</b>	<b>Fin</b>	<b>Date arrêté</b>	<b>Date parution au JO</b>
Blain	01/05/1989	31/12/1990	14/01/1992	05/02/1992
Campbon	01/05/1989	31/12/1990	14/01/1992	05/02/1992
Châteaubriant	01/05/1989	31/12/1990	14/01/1992	05/02/1992
Château-Thébaud	01/05/1989	31/12/1990	14/01/1992	05/02/1992
Erbray	01/05/1989	31/12/1990	14/01/1992	05/02/1992
Baule-Escoublac	01/05/1989	31/12/1990	14/01/1992	05/02/1992
Fay-de-Bretagne	01/05/1989	31/12/1990	14/01/1992	05/02/1992
Machecoul	01/05/1989	31/12/1990	14/01/1992	05/02/1992
Mesquer	01/05/1989	31/12/1990	14/01/1992	05/02/1992
Montbert	01/05/1989	31/12/1990	14/01/1992	05/02/1992
Orvault	01/05/1989	31/12/1990	14/01/1992	05/02/1992
Plessé	01/05/1989	31/12/1990	14/01/1992	05/02/1992
Sainte-Anne-sur-Brivet	01/05/1989	31/12/1990	14/01/1992	05/02/1992
Saint-Aubin-des-Châteaux	01/05/1989	31/12/1990	14/01/1992	05/02/1992
Bignon	01/05/1989	31/12/1991	25/01/1993	07/02/1993
Brains	01/05/1989	31/12/1991	25/01/1993	07/02/1993
Carquefou	01/05/1989	31/12/1991	25/01/1993	07/02/1993
Rezé	01/05/1989	31/12/1991	25/01/1993	07/02/1993
Saffré	01/05/1989	31/12/1991	25/01/1993	07/02/1993
Saint-Fiacre-sur-Maine	01/05/1989	31/12/1991	25/01/1993	07/02/1993
Sautron	01/05/1989	31/12/1991	25/01/1993	07/02/1993
Trignac	01/05/1989	31/12/1991	06/12/1993	28/12/1993
Saint-Aignan-Grandlieu	01/01/1996	31/12/1996	02/02/1998	18/02/1998
Saffré	01/01/1996	31/12/1996	12/03/1998	28/03/1998
Châteaubriant	01/01/1991	31/12/1997	26/05/1998	11/06/1998
Bernerie-en-Retz	01/06/1989	31/12/1997	12/06/1998	01/07/1998
Saint-Aignan-Grandlieu	01/01/1995	31/12/1995	23/02/1999	10/03/1999
Campbon	01/03/1996	31/12/1998	19/05/1999	05/06/1999
Châteaubriant	01/07/2003	30/09/2003	22/11/2005	13/12/2005
Mesquer	01/07/2003	30/09/2003	22/11/2005	13/12/2005
Saint-Aubin-des-Châteaux	01/07/2003	30/09/2003	22/11/2005	13/12/2005
Pornic	01/07/2003	30/09/2003	09/01/2006	22/01/2006
Saint-Malo-de-Guersac	01/07/2003	30/09/2003	09/01/2006	22/01/2006
Montoir-de-Bretagne	01/07/2003	30/09/2003	06/02/2006	14/02/2006
Assérac	01/07/2003	30/09/2003	30/03/2006	02/04/2006
Besné	01/07/2003	30/09/2003	30/03/2006	02/04/2006
Chapelle-des-Marais	01/07/2003	30/09/2003	30/03/2006	02/04/2006
Corsept	01/07/2003	30/09/2003	30/03/2006	02/04/2006
Chauvé	01/07/2003	30/09/2003	03/08/2006	24/08/2006
Lusanger	01/07/2003	30/09/2003	10/11/2006	23/11/2006
Saint-Michel-Chef-Chef	01/07/2003	30/09/2003	10/11/2006	23/11/2006
Saint-Nazaire	01/07/2003	30/09/2003	18/10/2007	25/10/2007
Saint-Aignan-Grandlieu	01/07/2005	30/09/2005	20/02/2008	22/02/2008
Rouans	01/07/2005	30/09/2005	26/06/2008	05/07/2008
Rezé	01/07/2005	30/09/2005	07/08/2008	13/08/2008

Nombre de sinistres recensés par commune

AIGREFEUILLE-SUR-MAINE	3	LUSANGER	2
ASSERAC	5	MACHECOUL	3
BASSE-GOULAIN	1	MESANGER	1
BESNE	1	MESQUER	44
BLAIN	5	MONTBERT	1
BONNOEUVRE	1	MONTOIR-DE-BRETAGNE	7
BOUGUENAI	4	NANTES	3
BRAINS	4	NORT-SUR-ERDRE	2
CAMPBON	2	ORVAULT	1
CARQUEFOU	6	PETIT-MARS	1
CHATEAUBRIANT	3	PLESSE	23
CHÂTEAU-THEBAUD	2	PONT-SAINT-MARTIN	2
CHAUVE	4	PORNIC	17
CHEIX-EN-RETZ	1	PRINQUIAU	1
CORCOUE-SUR-LOGNE	1	PUCEUL	2
CORSEPT	1	REZE	7
DONGES	2	ROUANS	6
ERBRAY	4	SAFFRE	39
FAY-DE-BRETAGNE	1	SAINT-AIGNAN-DE-GRAND-LIEU	10
FERCE	1	SAINT-AUBIN-DES-CHATEAUX	2
GETIGNE	1	SAINTE-ANNE-SUR-BRIVET	3
HERBIGNAC	1	SAINT-ETIENNE-DE-MONTLUC	3
JOUE-SUR-ERDRE	1	SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	17
LA BAULE-ESCOUBLAC	1	SAINT-JOACHIM	3
LA BERNERIE-EN-RETZ	1	SAINT-MALO-DE-GUERSAC	27
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	16	SAINT-MARS-DE-COUTAIS	1
LA CHAPELLE-LAUNAY	1	SAINT-MARS-DU-DESERT	2
LA CHAPELLE-SAINT-SAUVEUR	1	SAINT-MICHEL-CHEF-CHEF	3
LA MONTAGNE	1	SAINT-NAZAIRE	15
LA ROCHE-BLANCHE	1	SAINT-SEBASTIEN-SUR-LOIRE	1
LE PELLERIN	1	SAUTRON	2
LEGE	1	SION-LES-MINES	1
LES MOUTIERS-EN-RETZ	1	SOUDAN	1
LES SORINIERES	2	SUCE-SUR-ERDRE	3
LIGNE	1	TRIGNAC	3
LOUISFERT	2		

Liste des 343 sinistres localisés

<b>Communes</b>	<b>Coordonnée X (Lambert II étendu)</b>	<b>Coordonnée Y (Lambert II étendu)</b>	<b>Numéro de Formation argileuse</b>
AIGREFEUILLE-SUR-MAINE	315817	2237900	7
AIGREFEUILLE-SUR-MAINE	315676	2238887	4
AIGREFEUILLE-SUR-MAINE	316268	2236606	7
ASSERAC	239089	2280519	0
ASSERAC	243177	2280007	3
ASSERAC	239192	2282963	3
ASSERAC	238999	2281214	14
ASSERAC	240478	2284133	7
BASSE-GOULAIN	313140	2255137	1
LA BERNERIE-EN-RETZ	269390	2239870	0
BESNE	266600	2273349	0
BLAIN	292182	2282983	5
BLAIN	290646	2283163	7
BLAIN	288753	2281639	13
BLAIN	288635	2281519	13
BLAIN	285050	2282581	4
BONNOEUVRE	331131	2287103	7
BOUGUENAI	300463	2248491	3
BOUGUENAI	300490	2248489	3
BOUGUENAI	300497	2248497	3
BOUGUENAI	298880	2249683	0
BRAINS	292296	2249092	3
BRAINS	291275	2247884	7
BRAINS	292266	2248812	5
BRAINS	292716	2248854	0
CAMPBON	276666	2278588	6
CAMPBON	276652	2278563	6
CARQUEFOU	310047	2261027	1
CARQUEFOU	310921	2260513	14
CARQUEFOU	309798	2260855	1
CARQUEFOU	309902	2260355	14
CARQUEFOU	310012	2261019	1
CARQUEFOU	310153	2260271	14
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	253270	2281133	3
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	255013	2279493	20
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	254980	2278730	20
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	254279	2280155	20
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	256057	2282729	3
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	255976	2282691	20
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	254573	2283056	3
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	255305	2282408	2
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	255443	2282322	20
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	254515	2281674	2

<b>Communes</b>	<b>Coordonnée X (Lambert II étendu)</b>	<b>Coordonnée Y (Lambert II étendu)</b>	<b>Numéro de Formation argileuse</b>
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	254619	2279884	20
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	255098	2282203	2
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	254885	2282741	20
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	254278	2279567	20
LA CHAPELLE-DES-MARAIS	254065	2282004	2
LA CHAPELLE-LAUNAY	275333	2274375	4
LA CHAPELLE-SAINT-SAUVEUR	350629	2277156	12
CHATEAUBRIANT	321780	2308970	1
CHATEAUBRIANT	321614	2308664	1
CHATEAUBRIANT	319697	2307998	0
CHÂTEAU-THEBAUD	314007	2243784	14
CHÂTEAU-THEBAUD	314096	2243715	14
CHAUVE	269258	2248081	7
CHAUVE	269279	2248189	7
CHAUVE	269370	2248098	7
CHAUVE	269374	2248026	7
CHEIX-EN-RETZ	286654	2250846	5
CORSEPT	262179	2260160	20
DONGES	266809	2267734	20
DONGES	266710	2267468	20
ERBRAY	322441	2305751	17
ERBRAY	320680	2305371	16
ERBRAY	324437	2304900	17
ERBRAY	320711	2305412	16
LA BAULE-ESCOUBLAC	241904	2264989	0
FAY-DE-BRETAGNE	288933	2277503	5
FERCE	318754	2317553	0
GETIGNE	328171	2236966	19
HERBIGNAC	250680	2277857	3
JOUE-SUR-ERDRE	312676	2286775	10
LEGE	300545	2216617	1
LIGNE	319657	2274798	13
LOUISFERT	317977	2303653	16
LOUISFERT	317333	2303945	16
LUSANGER	305780	2306217	13
LUSANGER	306268	2306445	13
MACHECOUL	278714	2229389	2
MACHECOUL	283780	2231081	2
MACHECOUL	284294	2230176	7
MESANGER	330535	2277856	13
MESQUER	235738	2278168	15
MESQUER	236267	2278443	7
MESQUER	237775	2278656	1

<b>Communes</b>	<b>Coordonnée X (Lambert II étendu)</b>	<b>Coordonnée Y (Lambert II étendu)</b>	<b>Numéro de Formation argileuse</b>
MESQUER	238762	2278183	15
MESQUER	239395	2278376	15
MESQUER	236258	2278319	15
MESQUER	235787	2277778	15
MESQUER	236241	2278315	15
MESQUER	236131	2278226	15
MESQUER	236368	2278532	7
MESQUER	236319	2278454	7
MESQUER	236333	2278471	7
MESQUER	235551	2277813	15
MESQUER	236463	2278936	7
MESQUER	236312	2278346	15
MESQUER	236008	2277850	15
MESQUER	239390	2278309	15
MESQUER	239367	2278305	15
MESQUER	236468	2278721	7
MESQUER	236039	2277697	15
MESQUER	238903	2278202	15
MESQUER	235672	2277940	15
MESQUER	238576	2277911	15
MESQUER	236740	2279148	15
MESQUER	238953	2278332	15
MESQUER	235546	2277758	15
MESQUER	236481	2278458	7
MESQUER	238462	2277813	15
MESQUER	238238	2277486	1
MESQUER	238302	2277621	15
MESQUER	237455	2277177	15
MESQUER	236584	2279004	3
MESQUER	236513	2277971	15
MESQUER	237165	2277212	15
MESQUER	238160	2277507	1
MESQUER	239246	2277937	1
MESQUER	238007	2277262	15
MESQUER	237664	2278645	15
MESQUER	237993	2277301	15
MESQUER	236447	2278458	7
MESQUER	237042	2279052	3
MESQUER	238144	2278563	15
MESQUER	236158	2277476	15
LA MONTAGNE	294855	2250358	21
MONTBERT	308976	2237363	1
MONTOIR-DE-BRETAGNE	260493	2268310	2
MONTOIR-DE-BRETAGNE	258451	2268591	20



<b>Communes</b>	<b>Coordonnée X (Lambert II étendu)</b>	<b>Coordonnée Y (Lambert II étendu)</b>	<b>Numéro de Formation argileuse</b>
MONTOIR-DE-BRETAGNE	259172	2267987	2
MONTOIR-DE-BRETAGNE	260933	2268220	20
MONTOIR-DE-BRETAGNE	262067	2268000	20
MONTOIR-DE-BRETAGNE	261231	2268417	20
MONTOIR-DE-BRETAGNE	260383	2268809	20
LES MOUTIERS-EN-RETZ	270768	2237814	2
NANTES	303851	2257201	1
NANTES	303522	2255500	14
NANTES	303709	2258577	14
NORT-SUR-ERDRE	307950	2280532	12
NORT-SUR-ERDRE	310991	2275651	7
ORVAULT	302212	2257096	14
LE PELLERIN	284869	2254627	1
PETIT-MARS	313919	2274420	18
PESSE	282929	2291498	12
PESSE	282918	2292204	12
PESSE	277683	2292169	12
PESSE	287292	2292794	12
PESSE	278289	2293791	12
PESSE	284573	2291593	12
PESSE	286074	2292673	12
PESSE	278584	2288663	11
PESSE	281834	2295225	12
PESSE	288011	2292567	12
PESSE	281563	2295162	12
PESSE	283447	2292208	12
PESSE	278389	2293773	12
PESSE	283271	2292179	12
PESSE	278013	2288315	5
PESSE	277320	2294842	12
PESSE	284692	2292224	12
PESSE	286270	2292613	12
PESSE	282760	2291349	12
PESSE	278639	2293945	12
PESSE	278342	2290206	12
PESSE	278659	2288670	11
PESSE	279188	2288333	12
PONT-SAINT-MARTIN	303990	2243936	7
PONT-SAINT-MARTIN	305038	2246369	19
PORNIC	263533	2245178	15
PORNIC	263325	2244635	15
PORNIC	264510	2246504	7
PORNIC	268231	2244497	5
PORNIC	263156	2245313	4

<b>Communes</b>	<b>Coordonnée X (Lambert II étendu)</b>	<b>Coordonnée Y (Lambert II étendu)</b>	<b>Numéro de Formation argileuse</b>
PORNIC	261014	2245046	4
PORNIC	264458	2243424	15
PORNIC	263335	2244628	15
PORNIC	262586	2244848	15
PORNIC	263089	2245156	15
PORNIC	265633	2245633	7
PORNIC	262987	2245494	4
PORNIC	262844	2245421	4
PORNIC	262840	2245439	4
PORNIC	264538	2243858	15
PORNIC	263001	2245437	4
PORNIC	259039	2245051	15
PRINQUIAU	271646	2271867	5
PUCEUL	300792	2288038	12
PUCEUL	303476	2287995	12
REZE	306782	2248854	10
REZE	304892	2248320	5
REZE	304631	2248376	1
REZE	304881	2248419	5
REZE	304708	2249316	19
REZE	306055	2247785	19
REZE	304418	2249329	19
ROUANS	281876	2250958	20
ROUANS	282151	2251438	20
ROUANS	282671	2252285	0
ROUANS	283645	2252259	5
ROUANS	282212	2250856	20
ROUANS	284576	2252605	3
SAFFRE	304967	2281352	4
SAFFRE	304022	2283732	4
SAFFRE	304261	2281894	4
SAFFRE	305179	2285260	5
SAFFRE	305142	2285668	9
SAFFRE	305091	2284986	5
SAFFRE	301969	2282937	5
SAFFRE	305594	2285527	9
SAFFRE	305711	2285590	9
SAFFRE	304869	2285351	9
SAFFRE	306800	2284200	8
SAFFRE	304216	2284930	9
SAFFRE	304707	2283100	8
SAFFRE	304249	2283106	4
SAFFRE	304037	2285586	9
SAFFRE	304726	2285412	9

<b>Communes</b>	<b>Coordonnée X (Lambert II étendu)</b>	<b>Coordonnée Y (Lambert II étendu)</b>	<b>Numéro de Formation argileuse</b>
SAFFRE	305456	2285252	5
SAFFRE	304890	2285268	9
SAFFRE	304211	2284912	9
SAFFRE	307836	2284071	7
SAFFRE	302714	2283842	8
SAFFRE	305341	2285206	5
SAFFRE	304691	2281880	4
SAFFRE	305923	2285551	9
SAFFRE	304849	2285395	9
SAFFRE	304900	2285374	9
SAFFRE	304286	2281861	4
SAFFRE	305121	2285145	5
SAFFRE	304925	2285350	9
SAFFRE	304966	2285302	9
SAFFRE	307487	2283283	7
SAFFRE	304273	2281859	4
SAFFRE	304713	2282437	8
SAFFRE	304802	2285356	9
SAFFRE	305288	2285192	5
SAFFRE	308158	2287124	12
SAFFRE	304100	2283710	4
SAFFRE	304299	2281882	4
SAINT-AIGNAN-GRANDLIEU	298236	2244532	7
SAINT-AIGNAN-GRANDLIEU	300880	2245234	7
SAINT-AIGNAN-GRANDLIEU	299297	2245558	7
SAINT-AIGNAN-GRANDLIEU	300965	2245248	7
SAINT-AIGNAN-DE-GRAND-LIEU	297978	2244243	7
SAINT-AIGNAN-DE-GRAND-LIEU	299210	2245701	7
SAINT-AIGNAN-DE-GRAND-LIEU	299248	2245832	7
SAINT-AIGNAN-DE-GRAND-LIEU	301074	2244743	7
SAINT-AIGNAN-DE-GRAND-LIEU	298253	2244659	7
SAINT-AIGNAN-DE-GRAND-LIEU	297829	2243884	8
SAINTE-ANNE-SUR-BRIVET	274161	2281136	6
SAINTE-ANNE-SUR-BRIVET	274213	2281794	6
SAINTE-ANNE-SUR-BRIVET	274082	2282613	6
SAINT-AUBIN-DES-CHATEAUX	314904	2305169	0
SAINT-AUBIN-DES-CHATEAUX	317735	2305840	10
CORCOUE-SUR-LOGNE	302298	2224869	0
SAINT-ETIENNE-DE-MONTLUC	287586	2260132	3
SAINT-ETIENNE-DE-MONTLUC	288413	2261278	3
SAINT-ETIENNE-DE-MONTLUC	284255	2260697	5
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	294100	2251219	0
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	291791	2251012	21
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	292584	2251229	21

<b>Communes</b>	<b>Coordonnée X (Lambert II étendu)</b>	<b>Coordonnée Y (Lambert II étendu)</b>	<b>Numéro de Formation argileuse</b>
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	292478	2251569	21
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	292474	2251508	21
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	292525	2251701	21
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	293844	2251057	21
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	293786	2250965	21
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	292531	2251811	21
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	292271	2251485	21
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	292258	2251555	21
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	293317	2251138	21
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	293929	2250673	21
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	293973	2250588	21
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	293974	2250566	21
SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	294717	2250459	21
SAINT-JOACHIM	258522	2272424	20
SAINT-JOACHIM	259197	2272748	20
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	259806	2271604	2
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	259721	2271737	20
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	258779	2269920	2
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	258794	2269911	2
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	258803	2270842	3
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	260198	2273125	20
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	259850	2270724	2
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	259354	2269932	20
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	259070	2270194	20
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	260089	2270538	2
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	258715	2271004	3
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	258799	2271461	20
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	259236	2271575	20
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	259187	2271415	20
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	259127	2270631	20
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	259361	2270483	20
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	259701	2269859	2
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	259282	2271852	2
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	258488	2271803	2
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	260026	2270614	21
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	258831	2270531	3
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	259873	2270186	2
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	259076	2270392	20
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	259717	2271765	20
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	260087	2270709	2
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	258889	2271150	20
SAINT-MALO-DE-GUERSAC	260382	2273079	20
SAINT-MARS-DE-COUTAIS	291487	2242703	7
SAINT-MARS-DU-DESERT	316438	2269371	19

<b>Communes</b>	<b>Coordonnée X (Lambert II étendu)</b>	<b>Coordonnée Y (Lambert II étendu)</b>	<b>Numéro de Formation argileuse</b>
SAINT-MICHEL-CHEF-CHEF	258873	2250329	13
SAINT-MICHEL-CHEF-CHEF	260067	2251998	13
SAINT-MICHEL-CHEF-CHEF	259968	2252323	13
SAINT-NAZAIRE	253579	2262832	20
SAINT-NAZAIRE	252484	2264542	20
SAINT-NAZAIRE	257482	2265104	1
SAINT-NAZAIRE	253502	2262816	20
SAINT-NAZAIRE	252545	2264297	20
SAINT-NAZAIRE	252640	2266874	20
SAINT-NAZAIRE	252534	2264105	20
SAINT-NAZAIRE	253442	2262812	20
SAINT-NAZAIRE	255829	2263087	1
SAINT-NAZAIRE	254218	2261181	20
SAINT-NAZAIRE	255895	2262177	20
SAINT-NAZAIRE	251719	2259715	19
SAINT-NAZAIRE	258326	2265465	1
SAINT-NAZAIRE	250747	2263285	20
SAINT-NAZAIRE	254610	2264048	20
SAINT-SEBASTIEN-SUR-LOIRE	310641	2251087	7
SAUTRON	294180	2261479	14
SAUTRON	294474	2261135	14
SION-LES-MINES	306183	2310969	10
LES SORINIERES	307841	2246792	4
LES SORINIERES	306915	2246044	19
SOUDAN	327140	2310408	17
SUCE-SUR-ERDRE	309057	2266622	14
SUCE-SUR-ERDRE	307614	2268178	4
SUCE-SUR-ERDRE	309174	2267118	14
TRINIAC	256816	2265921	20
TRIGNAC	256829	2265901	20
TRIGNAC	255835	2268043	20
LA ROCHE-BLANCHE	337916	2276857	13



**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009  
45060 - Orléans Cedex 2 - France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Service géologique régional « Pays de la Loire »**  
1, rue des Saumonières  
BP92342  
44323 Nantes cedex 03 - France  
Tél. : 02 51 86 01 51