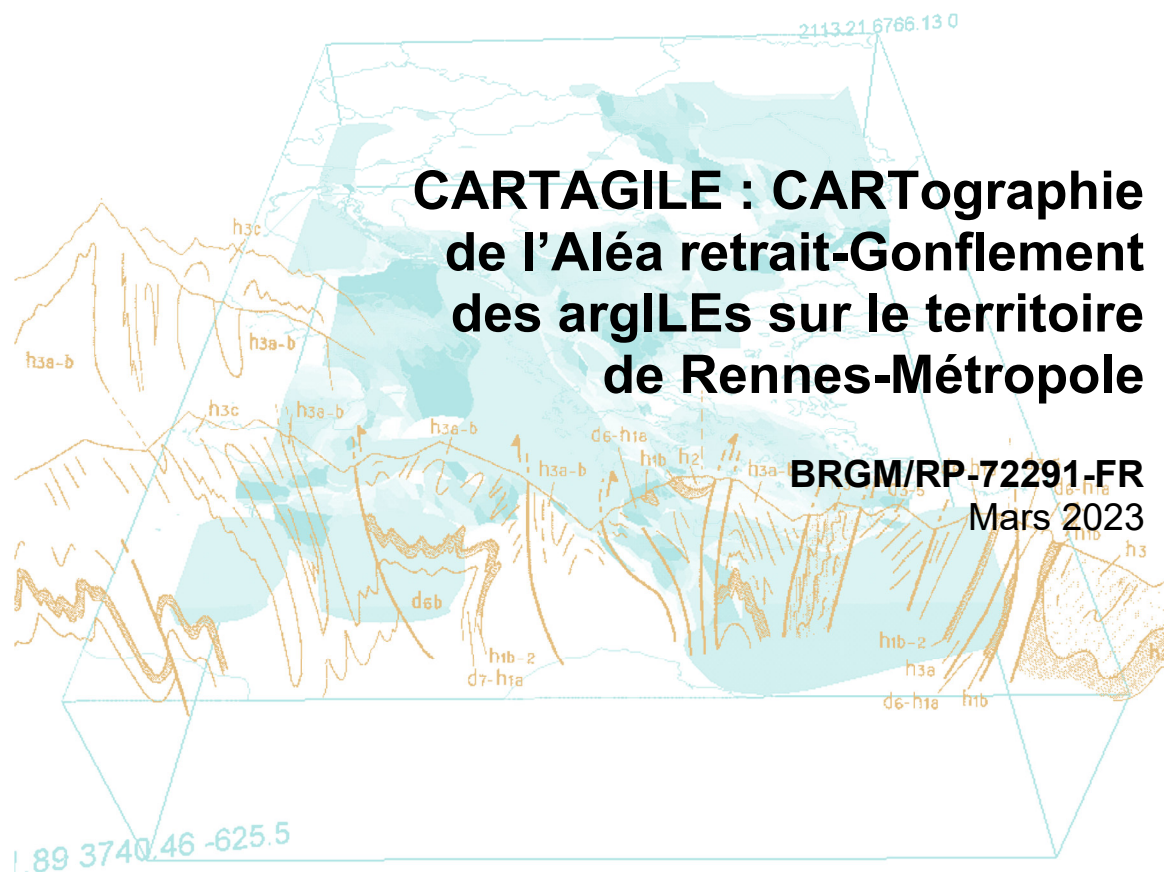




Document public

CARTAGILE : CARTographie de l'Aléa retrait-Gonflement des argILes sur le territoire de Rennes-Métropole

BRGM/RP-72291-FR
Mars 2023

Étude réalisée dans le cadre de l'opération
de service public AP19REN013

J.-M. Schroëtter, G. Martelet et A. Peyrefitte

Vérificateur :

Nom : Sylvestre LeRoy

Date : 31/08/2023

Signature :



Approbateur :

Nom : Pauline Drzewiecki

Date : 22/11/2023

Signature :



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



RENNES
Ville et Métropole



Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse

<https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : argiles, marnes, altérites, argiles gonflantes, smectites, tertiaire, retrait-gonflement, aléa, risque naturel, sinistre sécheresse, catastrophe naturelle, géotechnique, géophysique, cartographie, Rennes-Métropole.

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

J.-M. Schroëtter, G. Martelet et A. Peyrefitte. (2022) – CARTAGILE : CARTographie de l'Aléa retrait-Gonflement des argILes sur le territoire de Rennes-Métropole. Rapport BRGM/RP-72291-FR. 102 p., 72 ill., 3 ann.

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, 1996-97, puis 2003, 2005 mais aussi celles récentes de 2011 à l'été 2022.

L'Ille-et-Vilaine était concerné par ce phénomène lié à la sécheresse avec **159** sinistres recensés lors de la réalisation de la carte d'aléa départementale en 2010, *parmi lesquels 148* avaient été déclarés par les mairies et **156** avaient pu être localisés. Sur cette même carte, le département était impacté par un aléa fort sur **0,12 %** de sa superficie, **3,07 %** en aléa moyen et **43,29 %** en aléa faible.

13 communes d'Ille-et-Vilaine sur les **353**, **étaient concernées** sur la période comprise entre 1990 et 2008. Mais la **majorité des sinistres et la zone principale en aléa fort** d'Ille-et-Vilaine, se situait sur le territoire de Rennes-Métropole.

Depuis 2010, les occurrences du phénomène se sont répétées sur la commune la plus impactée de Bretagne, celle de **Pont-Péan**, avec en 2010 plus **100** impacts qui sont passés à **180** à l'heure actuelle.

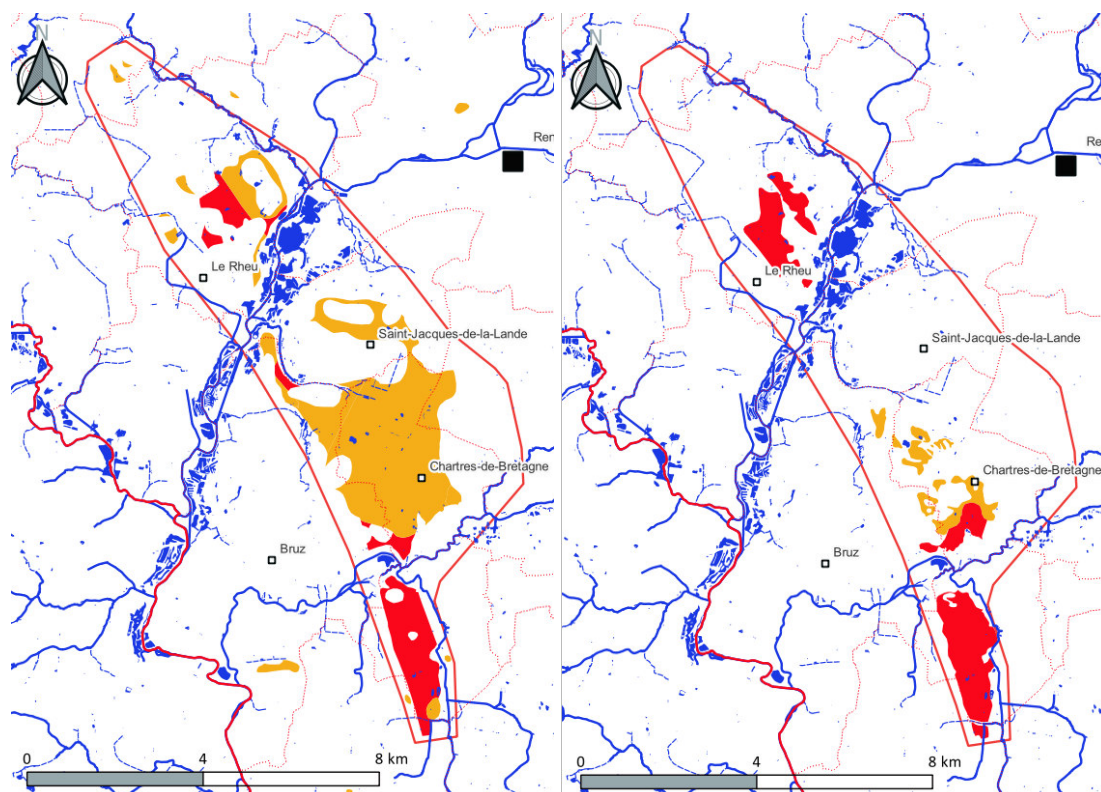
C'est dans ce contexte qu'une étude plus poussée que celle à l'échelle départementale a été menée afin de mieux connaître les zones en aléa fort et moyen. Le BRGM Bretagne (Service géologique national) a proposé une meilleure caractérisation de ces formations géologiques argileuses en termes d'aléa, à partir d'une cartographie de plus haute résolution (1/10 000) à l'aide de **deux méthodes** différentes et complémentaires : (1) l'une **novatrice** à partir de l'acquisition de la **radiométrie spectrale gamma** des sols (radioactivité naturelle des sols) et une seconde **traditionnelle**, de cartographie de terrain.

La combinaison des deux méthodes a permis de préciser la **cartographie** de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux. Cette nouvelle carte sera intégrée au portail sur les risques naturels français : <http://georisque.gouv.fr> ainsi qu'aux **documents d'urbanisme de Rennes Métropole**.

Les communes impactées par un aléa fort sont les communes (carte ci-dessous) :

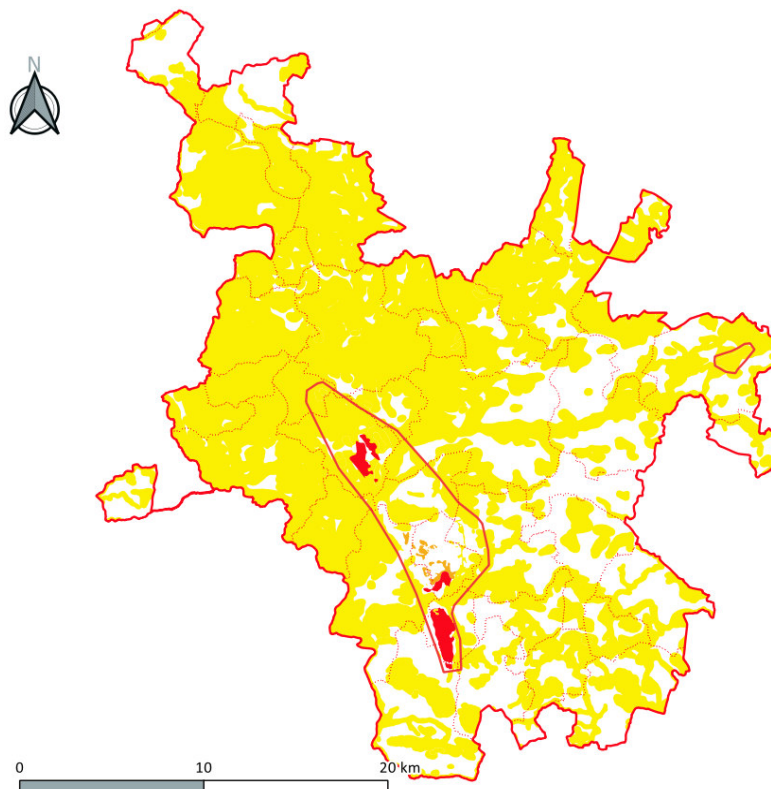
- De Le-Rheu (au nord),
- Chartres-de-Bretagne (au sud du bourg en bordure de la Seiche),
- Bruz (à l'est de la commune en bordure de la Seiche),
- Pont-Péan sur l'ensemble du bourg,
- Laillé à l'est de la commune.

Les communes impactées par l'aléa moyen sont Chartres-de-Bretagne et Bruz.



Ancienne carte d'aléa retrait-gonflement du secteur d'étude principal : aléa moyen en orange et fort en rouge (Schroëtter et al., 2010) et nouvelle carte à droite (Localisation ci-dessous).

L'ensemble des polygones en aléa moyen du territoire de Rennes Métropole ont vu leur aléa retrait-gonflement passé en aléa faible.



Nouvelle carte d'aléa retrait-gonflement des argiles du territoire de Rennes Métropole - Nouvelle carte proposée pour une mise à jour sur le site Georisques.gouv.fr.

Sommaire

1. Présentation.....	11
2. L'aléa Retrait-Gonflement des Argiles (RGA) : méthodologie nationale, en Ile-et-Vilaine et sur Rennes Métropole	15
2.1. FACTEURS INTERVENANT DANS LE RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES	15
2.1.1. Facteurs de prédisposition	16
2.1.2. Facteurs de déclenchement : les phénomènes climatiques	18
2.1.3. Facteurs anthropiques	19
2.2. METHODOLOGIE DE L'ALEA RETRAIT-GONFLEMENT	19
2.2.1. Création de la carte géologique des formations argileuses et marneuses..	20
2.2.2. Caractérisation lithologique, géotechnique et minéralogique des formations	20
2.2.3. Examen des autres facteurs de prédisposition et de déclenchement	22
2.2.4. Carte de susceptibilité.....	22
2.2.5. Susceptibilité moyenne et forte des formations géologiques argileuses sur le territoire de Rennes Métropole.....	23
2.2.6. Recensement et localisation géographique des sinistres	32
2.2.7. Détermination des densités de sinistres	33
2.2.8. Carte d'aléa	34
3. CARTAGILE : Résultats	37
3.1 LE TERRITOIRE A COUVRIR	37
3.2 CARTOGRAPHIE DES ARGILES PAR RADIOMETRIE SPECTRALE	39
3.2.1. Description de la méthode	39
3.2.2. Développement applicatif.....	40
3.2.3. Conditions et temps d'acquisition des données sur le terrain	41
3.2.4. Résultats et restitution des données de spectrométrie gamma	44
3.2 CARTOGRAPHIE TRADITIONNELLE DES ARGILES	47
3.2.1. Cartographie géologique de détail au 1/10 000ème	47
3.2.2. Requalification des polygones de 1 à 11 en aléa moyen : Acigné, Thorigné-Fouillard, Saint-Sulpice-la-forêt, Betton/La Chapelle-Fougeretz, Montgermont, Pacé, Rennes, Vezin-le-coquet/Le Rheu, Bruz, Laillé et Saint-Armel.	49
<i>Conclusions</i>	51
3.2.3. Requalification des polygones du secteur 12 en aléa moyen et fort (secteur principal) : Le Rheu, Saint-Jacques-de-la-lande, Chartres-de-Bretagne, Pont-Péan et Laillé nord.	52
3.3 LA CARTE DES ARGILES.....	66

<i>Synthèse des résultats des deux méthodes</i>	66
<i>Validation des argiles identifiées avec la radiométrie gamma</i>	67
4. Carte d'aléa	71
4.1 CARACTERISATION MINERALOGIQUE	71
4.1.1. Minéralogie des argiles pliocènes	72
4.1.2. Minéralogie des argiles éo-oligocènes	73
4.2 CARACTERISATION GEOTECHNIQUE.....	74
4.2.1. Analyses géotechniques des argiles pliocènes	74
4.2.2. Analyses géotechniques des argiles éo-oligocènes	75
4.3 DETERMINATION DU NIVEAU D'ALEA RGA	75
4.3.1. Rappels du calcul de la note d'aléa RGA	75
4.3.1. Les notes d'aléa RGA	76
4.4 LA NOUVELLE CARTE D'ALEA RETRAIT-GONFLEMENT	79
5. Conclusion	83
6. Bibliographie	85
Annexe 1 - Mécanisme du RGA	90
Annexe 2 – Susceptibilité au RGA	93
Annexe 3 – Analyses minéralogiques (DRX)	99

Liste des illustrations

Illustration 1 : Carte initiale (2010) de l'aléa retrait-gonflement, fort (en rouge) à moyen (en orange) du territoire de Rennes Métropole (l'aléa faible n'est pas représenté ici).....	12
Illustration 2 : Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche	15
Illustration 3 : Méthodologie nationale de l'évaluation de l'aléa retrait-gonflement des formations géologiques argileuses.....	19
Illustration 4 : Passage des cartes géologiques au 1/50 000, à la carte géologique harmonisée et à la carte des argiles pour l'Ille-et-Vilaine (Schroëtter et al., 2010)	20
Illustration 5 : Synthèse des données entrées dans la caractérisation géotechniques des formations géologiques argileuses d'Ille-et-Vilaine (Schroëtter et al., 2010)	21
Illustration 6 : Notes lithologique (L), minéralogique (M) et géotechnique (G), attribuées à chaque formation géologique contenant des argiles.....	22
Illustration 7 : Calcul de l'indice de susceptibilité (iS) d'une formation géologiques argileuse	23
Illustration 8 : Carte de susceptibilité à l'aléa retrait-gonflement en Ille-et-Vilaine (Schroëtter et al., 2010).....	23
Illustration 9 : Répartition départementale de la formation RS	24
Illustration 10 : Répartition départementale de la formation p1-2-IV	25
Illustration 11 : Schéma des relations entre les formations pliocènes, et quaternaires avec la géomorphologie (Notice explicative de la carte de n°419, Redon)	26
Illustration 12 : Répartition départementale de la formation pA.....	26
Illustration 13 : Répartition départementale de la formation B.....	27
Illustration 14 : Répartition départementale de la formation m5-p.....	28
Illustration 15 : Répartition départementale de la formation m-p.....	28
Illustration 16 : A gauche – Carte géologique du bassin de Chartres-de-Bretagne ; En haut à droite – Coupe géologique à travers le bassin (de A à B) et en bas à droite – Profil sismique tiré lors du programme GéoFrance3D.....	29
Illustration 17 : Répartition départementale de la formation g1a	30
Illustration 18 : Répartition départementale de la formation g	31
Illustration 19 : Répartition départementale de la formation e7-g1	32
Illustration 20 : Mise à jour 2022 des sinistres recensés en 2010.	33
Illustration 21 : Nouveaux sinistres recensés par l'association de Pont-Péan et sinistres recensés en 2010 (Schroëtter et al., 2010).....	33
Illustration 22 : Sinistralité et susceptibilité au RGA en 2010 pour les formations géologiques argileuses concernées par CARTAGILE c'est-à-dire les formations n°9, 11 et 16 et 19 (Schroëtter et al., 2010)	34

Illustration 23 : Formule de calcul de l'aléa retrait-gonflement pour chaque formation géologique argileuse	34
Illustration 24 : Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles en Ile-et-Vilaine (Schroetter et al., 2010) et sur le Territoire de Rennes Métropole.....	35
Illustration 25 : Le territoire couvert par l'étude CARTAGILE : Territoire de Rennes-Métropole avec l'aléa RGA fort et moyen (Schroëtter et al., 2010).	38
Illustration 26 : En haut - Avion et plan de vol pour la mesure de la radiométrie spectrale des sols et interprétation des teneurs en fonction du signal en retour ; En bas – Le gamma-spectromètre sur le dos d'un opérateur de terrain.	40
Illustration 27 : Méthodologie RégoCentre, brevetée, pour réaliser à partir de la radiométrie spectrale (à gauche) une carte des différents types de roches et/ou de sols (à droite).	41
Illustration 28 : Stratégie d'acquisition mise en place et adaptée aux conditions de terrain et météorologiques – A gauche : théorique ; au milieu : stratégique et à droite : réelle.	43
Illustration 29 : Levés des teneurs dans les trois éléments U : uranium, K : potassium et Th : thorium à gauche et à droite, combinaison pour la réalisation de la carte de spectrométrie gamma ternaire des sols de la zone d'étude (Echelle de validité le 1/10 000).	44
Illustration 30 : Comparaison entre la carte géologique simplifiée et de la radiométrie gamma.....	45
Illustration 31 : Détail de la cartographie au sein des sables & argiles plio-quaternaires dans le secteur des fours à chaux au niveau de la Lormandière.....	47
Illustration 32 : Carte des chemins parcourus à gauche et carte des points d'observation à droite.....	48
Illustration 33 : Coupe du talweg dans le secteur de Betton, lieu-dit Belle écuelle	50
Illustration 34 : Liste des secteurs et croix rouges soulignant leur changement de niveau d'aléa de moyen à faible.	52
Illustration 35 : Points d'observation de la cartographie de terrain (rond vide) avec les points d'observation de qualité (rond rose) et les forages de la BSS avec une coupe géologique utilisable en complément (rond jaune).....	53
Illustration 36 : Points d'observation de la cartographie de terrain (rond vide) avec les points d'observation de qualité (rond rose) sur la formation géologique p1-2-IV en aléa moyen.	54
Illustration 37 : Point d'observation Cart54 – microlog du talus de route au sud de La Heuzardière, Commune de Le Rheu.....	55
Illustration 38 : Point d'observation Cart52 - microlog d'un ancien de front de taille (Sud) de La Heuzardière, Commune de Le Rheu ; Photographie du bas : argiles de décantation.	56
Illustration 39 : En haut - Coupe d'Apigné tirée de la notice de la carte géologique au 1/50 000, Feuille n°317, Rennes, Trautmann et al., 2000) avec les argiles éo-oligocènes surlignées en orange ; En bas – Même coupe mais sans exagération verticale. La limite entre les sables pliocènes rouges et les argiles éo-oligocènes fait 25° et pourrait correspondre à un talweg.	57

Illustration 40 : Point d'observation Cart31 - microlog de bord de route sur 700 m de long, le long de la RD n°34 (Chartres-de-Bretagne)	58
Illustration 41 : Point d'observation Cart19 - microlog de bord de route sur 200 m de long, le long de la route du Clos Renaud (Chartres-de-Bretagne) passant sous la route de la Croix-blanc.	59
Illustration 42 : Point d'observation Cart56 - microlog dans le bourg de Chartres-de-Bretagne, à la faveur de travaux de la construction d'un R+2 avec souterrain (Chartres-de-Bretagne)	60
Illustration 43 : Les argiles « pliocènes » semblent plutôt se situer en moyenne sous la côte 34 m NGF (limite des pixels noirs et orangés tirés du MNT au pas de 25 m de l'IGN) mais sans que ce soit une règle absolue.....	61
Illustration 44 – Relation entre les formations pliocènes et quaternaires avec la géomorphologie (d'après la notice explicative de la carte de n°419, Redon).....	62
Illustration 45 : En haut, schéma conceptuel du cycle miocène sup.-pliocène d'Ille-et-Vilaine (cette étude) et en bas, du Morbihan sur la partie Offshore à partir de la cartographie CARTAGILE (modifié d'après Paquet et al., 2010).....	63
Illustration 46 : Points d'observation de la cartographie de terrain (rond vide) et les lithologies observées (losanges oranges), cheminements colorés du levé de spectrométrie gamma, sur la formation géologique éo-oligocène e6-g1 en aléa fort au bourg de Pont-Péan (35).....	64
Illustration 47 : Point d'observation Cart14 – Décapage pour l'aménagement d'une parcelle située au-dessus des argiles éo-oligocènes dans le bourg de Pont-Péan (35).	65
Illustration 48 : Ensemble des données complémentaires sur le territoire de Rennes Métropole utilisées pour la réalisation de la carte géologique.	66
Illustration 49 : En haut - Répartition des valeurs des formations géologiques de la région Centre dans diagramme K-Th (Diagramme Schlumberger (1985) dans Tissoux et al. 2017) et en bas - répartition dans diagramme K-Th des trois formations argileuses identifiées dans le présent projet CARTAGILE.....	68
Illustration 50 : Pourcentage de smectite (analyses DRX) sur les argiles tertiaires bretonnes (Schroëtter et al., 2010a, b, c et d et cette étude).....	69
Illustration 51 : Nouvelle carte des argiles réalisée sur le secteur de Pont-Péan par la combinaison de la radiométrie spectrale gamma et de la cartographie traditionnelle.	70
Illustration 52 : Formule de calcul de l'aléa retrait-gonflement pour chaque formation géologique argileuse	71
Illustration 53 : Les analyses DRX réalisées et utilisées pour la caractérisation minéralogique des deux formations géologiques argileuses identifiées dans CARTAGILE.	71
Illustration 54 : Log simplifié du forage CINERGY et analyses DRX des argiles (modifié d'après Bauer et al., 2011)	72
Illustration 55 : Minéralogie des argiles pliocènes par diffraction des rayons X (DRX)	72
Illustration 56 : Critère de détermination de la note minérologique des formations argileuses	73

Illustration 57 : Minéralogie des argiles éo-oligocènes par diffraction des rayons X (DRX)	73
Illustration 58 : Grille d'évaluation de la note géotechnique de la méthode nationale pour l'indice de plasticité et la valeur au bleu de méthylène.	74
Illustration 59 : Valeurs de l'indice de plasticité (Ip) et de la valeur de bleu de méthylène (VBS) des argiles pliocènes dans le secteur de Chartres-de-Bretagne/Bruz.....	74
Illustration 60 : Valeur de l'indice de plasticité (Ip) des argiles éo-oligocènes dans le secteur de Pont-Péan.....	75
Illustration 61 - Calcul du niveau d'aléa retrait-gonflement des formations argileuses identifiées dans CARTAGILE	78
Illustration 62 : Cartographie des aléas moyen (en orange) et fort (en rouge) du secteur d'étude principal selon l'ancienne carte d'aléa retrait-gonflement (Schroëtter et al., 2010c), à gauche et nouvelle carte à droite.	79
Illustration 63 : Nouvelle carte d'aléa retrait-gonflement des argiles du territoire de Rennes Métropole. Nouvelle carte proposée pour une mise à jour sur le site Georisques.gouv.fr.	80
Illustration 64 : Nouvelle carte d'aléa retrait-gonflement (aléas moyen et fort uniquement) sur le secteur 12	82
Illustration 65 : Algorithme méthodologique mis en place dans le projet CARTAGILE et répliquable dans des secteurs peu affleurants (aléas moyen et fort).....	83
Illustration 66 – Hiérarchisation de la susceptibilité en fonction de la nature argileuse de la formation	93
Illustration 67 – Hiérarchisation des formations en fonction du pourcentage de minéraux gonflants	94
Illustration 68 - Classification des sols selon le guide GTR92 (source © LCPC)	95
Illustration 69 – Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de l'indice de plasticité de la formation.....	96
Illustration 70 - Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction de la valeur au bleu de méthylène de la formation	97
Illustration 71 - Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du retrait linéaire de la formation	97
Illustration 72 - Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du coefficient de gonflement de la formation	97

1. Présentation

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

Le département de l'Ille-et-Vilaine était concerné par ce phénomène lié à la sécheresse avec **159** sinistres recensés lors de la réalisation de la carte d'aléa départementale en 2010 (Schroëtter et al., 2010), dont **156** sont localisés et **148** déclarés par les mairies. L'Ille-et-Vilaine se situe en termes de coût d'indemnisation sur la période 1989-2003, au **58^{ième}** rang des départements avec un montant de **2 200 000** euros (estimation CCR : Caisse Centrale de Réassurance, de septembre 2008, pour un coût national de 3,9 milliards d'euros) pour ce phénomène.

Seules **13** communes sur les **353** que compte le département avaient été reconnues en état de catastrophe naturelle pour ce phénomène, pour des périodes comprises entre 1990 et 2008.

La cartographie départementale des formations argileuses et marneuses affleurantes à sub-affleurantes, réalisée en 2010 et tirée des cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM, avait mis en évidence **25** formations dont la susceptibilité vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement avait été évaluée. La classification de chaque formation argileuse, basée sur trois critères principaux (la caractérisation lithologique, son comportement géotechnique et la composition minéralogique) avait permis l'établissement d'une carte départementale de susceptibilité au phénomène de retrait-gonflement. La confrontation entre cette carte de susceptibilité et la carte des sinistres recensés, avait abouti à la proposition d'une carte de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux du département.

Cette carte d'aléa montrait sur le département : seulement **0,12 %** d'aléa fort, **3,07 %** d'aléa moyen, **43,29 %** d'aléa faible et enfin **53,52 %** de la surface en aléa a priori nul. En effet, **la grande majorité des sinistres et la zone en aléa fort principale d'Ille-et-Vilaine** se situe préférentiellement au **sud de la ville de Rennes**. Depuis plusieurs années, des sinistres supposés liés à des problématiques de retrait-gonflement continuent à se produire de façon récurrente sur ce secteur.

Le phénomène est particulièrement associé à une formation argileuse particulière d'âge éocène (en rouge sur l'illustration 1), présente principalement dans le sous-sol de la commune de **Pont-Péan**, qui est la plus impactée de Bretagne (plus de **100** sinistres sur le secteur pour **156** au total sur le département et **190** pour toute la Bretagne, lors des cartographies départementales réalisées à la fin des années 2000).

Le retrait-gonflement des argiles se manifeste également, mais avec une moindre ampleur, sur d'autres communes de Rennes Métropole, telles que : **Le Rheu, Saint-Jacques-de-la-Lande, Rennes** (dans une moindre mesure), **Bruz, Chartres-de-Bretagne et Laillé** (marginale).

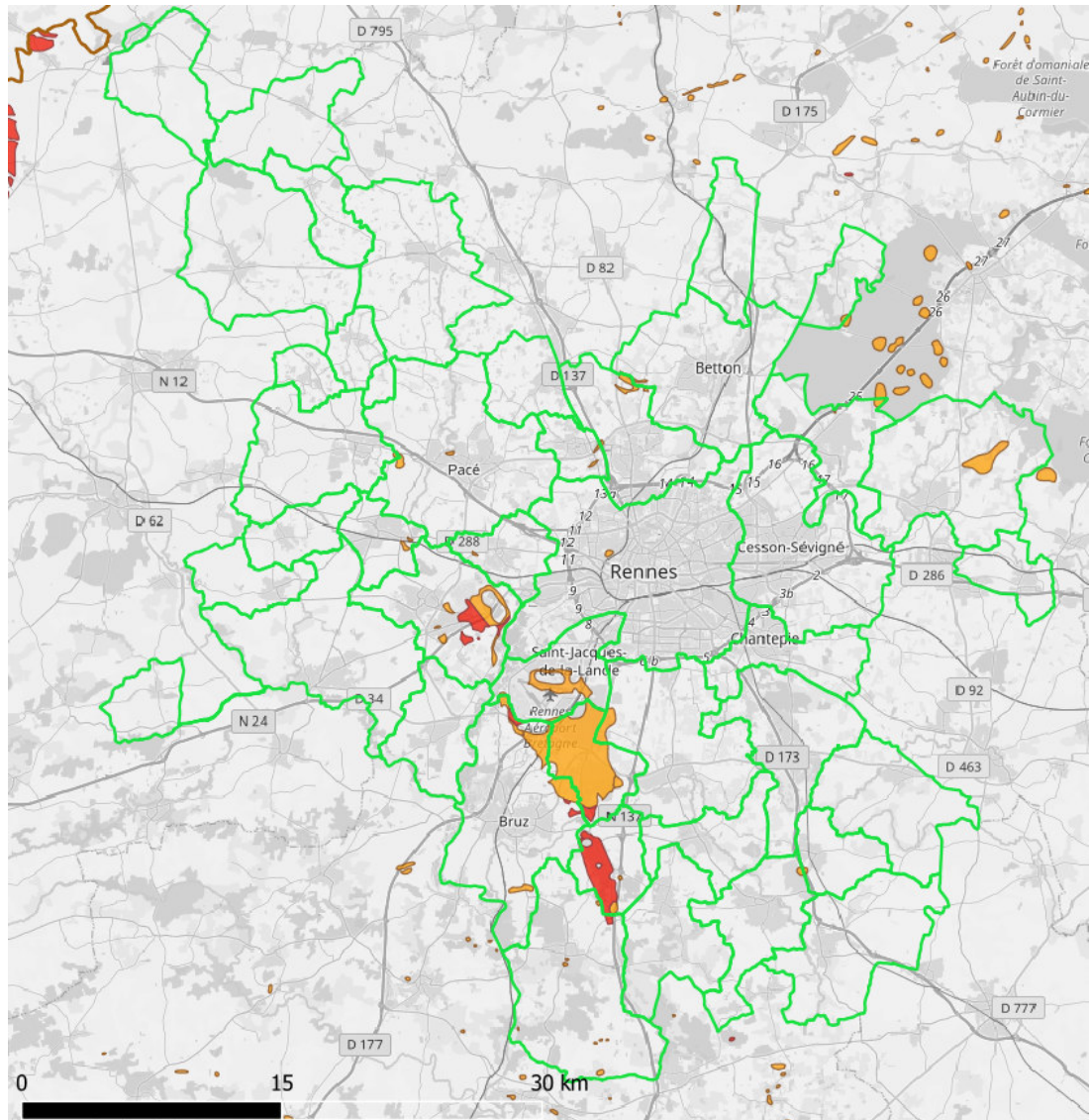


Illustration 1 : Carte initiale (2010) de l'aléa retrait-gonflement, fort (en rouge) à moyen (en orange) du territoire de Rennes Métropole (l'aléa faible n'est pas représenté ici).

Les épisodes de retrait et gonflement des argiles à répétition sur cette zone sud rennaise amènent à se poser certaines questions sur la connaissance réelle des secteurs « gonflants » et sur la caractérisation des sols argileux réalisées au 1/50 000, en 2010 à l'échelle départementale, d'autant plus que les formations géologiques argileuses du secteur sont des formations géologiques d'origine continentale, pouvant contenir des variations de faciès lithologiques importantes (**variations importantes de types de sols au sein d'une même formation géologique**).

Suite aux **questions récurrentes** posées au BRGM de Bretagne sur le phénomène, celui-ci a proposé une meilleure caractérisation de ces formations géologiques argileuses, à partir d'une nouvelle cartographie de plus haute résolution (1/10 000) à l'aide de **deux méthodes différentes** et complémentaires :

- L'une **novatrice** à partir d'un outil de géophysique développé par la Direction de la Géologie et de la Ressource (DGR) du BRGM, permettant l'acquisition de

la **radiométrie spectrale des sols** (radioactivité naturelle des sols) afin d'en déterminer l'argilosité,

- Et la seconde, **traditionnelle**, de cartographie de terrain à l'aide d'une tarière à main afin d'effectuer un échantillonnage des sols pour calibrer la première.

Cette **cartographie haute résolution** et la définition de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux sera intégrée aux **documents d'urbanisme de Rennes Métropole**.

Les trois opérations proposées (et détaillées au chapitre 3) pour ce projet de « recherche et développement » sont :

- Opération 1 : Cartographie des argiles par radiométrie spectrale gamma,
- Opération 2 : Cartographie géologique traditionnelle de détail des argiles,
- Et enfin l'Opération 3 correspondant à la « Synthèse des résultats ».

Le BRGM a procédé à la rédaction de différents documents :

- Une fiche pédagogique expliquant les processus en jeu, les risques associés et les bonnes pratiques d'utilisation des documents ;
- Un document de communication sur les dispositions constructives associées ;
- Une plaquette de communication pour porter à connaissance les résultats de l'étude sur le périmètre concerné (échelles communale et de la métropole rennaise) auprès des citoyens et des élus.

2. L'aléa Retrait-Gonflement des Argiles (RGA) : méthodologie nationale, en Ile-et-Vilaine et sur Rennes Métropole

2.1. FACTEURS INTERVENANT DANS LE RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES

Les phénomènes de retrait-gonflement sont dus pour l'essentiel à des variations de volume de formations argileuses liées à l'évolution de leur teneur en eau (Illustration 2).

Ces variations de volume provoquent des mouvements différentiels du terrain, qui sont susceptibles de provoquer des désordres au niveau du bâti (fissures notamment).

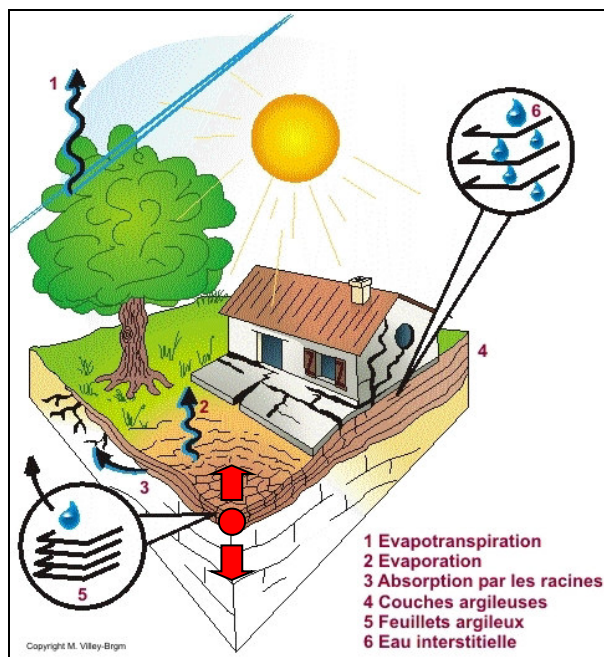


Illustration 2 : Schématisation de la dessiccation des sols argileux en période sèche

L'aléa retrait-gonflement est donc la probabilité d'occurrence spatiale et temporelle des conditions nécessaires à la réalisation d'un tel phénomène. Le phénomène a pour facteurs de causalité : les facteurs de prédisposition et les facteurs de déclenchement.

Les **facteurs de prédisposition** sont les facteurs dont la présence peut induire le phénomène de retrait-gonflement (mais ne suffit pas à le déclencher). Ces facteurs de prédisposition peuvent être internes/intrinsèques, liés à la nature du sol, et/ou environnementaux, liés au site.

Les facteurs de prédisposition conditionnent la répartition spatiale du phénomène, et permettent de caractériser la susceptibilité du milieu vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement.

Les **facteurs de déclenchement** sont ceux qui vont provoquer le phénomène de retrait-gonflement à la condition *sine qua non* de la présence de facteurs de prédisposition. La connaissance des facteurs de déclenchement permet de déterminer

l'occurrence du phénomène (autrement dit l'aléa et non plus seulement la susceptibilité).

2.1.1. Facteurs de prédisposition

Nature du sol

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

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

Cependant, il est important de signaler que les cartes géologiques au 1/50 000^{ième} peuvent ne pas suffire dans la détermination et la répartition des sols argileux sujets au retrait-gonflement, car elles peuvent ne pas prendre en compte les éventuelles transformations locales du sous sol, comme par exemple l'altération du substratum rocheux en argile ou d'éventuelles variations de faciès au sein même d'une même formation géologique argileuse ou encore la cartographie des formations géologiques superficielles pouvant se révéler hétérogène d'une carte à l'autre.

Ce fut le cas en Ile-et-Vilaine où les parts respectives dues à l'altération des roches du substratum rocheux en argile pouvaient être non cartographiées sur certaines cartes géologiques au 1/50 000^{ième}. Une méthodologie avait alors été mise en place pour palier à ce manque (Schroëtter et al., 2010).

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

La géométrie de la formation argileuse influe en moindre proportion sur la susceptibilité au retrait-gonflement d'autant que (1) la formation sera en position superficielle avec des niveaux argileux épais et continus ou (2) une alternance de niveaux argileux et de niveaux plus perméables (sableux, par exemple), sièges de circulations d'eau qui peuvent être à l'origine de fréquentes variations de teneur en eau dans les parties argileuses.

L'autre paramètre prépondérant qui détermine le degré de susceptibilité d'une formation argileuse au phénomène de retrait-gonflement est la composition minéralogique des argiles. Une formation sera d'autant plus susceptible au phénomène que sa fraction argileuse contiendra une forte proportion de minéraux argileux dits "gonflants". En effet, les smectites (dont font partie les montmorillonites) mais aussi certains minéraux argileux interstratifiés, comme la vermiculite et certaines chlorites, ont un pouvoir gonflant plus important que les kaolinites, les illites, etc.

La connaissance de la composition minéralogique de la formation géologique argileuse se détermine par des analyses diffractométriques aux rayons X (DRX) en laboratoire.

On peut enfin caractériser, par des essais géotechniques en laboratoire, l'aptitude du matériau à absorber de l'eau, voire mesurer directement sa capacité de retrait ou de gonflement.

Ces deux dernières approches (caractérisation minéralogique et évaluation du comportement géotechnique du matériau) présentent l'avantage majeur de fournir des résultats quantitatifs rigoureux, mais exigent un grand nombre de mesures pour caractériser de manière statistique le comportement de chacune des formations, qui peuvent être par nature hétérogènes.

Contexte hydrologéologique

Les conditions hydrogéologiques constituent aussi des facteurs de prédisposition, mais environnementaux qui régissent les conditions hydriques *in situ*. Hélas, la connaissance de la nappe phréatique est souvent, très souvent manquante car complexe, mais son action est tout aussi prépondérante dans l'amplitude du phénomène. Cette zone non saturée au dessus de la zone saturée, est très versatile et sa connaissance est un enjeu majeur au-delà de l'analyse RGA.

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.

Géomorphologie

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

La présence d'une pente favorise le ruissellement et le drainage par phénomène gravitaire, tandis qu'une morphologie plate sera d'avantage susceptible de recueillir des eaux stagnantes qui ralentiront la dessiccation du sol. Par ailleurs, un terrain en pente exposé au sud sera plus sensible à l'évaporation du fait de l'ensoleillement, qu'un terrain plat ou exposé différemment.

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.

Végétation

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

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

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

Défauts de construction

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

2.1.2. Facteurs de déclenchement : les 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 sous nos climats tempérés, 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. 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.

2.1.3. Facteurs anthropiques

Ce sont des facteurs de déclenchement qui ne sont pas liés à un phénomène climatique mais à une action humaine. En effet, les travaux d'aménagement, modifiant les écoulements superficiels et souterrains, comme 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. Pour ces derniers facteurs, une étude récente conduite par CEBTP-Solen sur environ 994 maisons sinistrées montre que ces facteurs peuvent être pris en compte dans un tiers des cas étudiés (Vincent et *al.*, 2006).

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. METHODOLOGIE DE L'ALEA RETRAIT-GONFLEMENT

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 ; 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).

Cette méthodologie a été validée par le ministère en charge de l'environnement et a été appliquée dans le cadre d'un programme qui a concerné l'ensemble des départements métropolitains français, ce qui a permis d'obtenir des résultats homogènes au niveau national (Vincent et *al.*, 2008).

Les quatre départements bretons (en 2010) avaient fait l'objet d'études sur cet aléa RGA, réalisées avec la même méthodologie, rappelée ci-dessous (Illustration 3).

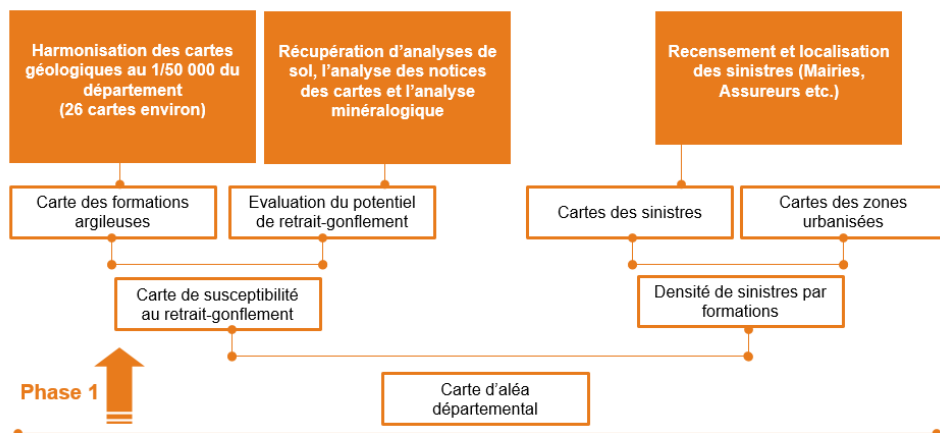


Illustration 3 : Méthodologie nationale de l'évaluation de l'aléa retrait-gonflement des formations géologiques argileuses

2.2.1. Création de la carte géologique des formations argileuses et marneuses

La création de la carte géologique des formations argileuse et marneuse, est réalisée par extraction des cartes géologiques éditées par le BRGM à l'échelle 1/50 000 couvrant le département, et préalablement harmonisées (Cagnard, 2009 ;Illustration 4).

En complément à la carte des formations argileuses et marneuses du département, des données ponctuelles issues de diverses sources sont collectées et compilées : **1 971** sondages saisis pour la cartographie de l'aléa retrait-gonflement de l'Ille-et-Vilaine et provenant d'études géotechniques, **4 631** sondages issus de la banque de données du sous sol (BSS) gérée par le BRGM, dont **1 314** indiquant des argiles dans la tranche 0-10 m et **1 332** sondages réinterprétés lors de l'étude SILURE (Mougin et al., 2008), sur lesquels avait été interprétée et extraite la base des altérites.

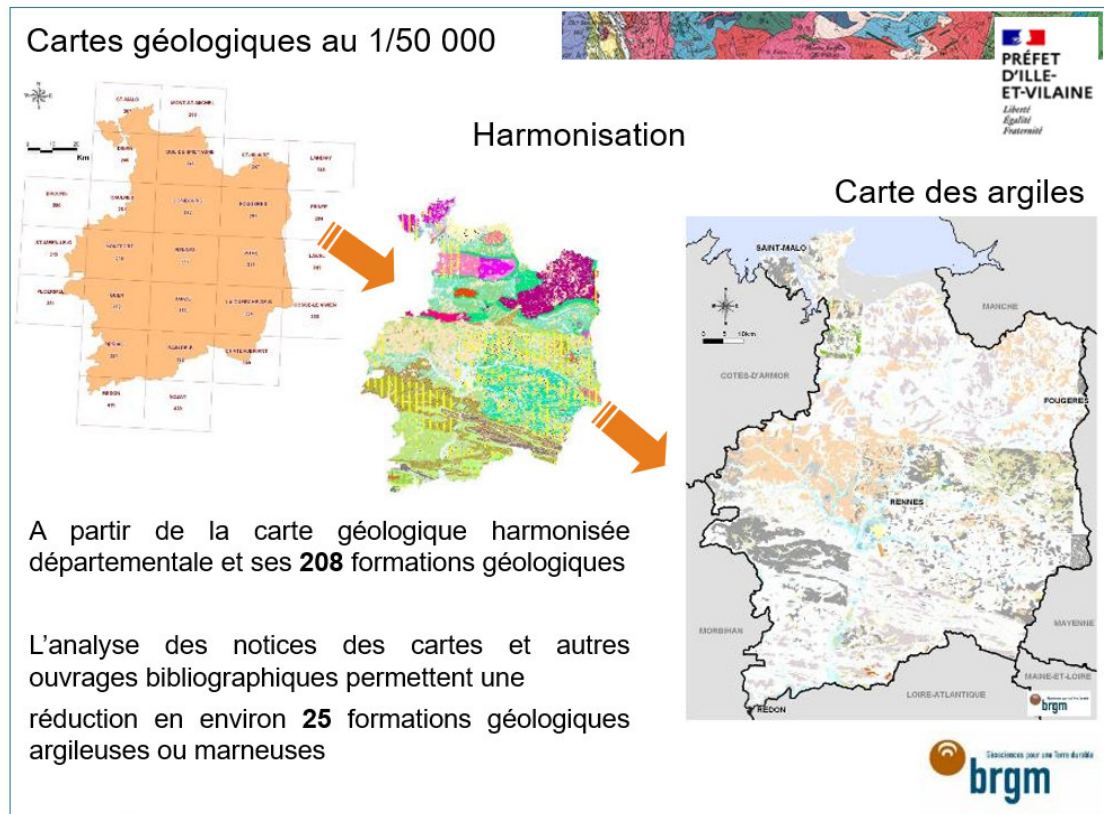


Illustration 4 : Passage des cartes géologiques au 1/50 000, à la carte géologique harmonisée et à la carte des argiles pour l'Ille-et-Vilaine (Schroëtter et al., 2010)

2.2.2. Caractérisation lithologique, géotechnique et minéralogique des formations

A partir de la carte des formations argileuses et marneuses, chaque formation argileuse et marneuse a été caractérisée pour évaluer sa susceptibilité au retrait et gonflement.

La caractérisation lithologique des formations argileuses et marneuses (i.e. la proportion de matériaux argileux présente dans la formation) a été élaborée, pour chacune d'entre-elles, essentiellement à partir de la description faite de ces formations sur les cartes géologiques au 1/50 000^{ème} et de la connaissance de terrain du géologue régional (Illustration 6).

La caractérisation géotechnique des formations argileuses et marneuses a été élaborée à partir du dépouillement et de la synthèse des diverses études géotechniques qui ont pu être consultées et des expertises sinistres réalisées par différentes entreprises (Labosport, Uretex), bureaux d'études (Arbrotec, ECR Environnement, Fondasol, FondOuest, Egsol, Hydrogéotechnique, Arcadis, Géotec), compagnies ou experts d'assurance (CCR, MAIF), mais aussi et surtout par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc (désormais CEREMA Saint-Brieuc).

Pour l'Ille-et-Vilaine, **1 971** analyses géotechniques ont été récoltées lors de la consultation des **353** communes du département, de la visite de chaque entreprise, bureau d'études et maîtres d'ouvrage comme la Direction des Routes du Conseil Général de l'Ille-et-Vilaine, la Direction Régionale de l'Équipement (DRE), la Direction Interdépartementale des Routes de l'Ouest (DIR Ouest). Chacune de ces directions a donné un accès au BRGM pour la consultation de ses archives. Enfin ces données (Illustration 5) ont été recoupées avec les données bibliographiques.

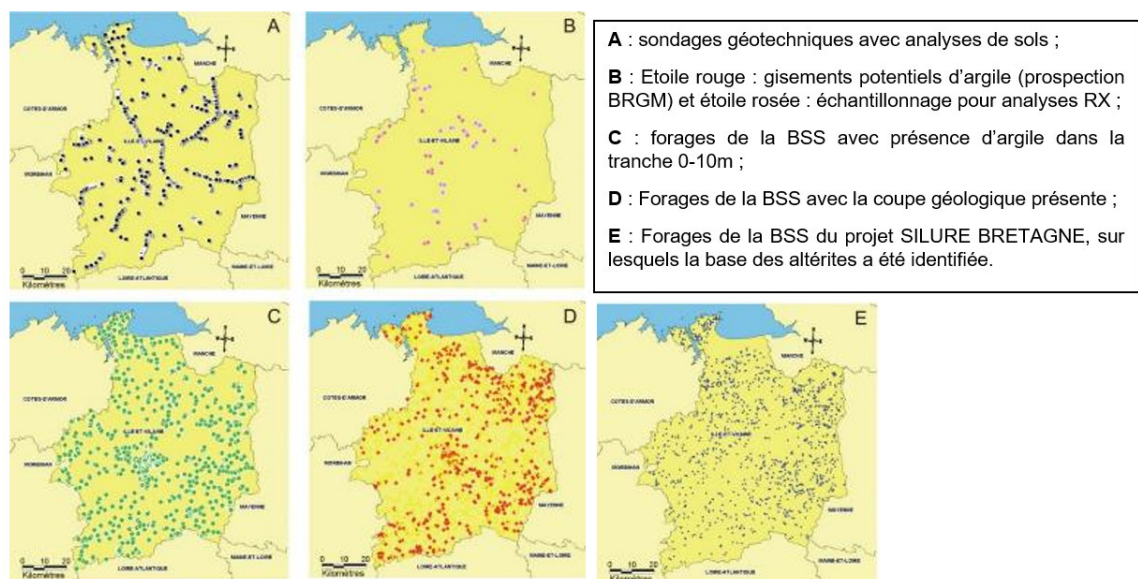


Illustration 5 : Synthèse des données entrées dans la caractérisation géotechniques des formations géologiques argileuses d'Ille-et-Vilaine (Schroëtter et al., 2010)

Pour la caractérisation minéralogique (proportion de minéraux argileux gonflants (smectites, interstratifiés, etc.) des formations géologiques), **41** analyses aux rayons X avaient été réalisées en Bretagne, complétées par des informations tirées de la bibliographie scientifique : thèses, DEA/Master II, rapports du BRGM et notices des cartes géologiques.

Lithologie des formations

Proportion des termes argileux dans la formation
Épaisseur des bancs argileux
Continuité des bancs argileux

Classement : **note 1 à 4**

Minéralogie de la phase argileuse

Critère : % de minéraux gonflants (smectites + interstratifiés)
Quantitatif (diffractométrie RX) ou qualitatif (conditions de dépôt)

Classement : **note 1** (< 25 %) **à 4** (> 80 %)

Comportement géotechnique

Critère : Valeur de bleu de méthylène (Vb) ou Indice de plasticité (Ip)
A défaut : retrait linéaire (RI)

Classement : **note 1** (Vb < 2,5) **à 4** (Vb > 8)

Illustration 6 : Notes lithologique (L), minéralogique (M) et géotechnique (G), attribuées à chaque formation géologique contenant des argiles.

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, ne sont pas pris en compte car leur impact est local et ne peut être cartographié à une échelle départementale.

Les conditions météorologiques (répartition des déficits hydriques) n'apparaissent pas comme un élément discriminant à l'échelle du département et n'ont donc pas été prises en compte dans l'élaboration de la carte départementale de l'aléa.

Les connaissances hydrogéologiques en domaine de « socle » ont largement évolué depuis plus d'une vingtaine d'années (Lachassagne et Wyns, 2005, pour une revue), et en Bretagne à travers les programmes SILURES (Mougin et al., 2008) ou encore ANAFORE (Schroëtter et al., 2020).

Malgré l'évolution des connaissances et une meilleure compréhension de la répartition des masses d'eau, le caractère discontinu des aquifères de socle rend difficile l'évaluation cartographique de leurs influences sur le phénomène RGA. Historiquement, ce critère n'avait donc pas pu être pris en compte dans l'élaboration de la carte départementale de l'aléa et n'a pas pu être pris en compte dans cette étude.

Le facteur géomorphologique a en revanche été pris en compte dans une certaine mesure lors de la cartographie des secteurs d'altération susceptibles d'être argileux. Cependant, les terrains en pente, même s'ils peuvent conditionner la survenance de sinistres car des défauts de réalisation et de conception de fondations peuvent être fréquents, auxquels s'ajoutent à de fortes variations de teneur en eau entre l'aval et l'amont de la construction, n'ont pu être intégrés à cette étude. Ainsi la cartographie s'en est tenu aux contours des formations lithologiques des cartes et s'est basée sur un découpage géomorphologique pour les formations d'altération non-cartographiées initialement.

2.2.4. Carte de susceptibilité

Ainsi la carte départementale de susceptibilité au retrait-gonflement (Illustration 8) avait été établie à partir de la carte synthétique des formations argileuses et marneuses du département, après évaluation du degré de sensibilité de ces formations (iS). Les

critères utilisés pour établir cette hiérarchisation sont les caractérisations lithologique (note nL), minéralogique (note nM) et géotechnique (note nG) de ces formations, suivant le calcul ci-dessous (Illustration 7 :

$$\text{indice de Susceptibilité} \\ (iS) = (nL + nM + nG) / 3$$

Susceptibilité forte : $iS > 3$
Susceptibilité moyenne : $2 < iS \leq 3$
Susceptibilité faible : $iS \leq 2$

Illustration 7 : Calcul de l'indice de susceptibilité (iS) d'une formation géologiques argileuse

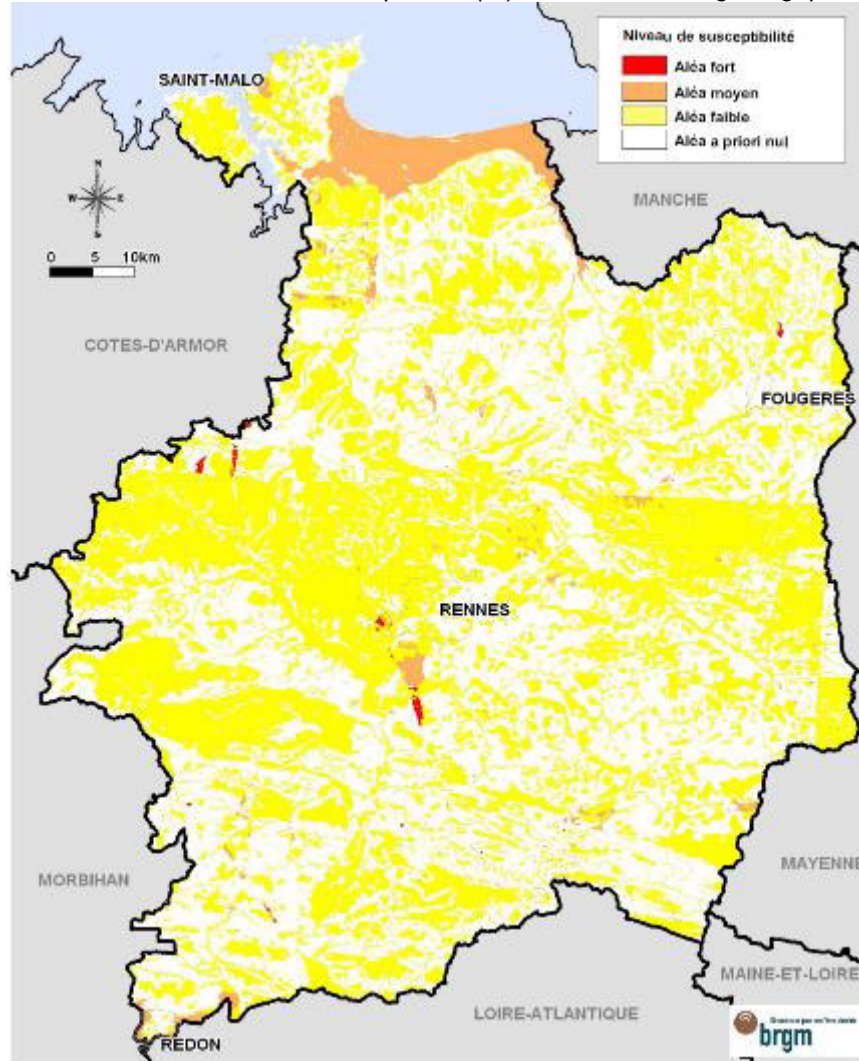


Illustration 8 : Carte de susceptibilité à l'aléa retrait-gonflement en Ile-et-Vilaine (Schroëtter et al., 2010)

2.2.5. Susceptibilité moyenne et forte des formations géologiques argileuses sur le territoire de Rennes Métropole

Sur le territoire de Rennes Métropole, quatre formations géologiques argileuses présentaient des notes de susceptibilité moyenne pour deux d'entre elles et forte pour les deux autres.

Les descriptions ci-dessous des formations géologiques argileuses notées en susceptibilité moyenne à forte du territoire de Rennes Métropole incluent également des formations géologiques argileuses voisines en âge et en nature, en dehors de Rennes Métropole.

Les formations géologiques argileuses notées moyennes étaient :

La **Formation n°9, notée RS**, correspondant à des nappes résiduelles de cailloutis, galets et blocs siliceux de couleur miel, des interfluves, d'âge indéterminé, et présente au nord et au centre du département (Illustration 9), sur les cartes géologiques au 1/50 000 DINAN et RENNES, du BRGM.

Cette formation géologique plus ou moins argileuse, se situe sur les interfluves des rivières, parfois sur des niveaux bas, et contient des cailloutis, galets et blocs siliceux, de couleur miel, associés à des éléments de silcrêtes.

Dans la dépression centrale du département (dépression de Rennes), cette formation géologique a été interprétée comme le témoin d'une surface résiduelle géomorphologique d'âge tertiaire « éocène ? » (Méynier, 1940). Dans le secteur de Lanhélin, dans le nord du département, une analyse aux rayons X avait montré que les argiles sous jacentes étaient composées de 64 % de smectite, 3 % d'illite, 6 % de chlorite et 27 % de kaolinite.

La **note de susceptibilité moyenne** lui avait été attribuée en raison de ses **teneurs en argiles smectitiques importantes**.

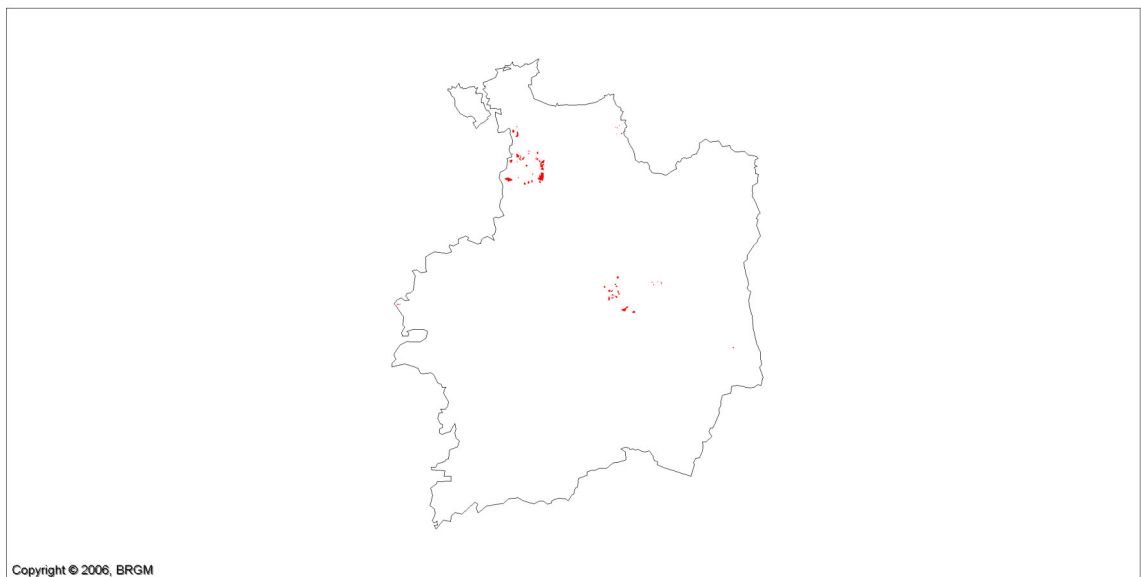


Illustration 9 : Répartition départementale de la formation RS

La seconde formation géologique argileuse sur le territoire de Rennes Métropole avec une note de susceptibilité moyenne, était la **Formation n°11, notée p1-2-IV** (Illustration 9), et correspondant à des galets, cailloutis, sables et argiles glauconieux, rouges (avec parfois des faluns ?), d'âge pliocène sup. à Quaternaire.

D'après la notice de la carte géologique de la Feuille Redon, cette formation géologique plus ou moins argileuse, appartiendrait à une première séquence sédimentaire surtout sableuse, composée de sables fins glauconieux et gris, parfois agglomérés et pyriteux, fossilifères et subordonnés aux sables rouges, qui de part son

apparente homogénéité s'oppose aux alluvions. Malgré une fraction grossière quartzeuse dominante, des lits argileux noirâtres à gris y sont intercalés et décrits (à Saint-Malo-de-Phily). Ailleurs, cette séquence montre des niveaux décamétriques de sables dans des poches étroites, exploités pour la construction de routes, après lavage en raison de leur teneur fluctuante en argile.

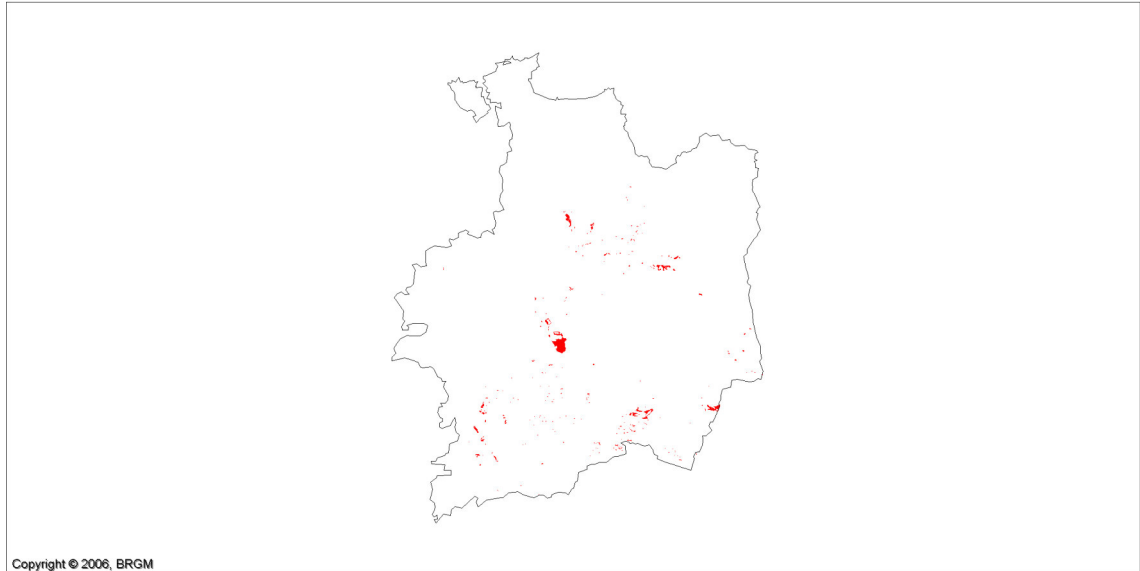


Illustration 10 : Répartition départementale de la formation p1-2-IV

Les argiles associées sont décrites comme :

- soit à dominante kaolinique et formant des niveaux argileux ou des galets mous,
- soit à dominante montmorillonite et associées à de la chlorite gonflante dans des marnes et sables fossilifères.

La fraction à sables rouges est caractérisée par un assemblage kaolinite-illite (Estéoule-Choux, 1967). Celle à sables jaunes à blancs, au cœur des dépôts les plus épais, est empâtée dans une argile rougeâtre. Lors de l'analyse RGA départementale de 2010 (Schroëtter et al., 2010), la fraction argileuse de sables fins avait été analysée aux rayons X et avait montré 24 % d'argiles gonflantes (interstratifiés), 45 % d'illite, 7 % de chlorite et 27 % de kaolinite.

Cependant, la formation géologique **notée pA** du cycle pliocène (mais non présente sur le territoire de Rennes Métropole, observable à Saint-Jean-la-Poterie, Morbihan), avait été analysée aux rayons X et montrait : 87 % de smectites, 5 % d'illite et 8 % de kaolinite. Ce fort pourcentage de smectites (argiles gonflantes) avait fortement influencé la notation de susceptibilité en moyen de la **Formation n°11 (notée p1-2-IV ; Illustration 10)**, à cause de la présence de cette smectite à 87%.

En Ille-et-Vilaine, la **Formation n°12, notée pA** (Illustration 11) est légèrement différente et est décrite comme correspondant à des placages ou des poches d'argiles litées kaoliniques, silteuses, rouges ou bariolées, reposant sur des galets ou des gravillons à des altitudes comprises entre 50 et 90 m NGF (Illustration 12).

Elles sont intégrées au cycle pliocène en référence au gisement de Saint-Jean-la-Poterie (Morbihan), et reposent sur des sables marins jaunes azoïques avec galets de base, encroûtements ferrugineux du substrat et trous de pholades.

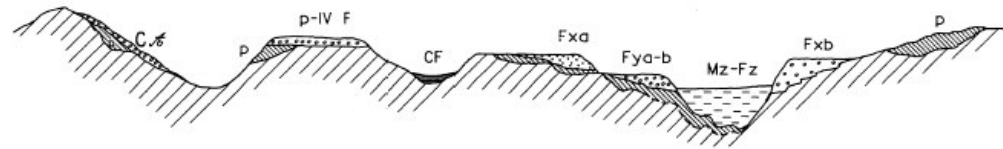


SCHÉMA DES RELATIONS ENTRE LES FORMATIONS QUATÉNAIRES ET PLIOCÈNES

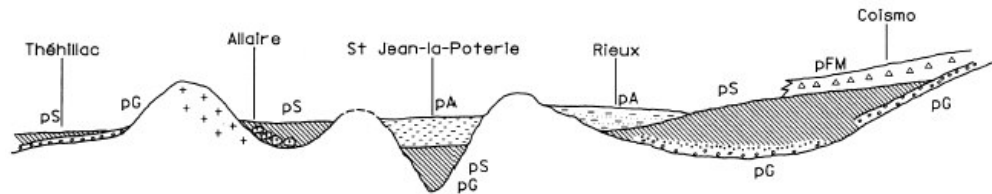


Illustration 11 : Schéma des relations entre les formations pliocènes, et quaternaires avec la géomorphologie (Notice explicative de la carte de n°419, Redon)

Cependant, dans un contexte de chute du niveau marin au Miocène supérieur et de remise en eaux des vallées creusées, lors de cet événement, il est envisageable de trouver les séquences qui suivent :

- Dépôts détritiques de galets à sables évoluant verticalement vers des argiles ;
- Puis « foresets beds » sableux latéralement évoluant à des argiles (bottom set beds).

Dans un tel cas de figure, les niveaux argileux pliocènes (pA et autres) se situeraient donc entre deux séquences détritiques (de sables ou galets).

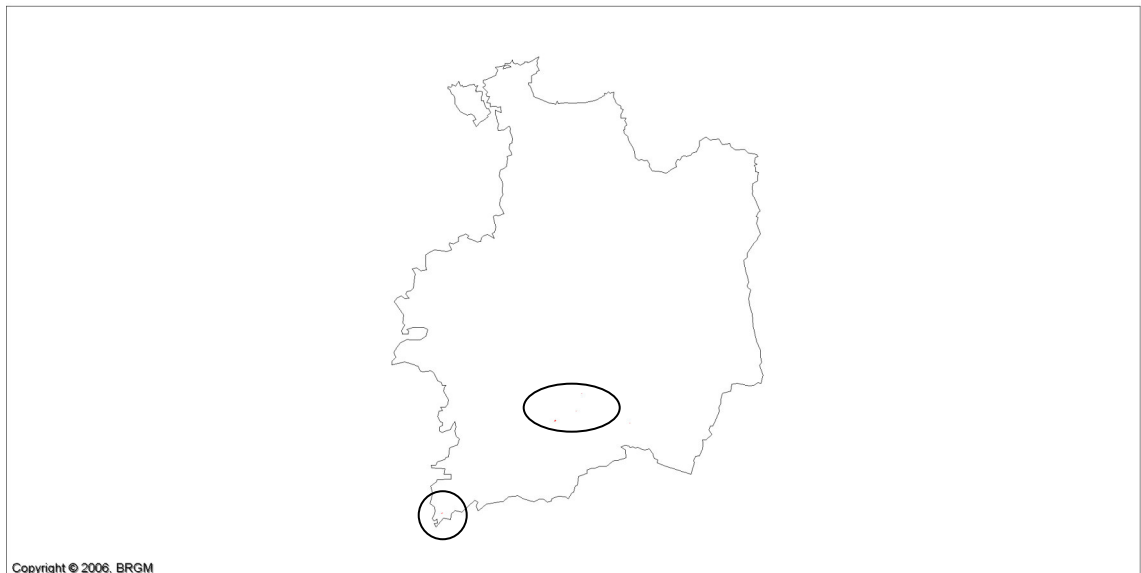


Illustration 12 : Répartition départementale de la formation pA

D'autres formations en Ille-et-Vilaine, au moins 3, appartiennent au cycle sédimentaire mio-plio-quaternaire : **les formations argileuses notées B, m5-p et m-p**. Comme pour celle pA décrite ci-dessus, il est important de les prendre en considération car elles peuvent être présentes (et découvertes lors des investigations faites dans

CARTAGILE), avec des teneurs importantes en argiles gonflantes et avoir ainsi des répercussions sur les notes de susceptibilité et d'aléa.

La **Formation n°13, notée B** (Illustration 13), correspond à des argiles sableuses rouges et cailloutis, d'âge supposé plio-quaternaire, d'après la notice de la carte géologique au 1/50 000 de Caulnes. L'interrogation des forages vérifiés de la banque de données du sous-sol au niveau du bassin sédimentaire dit du « Quiou » (en Côtes d'Armor), montre que cette formation argileuse est systématiquement située au dessus des faluns miocènes et sous des alluvions plio-quaternaires ou quaternaires anciens. Sur la carte géologique de Montfort-sur-Meu, la formation équivalente est notée **p** au sens large pour Pliocène.

Cette formation énigmatique, notée **B**, pourrait donc ainsi être considérée comme un équivalent latéral et/ou vertical de **pA**.

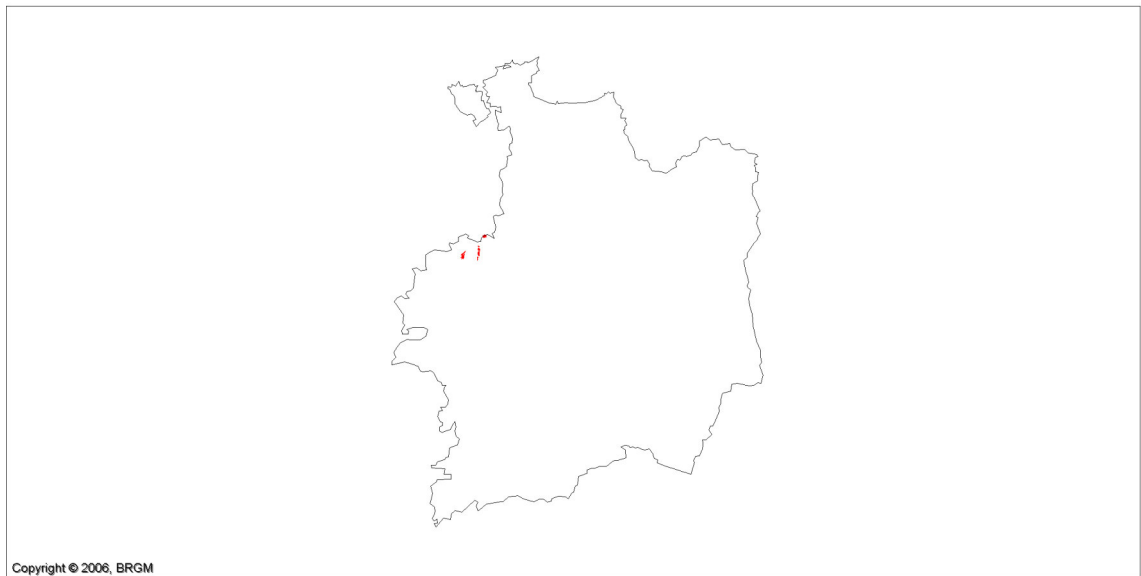


Illustration 13 : Répartition départementale de la formation B

La **Formation n°14, notée m5-p**, d'argiles montmorillonitiques à concrétions carbonatées de Chasné-sur-Illlet, d'âge mio-pliocène (?), **se situe pour l'essentiel** à environ 1 km au nord-ouest du bourg de Chasné-sur-Illlet (Illustration 14). Elle correspond à un gisement argileux de petite taille (200 à 300 m de long sur 50 à 100 m de large) qui repose sur les schistes d'Andouillé. Sous plus d'un mètre d'argile jaune contenant des blocs de quartzite (éboulis de grès armoricain), il est possible d'observer 5 m d'argile verdâtre à concrétions blanches de calcite. Cette argile est constituée essentiellement de montmorillonite, avec un peu d'argile micacée et de kaolinite.

Cette formation contient des restes d'Echinides, de Bryozoaires, de Bivalves et une microfaune particulièrement riche en Foraminifères et de coccolithes qui pourraient lui conférer un âge Pliocène (Estéoule *et al.* 1972). Mais cette datation semble remise en question par l'étude des coccolithes, qui seraient Miocène moyen à terminal (J.P. Margerel 1983, non publié dans la notice de la carte géologique de Combourg).



Illustration 14 : Répartition départementale de la formation m5-p

Enfin la **Formation n°15, notée m-p**, composée de faluns, sables et argiles smectitiques à faune marine de Poligné, d'âge supposé mio-pliocène aussi, a été mise en évidence à travers deux sondages effectués par le BRGM. Ces deux sondages montrent que le gisement de Poligné a une petite dimension (300 m de long sur 100 m de large, Illustration 15) pour des épaisseurs allant de 4 à 9 m, et qu'il est composé, de haut en bas, par une argile silteuse rougeâtre à grisâtre et des graviers de grès (2 m), une argile compacte grise panachée d'ocre et de rouge, à passées noirâtres (de 2 à 5,20 m), une argile silteuse beige à concrétions carbonatées dures, devenant sableuse vers 6,80 m (de 5,20 à 7,80 m) et enfin par un sable jaunâtre graveleux, un peu argileux (de 7,80 à 9,20 m).

Les minéraux argileux sont dominés par la smectite accompagnée par des interstratifiés, de la kaolinite et de l'illite. Les éléments lithiques sont des débris de calcite et de limonite et des fréquents blocs de quartz arrondis, alors que les bioclastes sont des débris roulés de bryozoaires, d'échinides, de pectinidés.



Illustration 15 : Répartition départementale de la formation m-p

Les **formations géologiques argileuses oligo-éocènes** notées en aléa fort sur le territoire de Rennes Métropole, se situent suivant une direction nord-ouest/sud-est (N150), correspondant au bassin d'effondrement de Chartres-de-Bretagne, qui s'étend depuis Le Rheu jusqu'à Pont-Péan (Illustration 16).

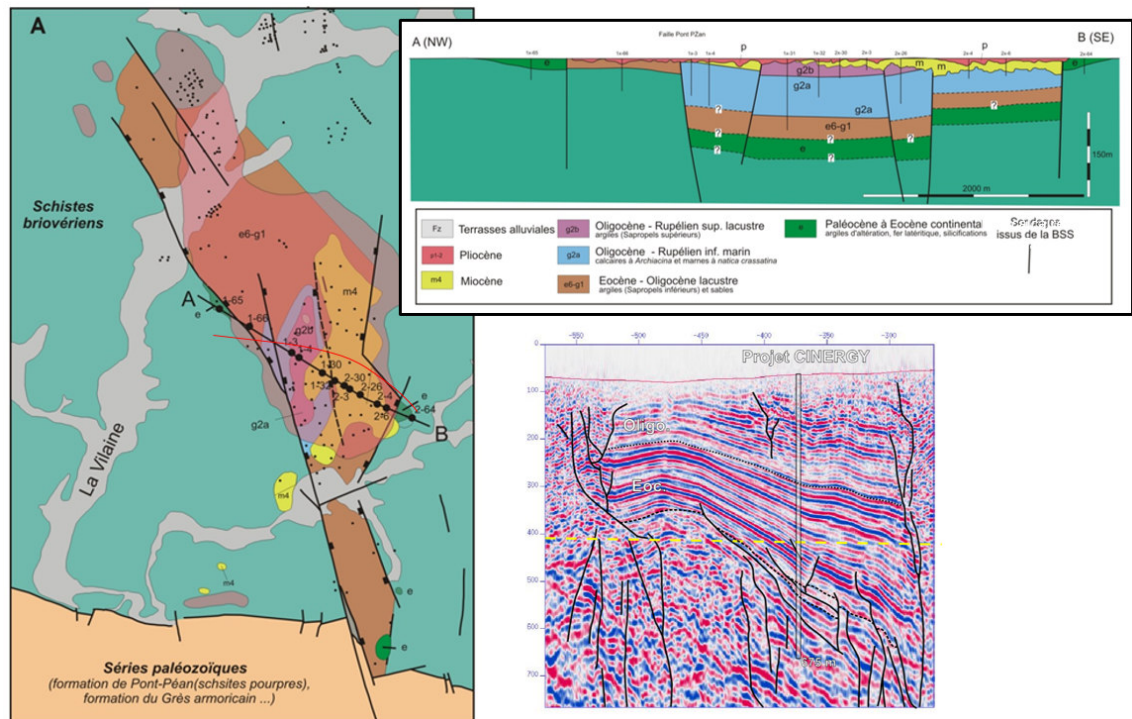


Illustration 16 : A gauche – Carte géologique du bassin de Chartres-de-Bretagne ; En haut à droite – Coupe géologique à travers le bassin (de A à B) et en bas à droite – Profil sismique tiré lors du programme GéoFrance3D.

Les formations géologiques argileuses oligo-éocènes sont représentées en carte de couleur marron foncé, bleu et violet sur l'illustration 16 ci-dessus, et en coupe en haut à droite de la même illustration : en jaune pour les faluns du Miocène et en rouge des sables et argiles du Plio-quaternaire (en transparence sur la carte à gauche) de l'illustration 16.

La **Formation n°16, notée g1a** (Illustration 17), correspond à des calcaires à Archiacina et marnes à Natica Crassatina, marins, d'âge oligocène inf. Cette formation n'est connue que sur la commune de Chartres-de-Bretagne, grâce aux fronts de taille des anciennes carrières de la Lormandière, des Grands-Fours ou de La Chaussaire ou de puits. Ailleurs à Landéan, elle est représentée par des argiles verdâtres (utilisées comme terre à foulons) et des argiles plastiques, bleues ou grisâtres, fossilifères, avec lits ligniteux. Ces argiles sont composées de smectites accompagnées de kaolinite.

Dans le bassin de Chartres-de-Bretagne, les alternances d'argiles calcareuses, tourbeuses, de calcaires argileux à miliolles, d'argiles à miliolles et archiacines et de calcaires argileux « marnes à chaux hydraulique » à Natica crassatina, ont une puissance de 22 m. Les marnes à chaux hydraulique sont surmontées par une dizaine de mètres de calcaires grossiers blanc-jaunâtre à foraminifères, gastéropodes et lamellibranches. Ces calcaires sont eux-mêmes surmontés par 4 m de calcaire sableux blanc-jaunâtre à grain fin puis par 1 m de calcaire siliceux marin à archiacines. Enfin celui-ci, dans sa partie supérieure, est étroitement lié à de l'argile verte.

L'analyse aux rayons X réalisée lors l'analyse départementale de l'aléa RGA (Schroëtter et al., 2010) a montré que les argiles étaient composées de 1 % d'interstratifiés gonflants, 67 % d'illite et 28 % de kaolinite. Un rapport BRGM (Le Berre, 1982) a en revanche montré qu'elles pouvaient contenir 80 % de smectites, 10 % d'interstratifiés non-gonflants, 4 % de chlorite et 10 % de kaolinite.



Illustration 17 : Répartition départementale de la formation g1a

La **Formation n°17, notée g** (Illustration 18), composée d'argiles à marnes vertes smectitiques et calcaires lacustres, est certainement équivalente à celle notée g1a. Le manque de fossiles pouvant lui attribuer un âge est la raison de sa distinction avec g1a, et sa notation en g. Elle correspond à des argiles et marnes vertes et des calcaires. Les argiles sont riches en smectites et les marnes ont été reconnues à Saint-Séglin, la Cohiais et Langon, alors que les faciès sont plus calcaires à la Cohiais. L'étude minéralogique des argiles (Estéoule-Choux, 1967, Estéoule-Choux et Rozé, 1982) montre que ces marnes sont caractérisées par une association à attapulгите-illite parfois polluée de kaolinite et de montmorillonite. Associés à ces argiles, il est trouvé de la calcite et un carbonate ankéritique (dolomite ferrifère) dont la quantité est inversement proportionnelle à l'importance de l'attapulгите. La présence d'attapulгите (palygorskite) est variable, allant de presque 100 % à une absence totale (quelques niveaux de Saint-Séglin ou de la Cohiais). Les argiles surmontent les calcaires.

Cette formation géologique, comme pour g1a, remplit de petits bassins allongés suivant une orientation nord-ouest/sud-est, comme les bassins de Saffré, de Saint-Séglin et de Loutehel.

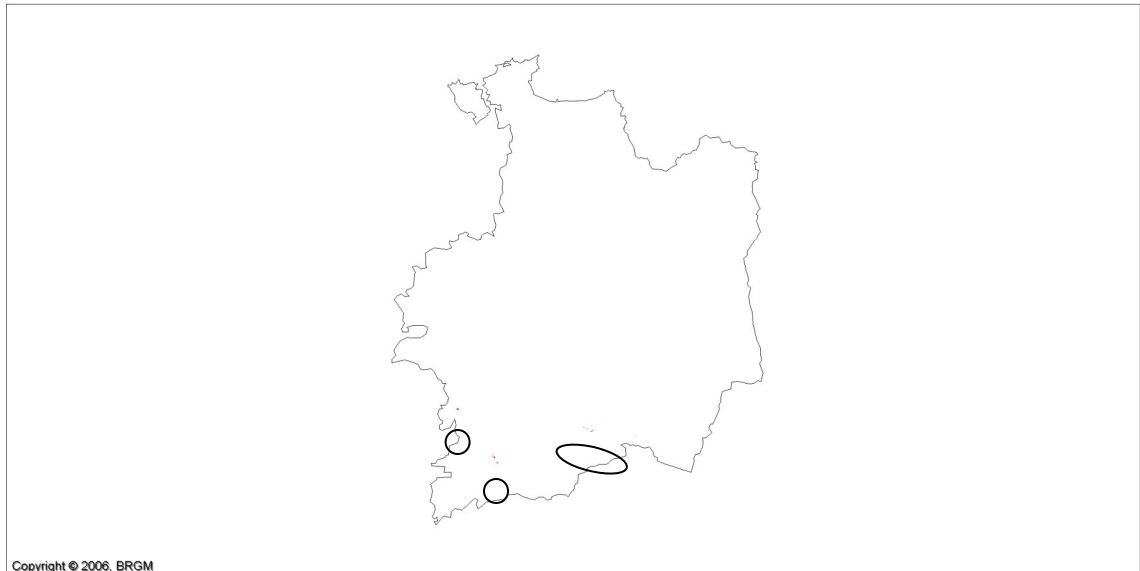


Illustration 18 : Répartition départementale de la formation g

Enfin la dernière formation géologique dont la susceptibilité au RGA avait été évaluée à fort est la **Formation n°19, notée e7-g1**, composée d'argiles à lignite, pyrite et gypse, avec des niveaux siliceux et de sables fins. Elle est datée de l'Eo-Oligocène (Illustration 19).

Cette formation fait une épaisseur d'au moins 250 m, alternant des argiles de couleur noire, blanche ou verte, constituées à la base par de la kaolinite et au sommet par un mélange montmorillonite-attapulгите avec illite et kaolinite. Les argiles à lignite n'apparaissent en surface que dans la région de Pont-Péan et à la lisière orientale du bassin à Chartres-de-Bretagne. Des argiles à débris végétaux, brunes, à pyrite et gypse secondaires, définies en 1936 par Y. Milon (dans la Notice de la carte géologique de Rennes), se distinguent des argiles subordonnées par leur nature minéralogique (smectites ou assemblages illite-smectite).

La coupure lithostratigraphique entre les argiles à débris végétaux et lignite et les sapropèles, n'est pas franche. La nature minéralogique des argiles permet cependant de distinguer les argiles à lignite, essentiellement kaoliniques, des sapropèles, à smectites et calcite.

Les sapropèles inférieurs ne sont pas visibles à l'affleurement, bien que couvrant une superficie importante au Nord du bassin (région de l'aéroport de Saint-Jacques) ; elles sont occultées par un placage continu de sables plio-quaternaires (p-IV). Jusqu'à présent, seul un puits, celui de La Riverdière (ou La Raveriais) en Bruz, décrit en 1902 par T. Bézier (dans la Notice de la carte géologique au 1/50 000, Feuille Rennes), montrait 6 m d'argiles grises et noires azoïques, que Y. Milon (1936) appellera « sapropels inférieurs ». Ces argiles, immédiatement subordonnées aux niveaux marins à *Natica crassatina*, ont été recoupées par plusieurs sondages du BRGM, dont le plus représentatif, réalisé à La Lande-du-Pont en Bruz (353-1-66), a traversé 38 m d'argiles sans atteindre le socle pourtant tout proche. La coupe se résume comme suit, de haut en bas : de 0 à 2,50 m, sable argileux rouge à graviers (Pliocène) ; de 2,50 à 17,20 m, argiles alternativement silteuses ou compactes, grises, noires ou brunes, à passées tourbeuses ou pyriteuses, à pollens de *Plicapollis pseudoexcelsus* (Sparnacien à Stampien inférieur) ; de 17,20 à 21,70 m, argile vert pistache (microflore abondante, quelques taxons de l'Yprésien) ; de 21,70 à 38 m, argiles compactes brunes puis grises, pyriteuses vers 35 m (microflore peu abondante, et peu caractéristique, quelques taxons éocènes). Ce n'est qu'en 2010, lors du projet CYNERGY, qu'un

carottage de l'ensemble de la série sédimentaire a permis d'atteindre le fond du bassin au niveau de Chartres-de-Bretagne, à - 406 m.

Lors de l'étude départementale de l'aléa RGA (Schroëtter et al., 2010), les analyses aux rayons X ont montré que les argiles éo-oligocènes contenaient 57 % de smectites, 4 % d'illite et 39 % de kaolinite.

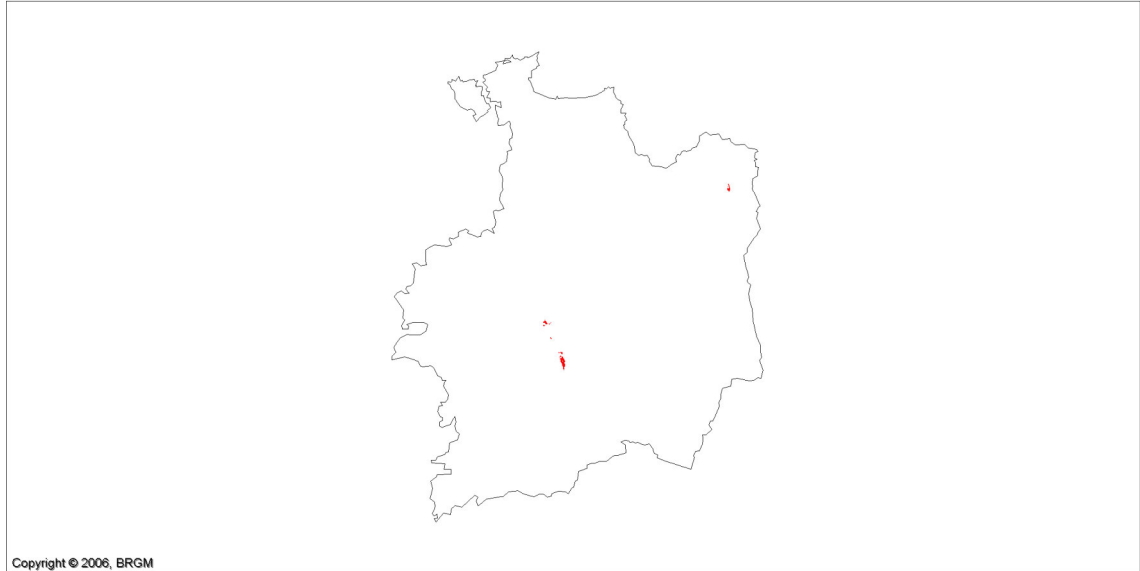


Illustration 19 : Répartition départementale de la formation e7-g1

2.2.6. Recensement et localisation géographique des sinistres

Le passage de la carte de susceptibilité à la cartographie de l'aléa retrait-gonflement (correspondant à la probabilité d'occurrence du phénomène), se fait en tenant compte de la sinistralité observée pour chacune des formations géologiques argileuses et marneuses.

En 2010, un recensement des sinistres sécheresses et des communes reconnues en état de catastrophe naturelle au titre des mouvements de terrains différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols, avait été effectué auprès de **353** communes du département et des organismes dédiés.

Sur les **353** communes, le taux de réponses pour l'inventaire des sinistres avait été de **84,1 %** (297 réponses ; chaque commune a été sollicitée quatre fois, deux courriers postaux, relance téléphonique et message électronique).

En complément de cette enquête, la consultation de la Caisse Centrale de Réassurance, de bureaux d'études, de compagnies d'assurance et d'experts d'assurance avait permis, après élimination des doublons, de recenser au final **159** sinistres, répartis sur **27** communes, dont **13** d'entre elles (en 2010) avaient fait l'objet d'une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle. D'ailleurs ces communes regroupaient à elles seules **132 sinistres**.

Lors de l'étude **CARTAGILE**, la prise de contact avec une association d'administrés dont les habitations sont fissurées par le phénomène RGA, a permis de faire une mise à jour pour la commune de Pont-Péan la plus touchée par le phénomène.

Alors qu'en 2010, Pont-Péan avait déjà la palme bretonne de la commune la plus sinistrée avec 86 sinistres recensés, la commune totalise en **2022, 184** sinistres recensés, composés de 86 sinistres de 2010 auxquels s'ajoutent 109 sinistres en 2022 (11 doublons recensés lors des 2 enquêtes ; Illustration 20).

	2010	2022	Doublons	Total	
	86	109	11	184	X 2 Pont-Péan
Nombre de sinistres	160			258	Ille-et-Vilaine
	154			154	Rennes Métropole
				252	

Illustration 20 : Mise à jour 2022 des sinistres recensés en 2010.

Ainsi l'**Ille-et-Vilaine** a un total de 258 sinistres recensés en 2022 au lieu de 160 en 2010. On assiste à **une multiplication des sinistres d'un facteur 1.61, 1.63 pour Rennes Métropole** et de **2.13 pour Pont-Péan** (Illustration 20 ; Illustration 21).

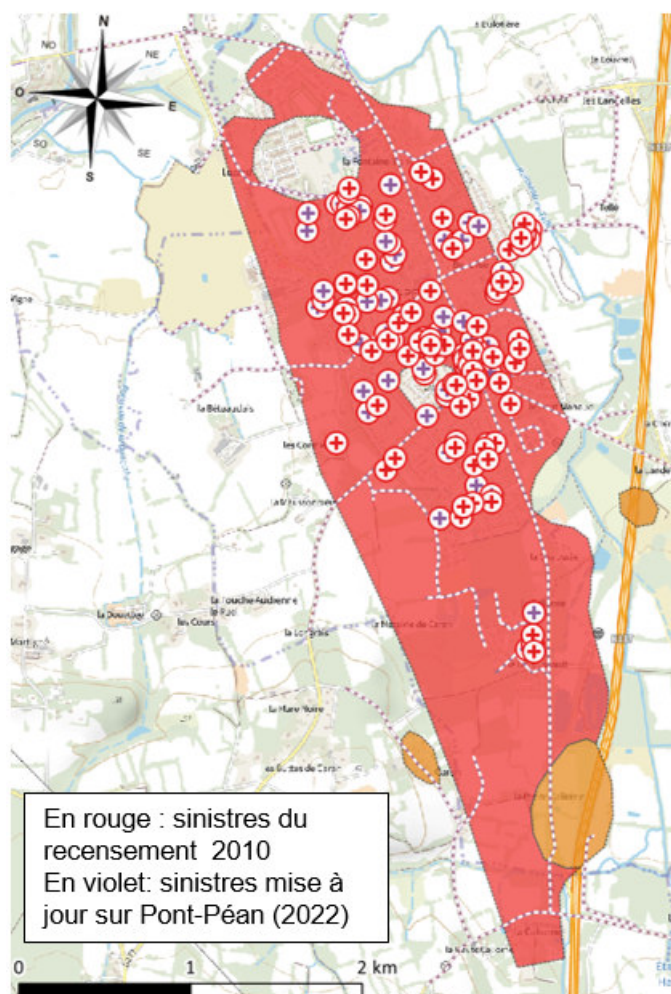


Illustration 21 : Nouveaux sinistres recensés par l'association de Pont-Péan et sinistres recensés en 2010 (Schroëtter et al., 2010).

La mise à jour des sinistres lors de CARTAGILE sera utilisée pour la réévaluation des formations géologiques argileuses fortes et moyennes du secteur de l'étude.

2.2.7. Détermination des densités de sinistres

Pour chaque formation géologique argileuse, la superposition avec la carte des sinistres du département, a permis de déterminer le nombre de sinistres recensés pour chacune des formations géologiques susceptibles et, donc d'établir une densité de sinistres par formation géologique.

Dans un souci de rigueur et en fonction de la diversité du taux d'urbanisation d'un point à un autre, les densités de sinistres ont été pondérées par la surface d'affleurement de chacune des formations (afin d'obtenir des chiffres comparables entre eux), en tenant

compte de leur taux d'urbanisation. Ce taux a été calculé à partir de la couche bâti de la BDTopo (IGN).

Cette hiérarchisation des formations géologiques argileuses s'est faite en fonction du taux de sinistres ramené à 100 km² urbanisés pour chaque formation géologique (Illustration 22). Il convient de noter que ce critère de sinistralité est jugé non significatif (NS) sur une majorité des formations identifiées, du fait d'une surface urbanisée trop restreinte (la présence d'un seul sinistre pouvant conduire à une sinistralité jugée très forte).

ID	NOTATION	DESCRIPTION	Sup (km ²)	Bati (km ²)	Nb_sin	Note suscept.	Densité	Note_Sin
9	RS	Nappes résiduelles de cailloutis, galets et blocs siliceux de couleur miel, des interfluvies - Age ?	12,66	0,0434	0	2	0,00	NS
10	OE	Loess et limons éoliens, parfois associés à des sables weichséliens - Pléistocène sup.	700,02	9,7562	5	1	51,25	1
11	p1-2-IV	Galets, cailloutis, sables et argiles glauconieux, rouges et faluns - Pliocène sup. à Quaternaire	34,63	1,2209	18	2	1474,37	3
12	pA	Argiles kaoliniques, litées et faciès marne-siliceux fossilifères stratifiés - Pliocène	0,21	0,0119	0	3	0,00	NS
13	B	Argiles sableuses rouges et cailloutis - Pliocène à Quaternaire	3,06	0,0472	0	3	0,00	NS
14	m5-p	Argiles montmorillonitiques à concrétions carbonatées de Chasné-sur-Illet - Mio-Pliocène ?	0,03	0,0000	0	3	-	NS
15	m-p	Faluns, sables et argiles smectiques à faune marine de Poligné - Miocène à Pliocène ?	0,03	0,0008	0	2	0,00	NS
16	g1a	Calcaires à Archiacina et marnes à Natica Crassatina, marins - Oligocène inf.	0,02	0,0005	0	3	-	NS
17	g	Argiles à marnes vertes smectiques et calcaires lacustres - Oligocène	0,56	0,0033	0	3	0,00	NS
18	e-p/b2S-4	Sables argileux et conglomérats sur des argiles blanches et noires - Eocène à Pliocène ?	0,08	0,0000	0	1	-	NS
19	e7-g1	Argiles à lignite, pyrite, gypse surmontées de niveaux siliceux et sables fins - Eo-Oligocène	4,18	0,1811	67	3	36999,18	3

Illustration 22 : Sinistralité et susceptibilité au RGA en 2010 pour les formations géologiques argileuses concernées par CARTAGILE c'est-à-dire les formations n°9, 11 et 16 et 19 (Schroëtter et al., 2010)

2.2.8. Carte d'aléa

La carte départementale d'aléa est établie à partir des contours de la carte de synthèse des formations argileuses et marneuses, où chaque formation argileuse reçoit un niveau d'aléa vis à vis du phénomène de retrait-gonflement issu du croisement de (Illustration 23) :

- la note de susceptibilité
 - et la densité de sinistres ramenée à 100 km² urbanisés de formation argileuse,
- en donnant toutefois un poids deux fois plus important à la susceptibilité, suivant la formule dédiée :

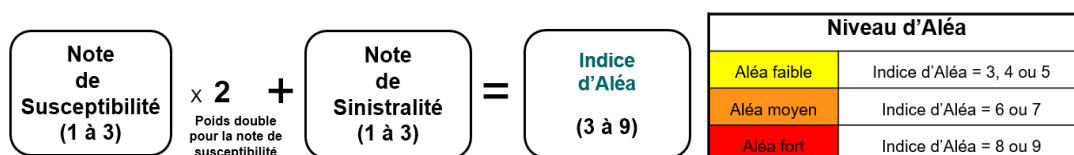


Illustration 23 : Formule de calcul de l'aléa retrait-gonflement pour chaque formation géologique argileuse

On peut noter que les formations argileuses pour lesquelles la sinistralité a été jugée non significative (du fait d'une surface urbanisée trop restreinte) reçoivent un niveau d'aléa équivalent à leur niveau de susceptibilité (Illustration 24).

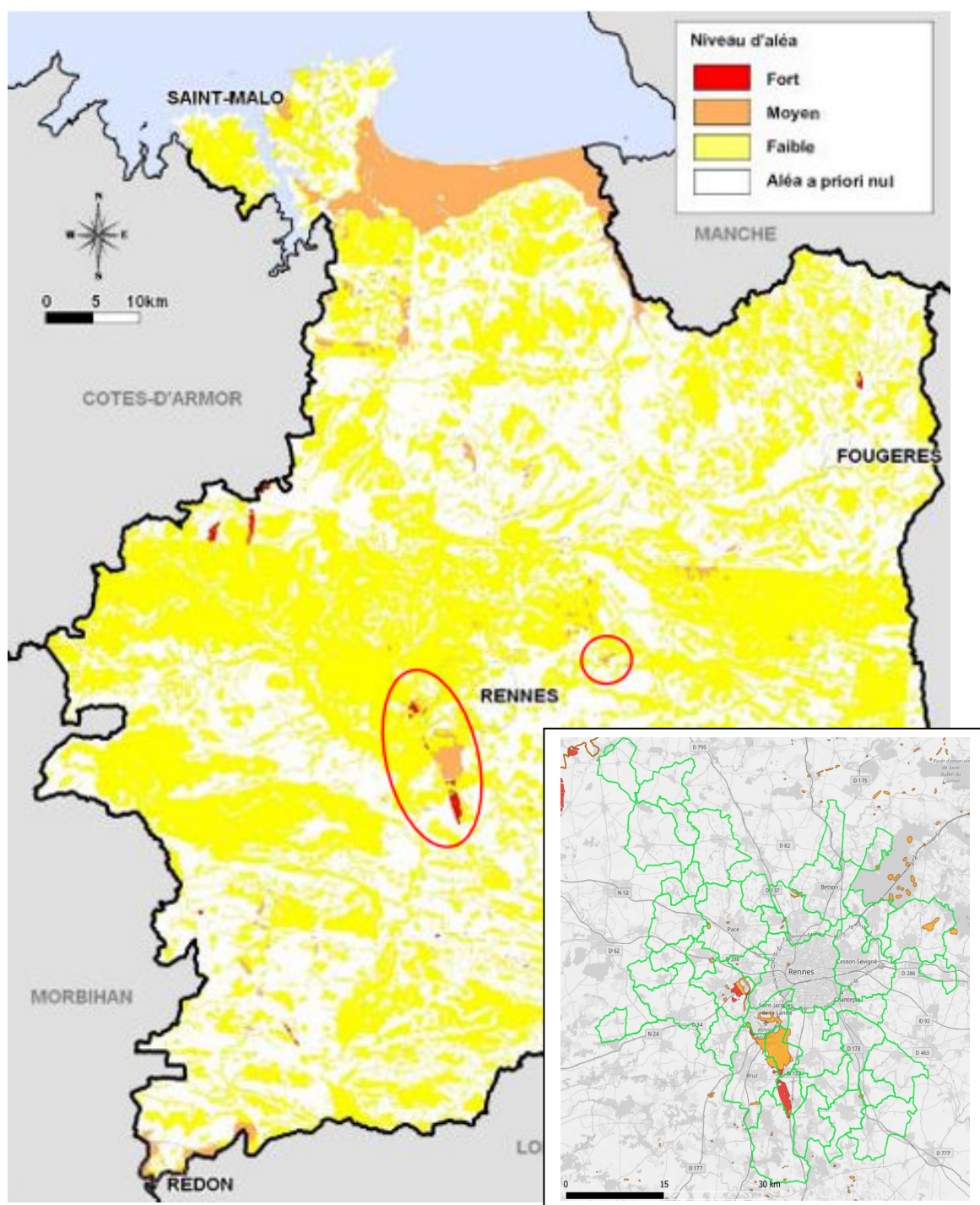


Illustration 24 : Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles en Ile-et-Vilaine (Schroetter et al., 2010) et sur le Territoire de Rennes Métropole.

3. CARTAGILE : Résultats

3.1 LE TERRITOIRE A COUVRIR

Lors de la cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux (Schroëtter et al., 2010), le territoire de Rennes Métropole était concerné par 12 secteurs en aléa fort et moyen (Illustration n°25).

Deux secteurs ont été cartographiés par les deux méthodes (spectrométrie gamma et géologique) :

- 1 : Acigné en aléa moyen
- et 12 : Secteur principal en aléa fort et moyen composé des communes de Saint-Gilles, Le Rheu, Saint-Jacques-de-la-lande, Chartres-de-Bretagne, Pont-Péan et Laillé nord.

Les autres secteurs (de 2 à 11, Illustration n°25), ont uniquement fait l'objet d'une visite de terrain par un géologue du BRGM, car ils constituaient des secteurs faiblement urbanisés, souvent isolés et agricoles et surtout composés potentiellement de sables plio-quadernaires mais sans que ceci n'ait pu être vérifié en 2010.

CARTographie de l'Aléa retrait-Gonflement des argILes sur le territoire de Rennes-Métropole

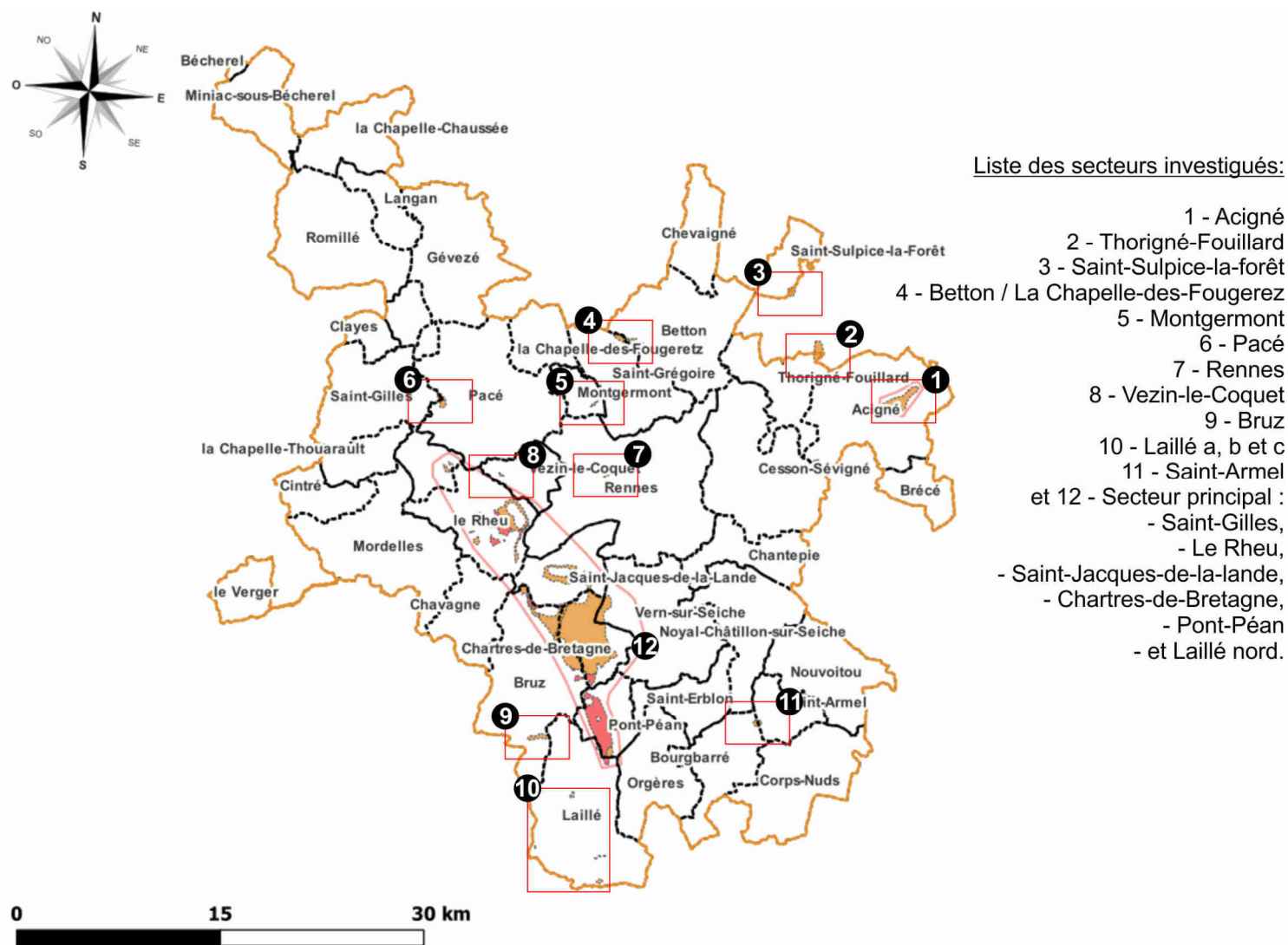


Illustration 25 : Le territoire couvert par l'étude CARTAGILE : Territoire de Rennes-Métropole avec l'aléa RGA fort et moyen (Schroëtter et al., 2010).

3.2 CARTOGRAPHIE DES ARGILES PAR RADIOMETRIE SPECTRALE

3.2.1. Description de la méthode

La « **gamma-spectrométrie** » est une méthode géophysique appliquée à la cartographie des sols (Illustration n°26).

La radiométrie spectrale permet de capter les photons gamma émis depuis la toute proche surface (0 à 1 mètre). En nous restituant les variations géochimiques au niveau du sol (teneurs en potassium, thorium, uranium...), elle apporte une vision nouvelle de la géologie des formations superficielles et des altérations qu'elles ont subies.

La spectrométrie gamma aéroportée est une méthode géophysique qui permet de mesurer le signal radioactif naturel du premier mètre de sous-sol au moyen d'un capteur embarqué dans un avion. Les teneurs en uranium, thorium et potassium (U, Th et K) du sol et du proche sous-sol ainsi mesurées sont directement liées à la nature des minéraux qui les composent.

De nouveaux développements ont été réalisés à la Direction des Géoressources du centre scientifique et technique du BRGM, à Orléans, par une équipe de géologues et géophysiciens (Martelet et al., 2015 ; Lacquement et al., 2015, 2016 ; Prognon et al., 2016a et 2016b ; Tissoux et al., 2017).

Le développement de la méthode s'est porté principalement sur deux axes résumés ci-après.

1 - L'acquisition historique de la radiométrie spectrale ou gamma-spectrométrie se faisait initialement par l'intermédiaire d'un levé aéroporté, selon un plan de vol préalablement défini. A chaque passage de l'avion, trois mesures étaient enregistrées (Illustration n°26). La nouveauté a été de permettre à cette technique (initialement aéroportée) d'être déployée à l'échelle humaine en faisant porter le gamma-spectromètre sur le terrain par un opérateur humain.

2 - Les développements ont également permis d'améliorer le traitement des mesures réalisées et leur mise en relation avec la nature des sols, notamment leur fraction argileuse. Le croisement de ce traitement avec d'autres informations telles que des forages issus de la Banque de Données du Sous-Sol (BSS), des contrôles de terrain et toute autre information sur le sous-sol, permettent de mieux caractériser le signal et ainsi de proposer une cartographie lithologique des formations géologiques affleurantes (Lacquement *et al.*, 2015).

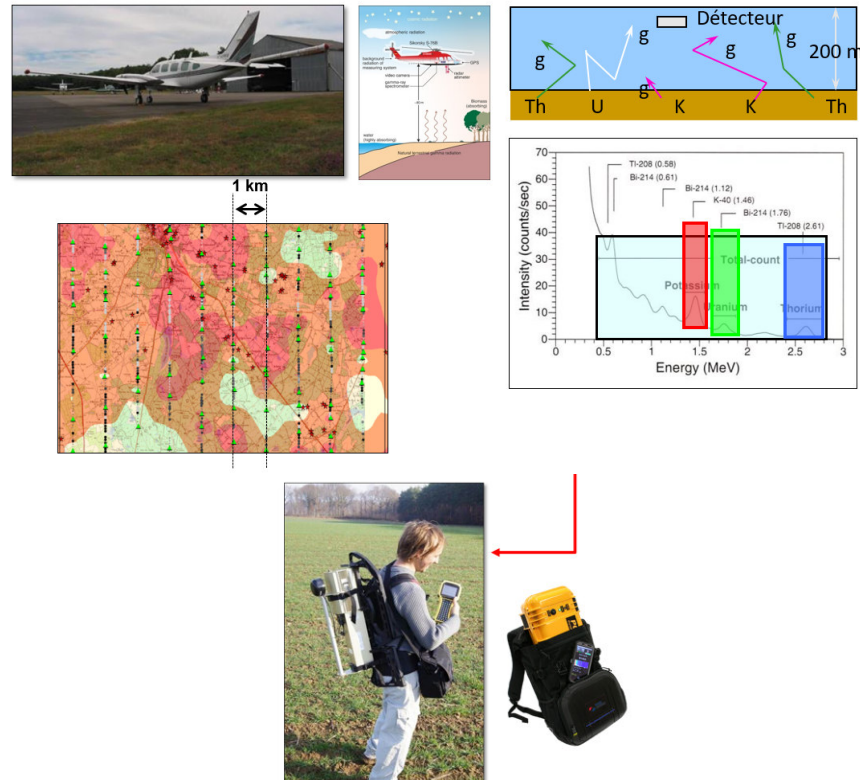


Illustration 26 : En haut - Avion et plan de vol pour la mesure de la radiométrie spectrale des sols et interprétation des teneurs en fonction du signal en retour ; En bas – Le gamma-spectromètre sur le dos d'un opérateur de terrain.

3.2.2. Développement applicatif

La méthode a dans un premier temps été mise au point à l'échelle régionale, à partir de données gamma-spectrométriques aéroportées, dans le cadre du Projet RégoCentre financé par l'État et la région Centre Val de Loire. Par la suite, la méthode s'est déclinée à l'échelle du terrain, à partir de données gamma-spectrométriques acquises au sol (Projet RégoCentre, Lacquement et al., 2015).

Une fois déclinée au sol, elle a été validée lors d'une étude d'un glissement de terrain sur le site de Boursault, dans la Marne (51 ; Prognon et al., 2016a) où il a été possible sous un couvert végétal de faire une discrimination des différents types de sols et d'argiles.

L'illustration n°27 montre comment à partir d'une carte régionale de la radiométrie spectrale par différentes combinaisons des teneurs en K, Th et U, il a été possible de produire une carte lithologique, c'est à dire une carte des différents types de roches et/ou de sols (Projet RégoCentre, Lacquement et al., 2015).

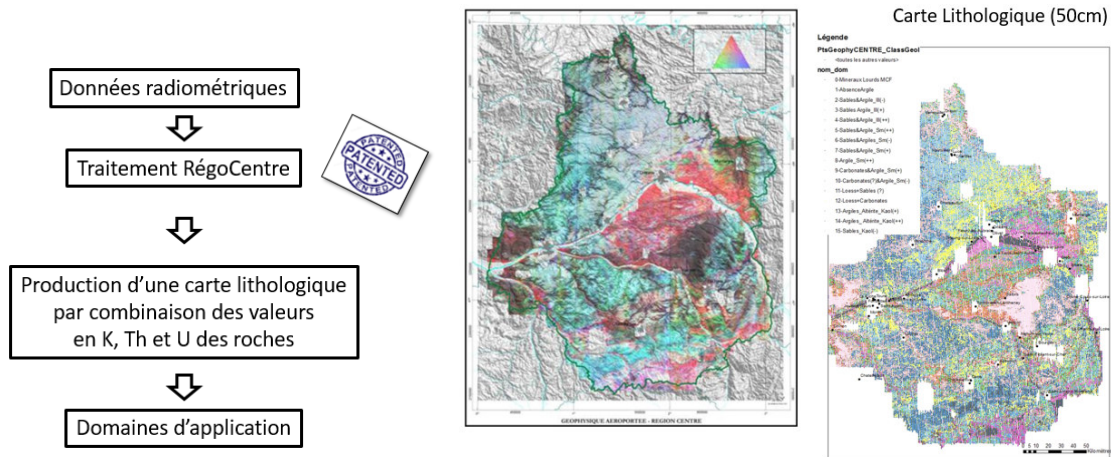


Illustration 27 : Méthodologie RégoCentre, brevetée, pour réaliser à partir de la radiométrie spectrale (à gauche) une carte des différents types de roches et/ou de sols (à droite).

3.2.3. Conditions et temps d'acquisition des données sur le terrain

Pour couvrir les **60 km²** de CARTAGILE, quatre campagnes d'acquisition de cinq jours chacune, ont été planifiées avec une priorité donnée sur le secteur le plus important (secteur 12 ; illustration n°26), situé depuis Le Rheu au nord-ouest et Pont-Péan au sud-est et contenant la principale zone à aléa RGA fort et moyen.

Parmi ces 20 jours, deux jours ont été nécessaires pour couvrir le secteur 1 d'Acigné (illustration n°26) au nord-est du territoire de Rennes Métropole.

La « production » de ce levé au sol, avait une durée moyenne d'une **mesure ponctuelle de 1 min environ**. Le déplacement à pied de l'opérateur avec l'appareil de mesure, a permis une couverture journalière d'environ **3 km²**, soit **300 points de mesure par jour**, pour une surface à couvrir d'environ 60 km². Ce temps d'acquisition correspond à une acquisition de point de mesure en point de mesure pour une couverture avec un pas fonction des contraintes rencontrées sur le terrain.

La stratégie de cartographie avec le spectromètre gamma a été triple :

- Un déploiement idéal qui ne tenait pas compte des conditions de terrain,
- Un déploiement stratégique pour affiner la cartographie RGA forte et moyenne en se concentrant sur les contacts géologiques entre les différentes formations géologiques impliquées dans l'aléa RGA fort et moyen,
- Et enfin, le déploiement réel contraint par les conditions de terrain telles que (1) la nature des sols parfois trop anthropisés et détériorant le signal, (2) des accès difficiles (clôtures, routes très fréquentées, stationnements importants, ou (3) encore une météo trop défavorable etc. (Illustration n°28).

Malgré tous, **plus de 200 000 points de mesures gamma** ont été acquis, sur un linéaire de **250 km de cheminements**, ciblés sur et au pourtour des zones de l'aléa RGA attendu.

Chaque jour, les données acquises étaient traitées et compilées par mission, afin d'avoir une vision en temps réel de l'avancée et de la qualité de l'ensemble de la campagne.

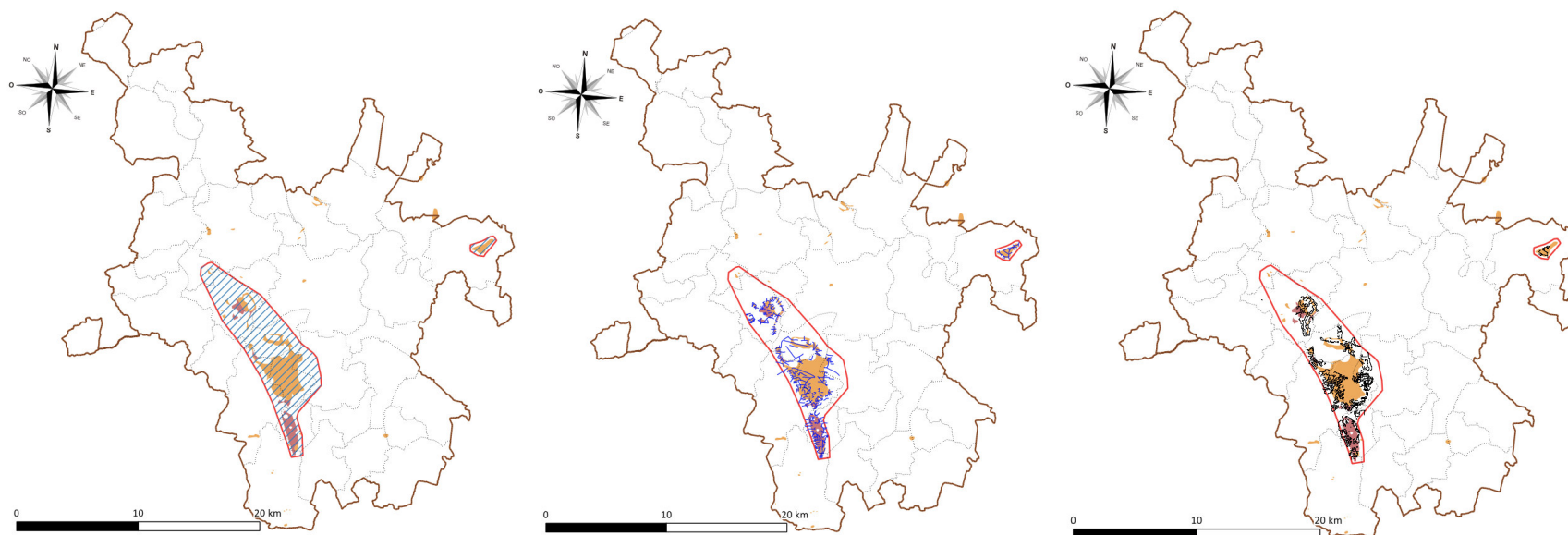


Illustration 28 : Stratégie d'acquisition mise en place et adaptée aux conditions de terrain et météorologiques – A gauche : théorique ; au milieu : stratégique et à droite : réelle.

3.2.4. Résultats et restitution des données de spectrométrie gamma

L'ensemble des points de mesures réalisés a été interpolé afin de réaliser une cartographie spatialisée sur le territoire concerné pour chacun des éléments analysés : K, Th et U à l'échelle du 1/10 000^{ème} et sous un format raster géoréférencé en RGF93/LAMBERT-93 (EPSG : 2154). Ces cartes radiométriques sous format raster ont subi différents traitements, afin d'aboutir à :

- 1/ une carte lithologique (carte des différents types de sols) à l'échelle du 1/10 000^{ème} ;
- 2/ une carte interprétative des niveaux de probabilité de présence d'argiles.

L'objectif est une aide :

- à la décision pour la réalisation d'un carte géologique traditionnelle de détail des argiles,
- et à la précision des limites de ces formations géologiques argileuses de la carte géologique traditionnelle de détail des argiles.

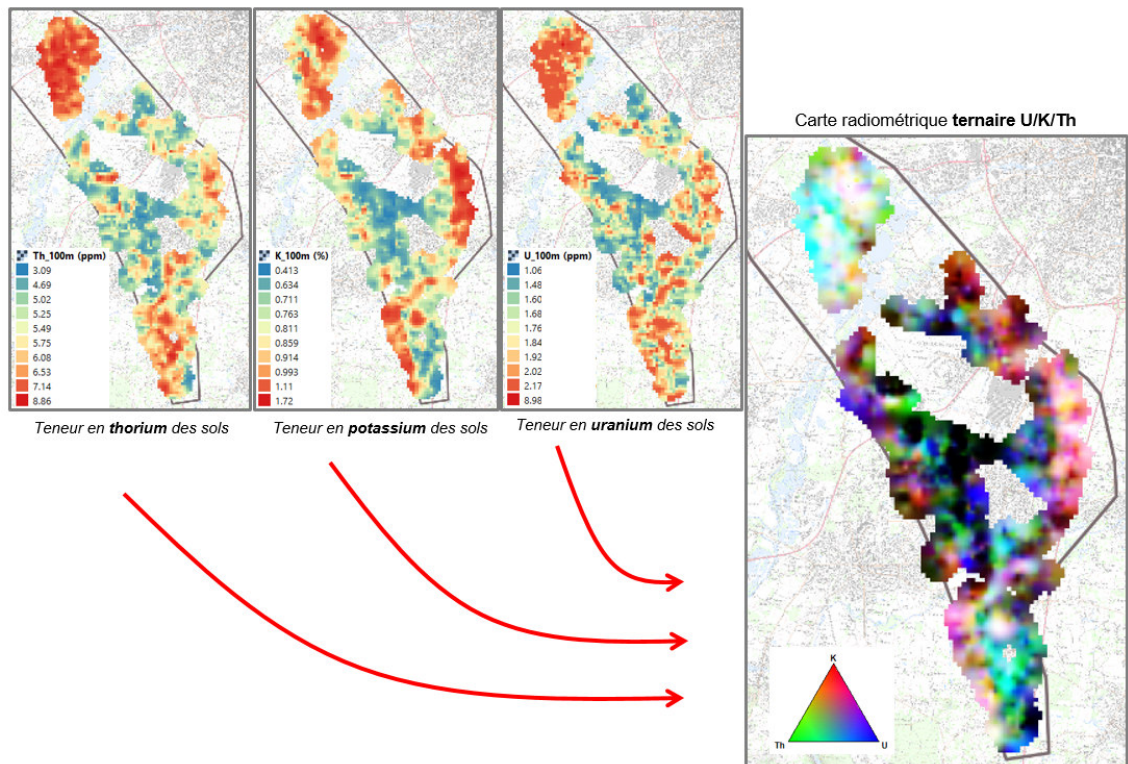


Illustration 29 : Levés des teneurs dans les trois éléments U : uranium, K : potassium et Th : thorium à gauche et à droite, combinaison pour la réalisation de la carte de spectrométrie gamma ternaire des sols de la zone d'étude (Echelle de validité le 1/10 000).

Vue d'ensemble

Les résultats montrent que la méthode permet, sans traitements poussés, de bien discriminer les formations géologiques du secteur d'étude (Illustration 30 ci-dessous).

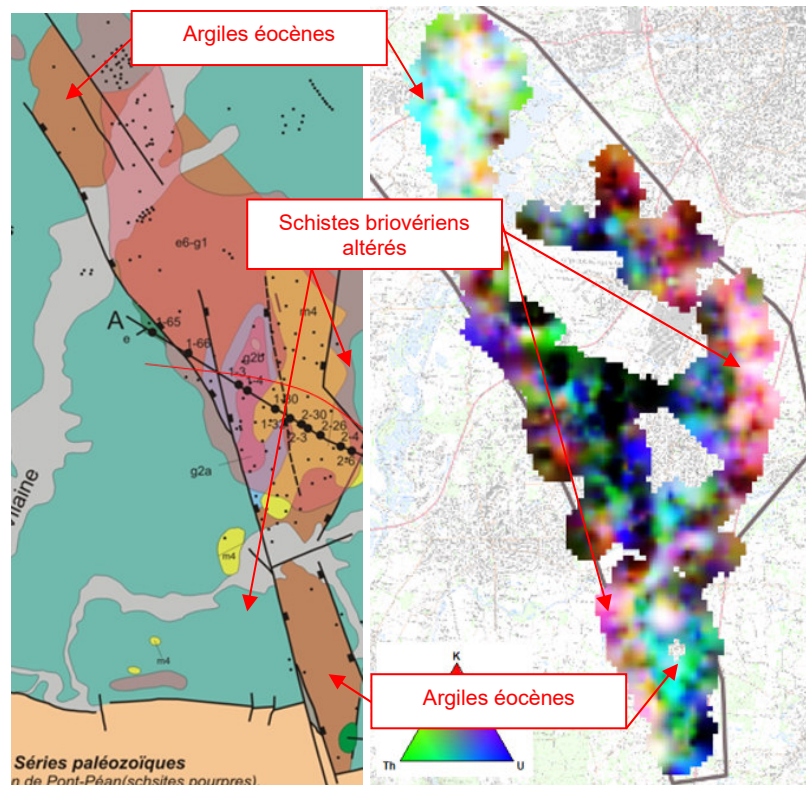


Illustration 30 : Comparaison entre la carte géologique simplifiée et de la radiométrie gamma

Les **argiles éo-oligocènes** du bassin de Chartres-de-Bretagne (**e7-g1, g1a et g**) qui sont à l'affleurement sur les communes de Pont-Péan et de Le Rheu, montrent des signatures en bleu pâle correspondant à **des teneurs en uranium et en thorium, plus riches** (partie basse et au centre du triangle de l'illustration n°30) que les formations géologiques adjacentes.

De la même façon, les **sables et argiles plio-quaternaires (p1-2-IV)** au sens large montrent des signatures de couleur bleu profond (bleu roi), correspondant à **des teneurs en uranium plus riches** que les autres formations géologiques.

Enfin, le domaine de socle, c'est-à-dire le sous-bassement du bassin de Chartres-de-Bretagne, composé de **schistes d'âge briovérien** et composés d'une alternance de pélites argileuses, d'argilites vert jaunâtre et de grès gris à vert, montrent des teintes dans le rose à rouge, correspondant à **des teneurs plus riches en potassium** que les autres formations géologiques.

Le reste des teintes sont des combinaisons plus ou moins fonction des variations lithologiques, de la présence plus ou moins épaisses d'alluvions récentes à anciennes et de colluvions (dépôts de pente) qui viennent brouiller le signal.

La présence d'eaux superficielles et/ou souterraines de ce secteur dont la géomorphologie est relativement plate peuvent également apporter des incertitudes.

Les passages d'un signal caractéristique d'une formation géologique à une autre sont brutaux et aigus, ce qui va permettre une cartographie précise (Illustration 31).

Dans le détail

Les observations listées ci-dessus, permettent d'avoir une vue générale donc cohérente avec la connaissance géologique du secteur et la carte géologique au 1/50 000.

Il est cependant possible de préciser les variations des teneurs en U/K/Th au sein même des formations géologiques. C'est notamment le cas des **sables et argiles plio-quaternaires (p1-2-IV)**, qui montraient des signatures **des teneurs en uranium plus riches** que les autres formations géologiques mais où il existe au cœur même de la formation géologique des variations.

Dans le paragraphe 2.2.5, il a été décrit qu'à cette formation géologique des **sables et argiles plio-quaternaires (p1-2-IV)** étaient associées d'autres formations géologiques, notamment, celles **pA**, mais aussi **B, m5-p et m-p**. Ces dernières sont décrites (§ 2.2.5), comme ayant une forte composante argileuse avec une minéralogie de type « montmorillonite » (argile gonflante).

Il est donc possible que ces variations des teneurs en U/K/Th au sein même des sables et argiles plio-quaternaires, soient liées à des variations de faciès intra pliocènes et que les faciès qui ailleurs dans le département de l'Ille-et-Vilaine constituent des formations géologiques à part entière, soient également présents sur le territoire de l'étude.

Un bel exemple des lignes ci-dessus se situe dans le secteur des fours à chaux au niveau de la Lormandière.

L'illustration n°31 présente les variations du signal spectral sur ce secteur, et l'interprétation qui peut en être faite d'un point de vue des hétérogénéités lithologiques.

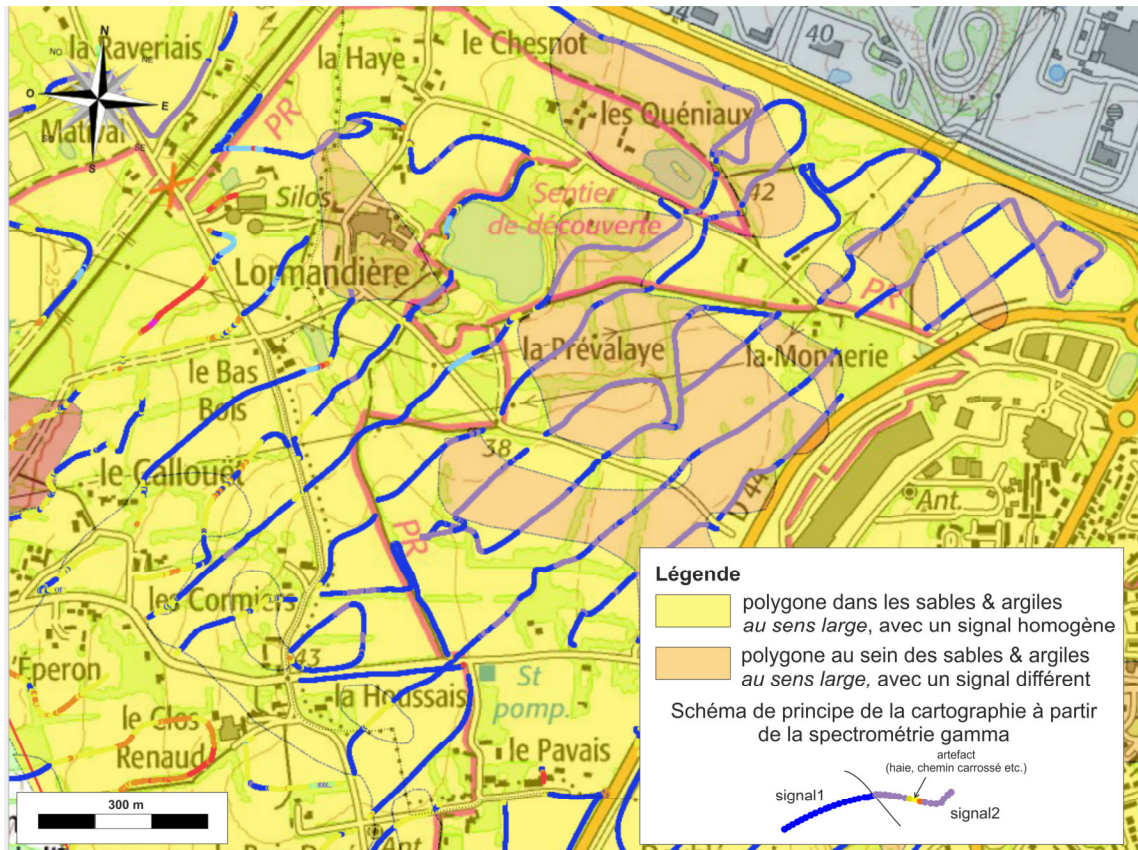


Illustration 31 : Détail de la cartographie au sein des sables & argiles plio-quaternaires dans le secteur des fours à chaux au niveau de la Lormandière.

3.2 CARTOGRAPHIE TRADITIONNELLE DES ARGILES

La cartographie de terrain à l'échelle du 1/10 000^{ème}, vient en complément et validation du levé de radiométrie spectrale.

Elle s'appuie sur la synthèse de l'ensemble des données disponibles sur l'aléa moyen et fort de la carte d'aléa retrait-gonflement des sols argileux réalisée à l'échelle départementale et résumé ci-dessus, sur le territoire de Rennes Métropole (environ 55 km²).

3.2.1. Cartographie géologique de détail au 1/10 000^{ème}

La cartographie géologique a consisté à arpenter l'ensemble du territoire à investiguer en utilisant toutes les voies de communication (sentiers, chemins, routes, voies ferrées etc ; Illustration 32) et de faire un maximum d'observations géologiques qui sont ensuite reportées sur une carte au 1/10 000^{ème} : *La minute de terrain*.

Dans les secteurs où il n'a pas été possible de faire des observations de terrain, en l'absence d'affleurements géologiques, des prélèvements de sols à l'aide d'une tarière à main sont venus compléter les points de contrôle. Les prélèvements à la tarière à main sont généralement réalisés dans des fonds de fossés ou des délaissés de routes et de chemin, avec une profondeur d'investigation de 0 à 0,8 m maximum.

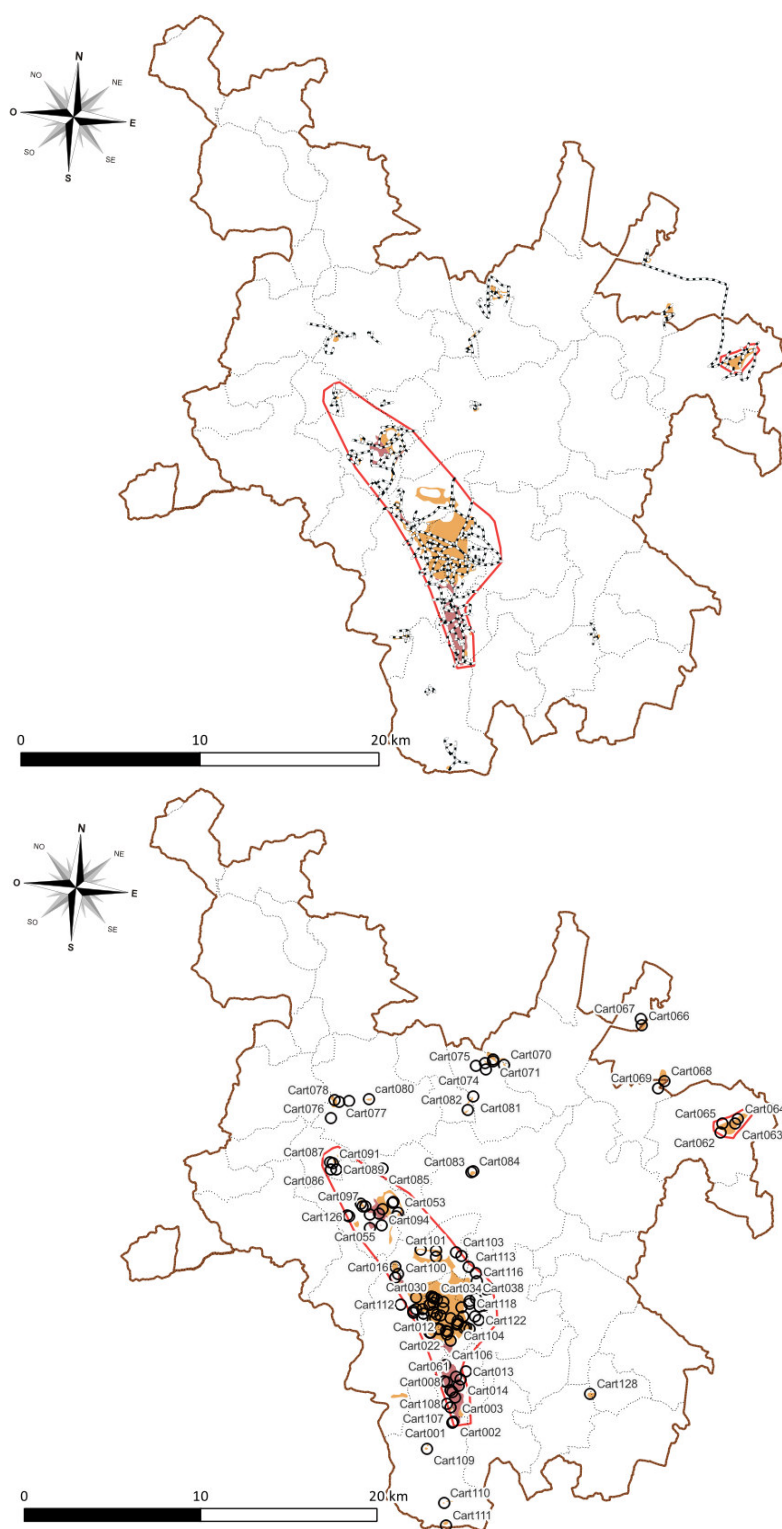


Illustration 32 : Carte des chemins parcourus à gauche et carte des points d'observation à droite.

120 points d'observation ont été réalisés sur le territoire de Rennes Métropole sur une campagne de terrain de 15 jours ouverts en juin 2021, septembre 2021 et avril 2022 (Illustration n°32).

Pour chaque point d'observation ont été observés :

- la nature des terrains/des roches (les lithologies),
- les directions de fracturation quand elles étaient présentes (fractures/failles),
- l'altération des roches (état de conservation),
- et leur relation entre elles : contacts normaux « stratigraphiques » ou anormaux « tectoniques ».

3.2.2. Requalification des polygones de 1 à 11 en aléa moyen : Acigné, Thorigné-Fouillard, Saint-Sulpice-la-forêt, Betton/La Chapelle-Fougeretz, Montgermont, Pacé, Rennes, Vezin-le-coquet/Le Rheu, Bruz, Laillé et Saint-Armel.

L'ensemble des polygones en aléa retrait-gonflement fort et moyen du territoire de Rennes Métropole, a été visité (Illustration n°32).

La vérification de l'ensemble des polygones en aléa fort et moyen, ont pu être ainsi réévalués (Illustration n°34), et ont tous vu leur qualification en aléa faible pour les considérations qui suivent :

- 1- **Acigné** : Ce polygone était initialement cartographié comme « Nappes résiduelles à galets de quartz ». Dans le secteur de Lanhelin, une analyse aux rayons X dans « ces nappes résiduelles à galets de quartz », avait montré une très forte teneur en smectite ce qui avait entraîné, l'attribution d'un niveau d'aléa moyen. La visite de terrain a montré en réalité qu'il correspondait à des argiles et limons d'altération, dont l'aléa était plutôt faible, ce qui permet de requalifier l'aléa de ce secteur en faible.
- 2- **Thorigné-Fouillard** : Comme pour le polygone précédent, le polygone de Thorigné-Fouillard correspond à des argiles et limons d'altération de couleur claire à ocre (argiles et limons tâchetés caractéristiques). Ce polygone peut donc aussi être rattaché à ceux des argiles et limons d'altération dont le niveau d'aléa est faible.
- 3- **Saint-Sulpice-la-forêt** : Même constat que pour les polygones précédents, le polygone de Saint-Sulpice-la-forêt est composé d'argiles et limons d'altération de couleur claire à ocre, ce qui permet de lui attribuer un niveau d'aléa faible.
- 4- **Betton/La Chapelle-Fougeretz** : Les polygones de ce secteur sont très différents des précédents. Ils correspondent à une formation sédimentaire sablo-argileuse rouge-orangée, dont l'âge pourrait se situer au Plio-Quaternaire. Proche de ces secteurs (point rouge sur l'illustration 33), une coupe le long d'un talweg d'une route communale permet d'observer le passage entre ces sables argileux rouges, déposés au-dessus d'un substratum schisteux briovérien altéré au stade « isaltérite » (Illustration 33). De part sa

nature lithologique et sa fraction sableuse, il est possible de réduire l'aléa moyen de ces polygones en aléa faible.

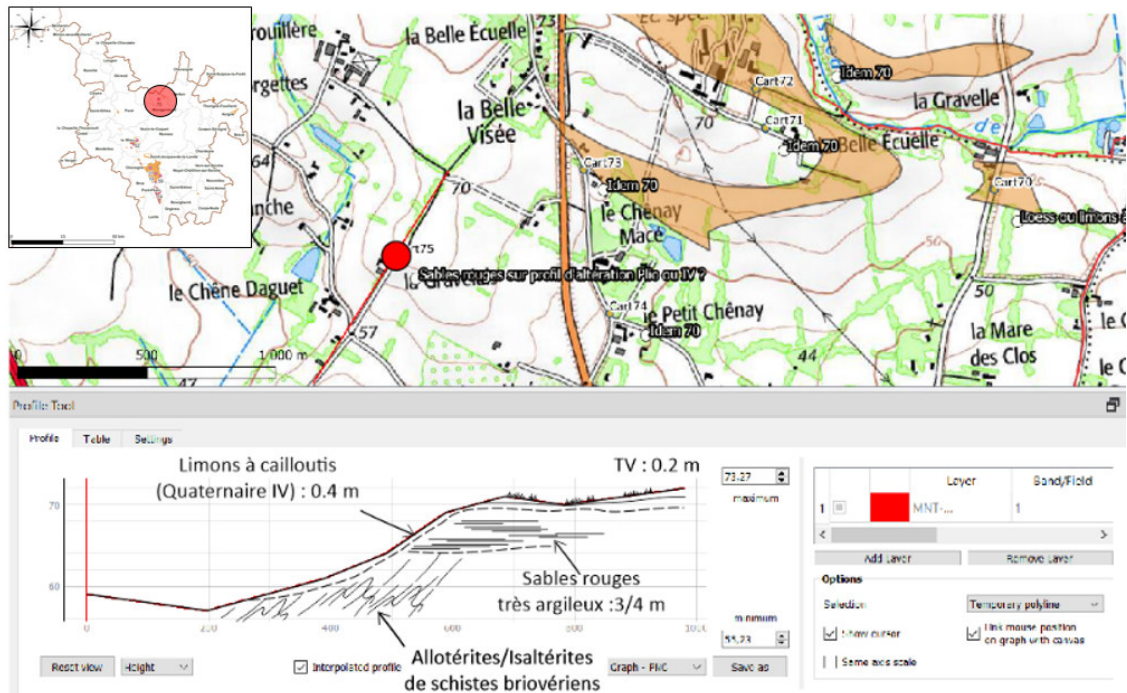


Illustration 33 : Coupe du talweg dans le secteur de Betton, lieu-dit Belle écuelle

- 5- **Montgermont** : Le polygone de Montgermont correspond à une formation géologique limono-argileuse ocre caractéristique des argiles et limons d'altération. La tranchée le long de la RD637 lors de notre passage sur le terrain, pour des travaux d'aménagements, a permis cette observation. Le polygone peut être ainsi rattaché aux argiles et limons d'altération qui avaient été qualifiés en aléa faible.
- 6- **Pacé** : Des excavations sont observables dans le secteur de ce polygone. Ces anciennes exploitations et leurs réaménagements en espace vert, montrent des niveaux de sables fins de couleur grise, pouvant correspondre à des sables sub actuels (Holocène) et non plio-quaternaires, et correspondant aux alluvions du lit majeur de la Champalaune (riv.). Les alluvions des rivières d'Ille-et-Vilaine ayant été classés en aléa faible, les polygones de secteur peuvent être eux aussi reclassés en aléa faible.
- 7- **Rennes** : Le polygone est d'assez petite taille (7 hectares) et entièrement urbanisé, au sud-ouest du CHU de Pontchaillou. Les quelques possibilités d'observation des terrains naturels ont pu être faites au niveau des terrains de sport et montrent des matériaux gravelo-sableux (alluvions anciens). Cette observation est confirmée par un forage de la Banque de données du Sous-Sol, n°BSS000XPLY. Ce forage décrit 5 m de limons sableux jaunes à éléments de schistes, au-dessus de 5 m de sables jaunes qui surmontent le substratum schisteux. Ces descriptions entraînent donc une dégradation de la note d'aléa moyen en faible, comme pour les alluvions anciens (ou anciennes terrasses alluviales).

- 8- **Vezin-le-coquet/Le Rheu (nord)** : Le polygone correspond à des argiles d'altération de couleur claire à ocre (argiles tâchetées caractéristiques). Comme pour les polygones des secteurs 1, 2, et 3 par exemple, ces argiles et limons d'altération peuvent être requalifiés en aléa faible.
- 9- **Bruz** : Le polygone sur Bruz était initialement décrit comme des galets, cailloutis, sables, et argiles jaunes à rouges avec des indurations ferrugineuses, dont l'âge est indéterminé et supposé pliocène à quaternaire. La visite de terrain a montré que ce polygone correspondait à des argiles et limons d'altération. En Ile-et-Vilaine, des secteurs ont été cartographiés en Pliocène alors qu'ils correspondent à des secteurs rougis correspondant à la présence d'altération poussée. Ces secteurs peuvent donc être rattachés aux faciès du profil d'altération et être requalifiés en aléa faible.
- 10- **Laillé** : Comme pour les polygones précédents, la visite de terrain sur la commune de Laillé a montré que ces polygones correspondaient à des sols limono-argileux rougis, qui correspondaient un substratum schisteux altéré. Le niveau d'aléa de ce polygone peut donc être, comme pour les argiles et limons d'altération, réduit d'aléa moyen en aléa faible.
- 11- **Saint-Armel** : Les mêmes observations que sur Laillé sont valables ici sur Saint-Armel. Les polygones de Saint-Armel correspondant à des faciès d'altération, l'aléa moyen peut être réduit en aléa faible.

Conclusions

La visite de terrain de chaque polygone en aléa moyen du territoire de Rennes Métropole (secteurs 1 à 11 de l'illustration n°25) a permis de leur attribuer une lithologie (nature du sous-sol) plus précise. Ces lithologies avaient été originellement attribuées à partir des cartes au 1/50 000 du BRGM, qui elles-mêmes avaient été harmonisées à l'échelle du département. Les nouvelles lithologies ont été rattachées à des lithologies déjà connues et déjà évaluées en termes d'aléa RGA, et pour l'ensemble de ces polygones, la note d'aléa moyen a été déclassée en aléa faible car elles ne correspondaient pas à des argiles *sensus stricto*.

Lors de l'évaluation des teneurs en sable de la formation géologique des « sables et argiles rouges plio-quaternaires », souvent notée « p-IV », réalisée au moment de l'évaluation de la ressource minérale pour le Schéma Régional des Carrières (SRC), le BRGM s'était aperçu (Schroëtter et al., 2017 ; [RP-67165-FR](#)):

- que la plus part de ces polygones étaient plutôt sableux ;
- et que sur les cartes géologiques au 1/50 000ième, les étendues rougies avaient été notées comme « Pliocène ou Tertiaire » alors qu'elles correspondaient à des niveaux d'altérites.

Sur cette base, ces zones ont donc vu leur aléa réduit à faible. Le travail réalisé sur les sables rouges lors du SRC pourrait être intégré à de futures cartes géologiques ou d'aléa RGA.

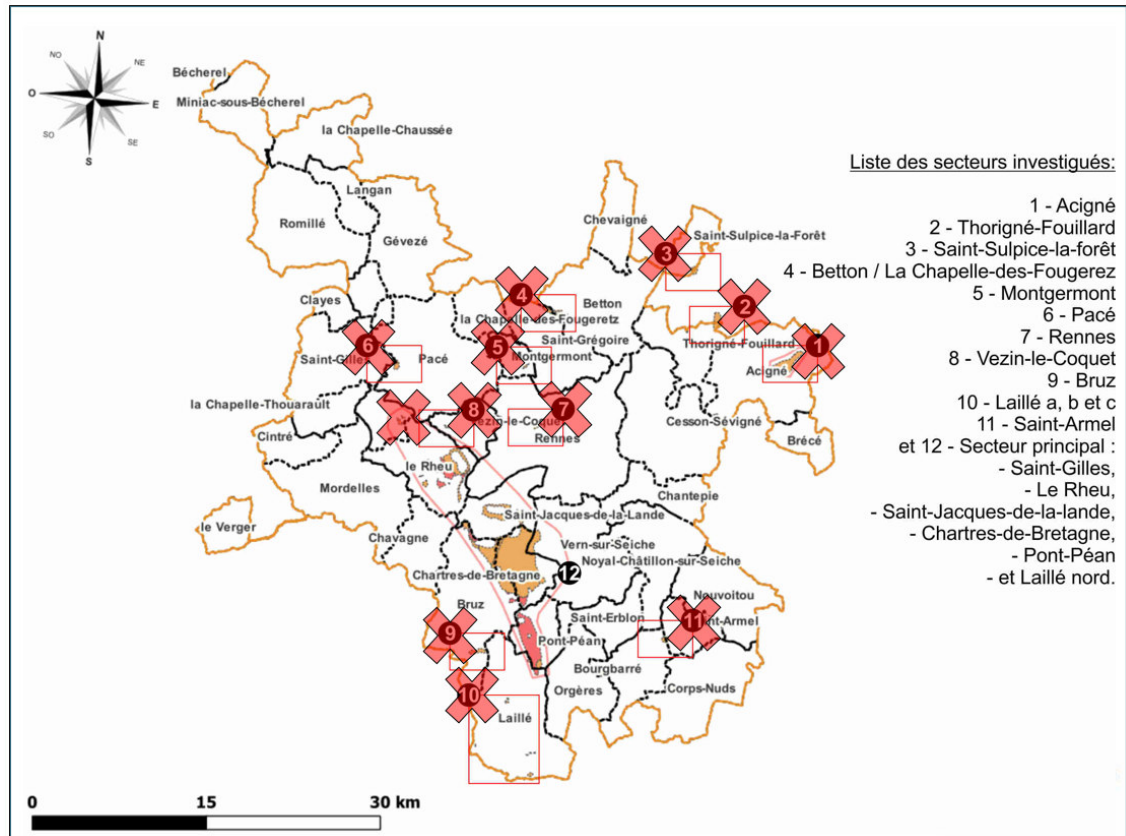


Illustration 34 : Liste des secteurs et croix rouges soulignant leur changement de niveau d'aléa de moyen à faible.

Les investigations de terrain lors de CARTAGILE et les informations récoltées depuis la fin de la carte départementale de 2010, ont permis de réviser l'aléa moyen des la plupart des polygones contenus sur la territoire de Rennes Métropole (Illustration 34).

3.2.3. Requalification des polygones du secteur 12 en aléa moyen et fort (secteur principal) : Le Rheu, Saint-Jacques-de-la-lande, Chartres-de-Bretagne, Pont-Péan et Laillé nord.

En s'appuyant sur la spectrométrie gamma (§ 3.2) et les investigations de terrain, une nouvelle carte géologique des formations géologiques argileuses a pu être dressée au 1/10 000ième.

Sur les 120 points d'observation, au moins 8 sont des points d'observation de très bonne qualité, permettant de caler les forages tirés de BSS contenant une coupe géologique utilisable (61). Les autres sont des observations ponctuelles qui permettent de valider, vérifier ou compléter la carte géologique du BRGM au 1/50 000ième (Illustration 35).

Ils correspondent pour les plus pertinents à des bouts de talus de quelques décimètres (0.5 m), à des fonds de fossés (nettoyés ou curés : 0.3 à 0.8 m), des découvertes de

terrains constructibles (100 à plus de 500 m²) ou encore à des champs n'étant pas encore plantés.

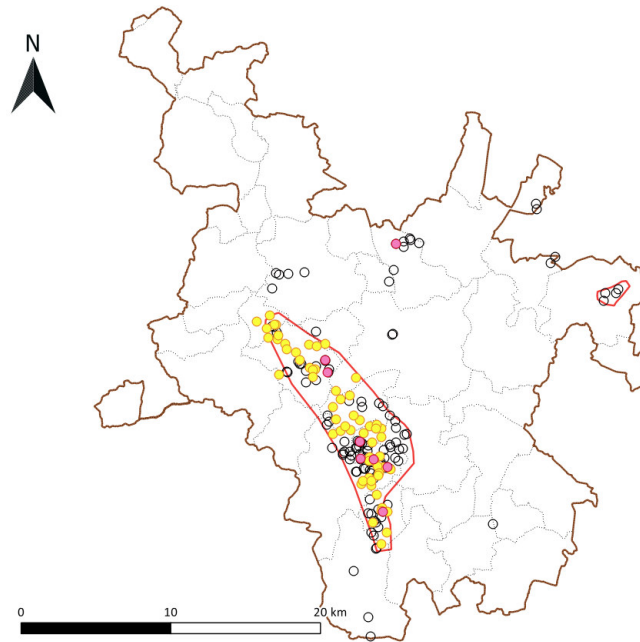


Illustration 35 : Points d'observation de la cartographie de terrain (rond vide) avec les points d'observation de qualité (rond rose) et les forages de la BSS avec une coupe géologique utilisable en complément (rond jaune).

Les investigations ont permis de caractériser les formations géologiques d'âge mio-plio-quadernaire, notées : **p1-2-IV, qui étaient notées en aléa moyen, en s'appuyant sur les formations géologiques notées pA, B, m-p et m5-p en aléa fort à moyen d'Ille-et-Vilaine** et décrites au paragraphe 2.5.5.

Cinq affleurements-clés au sein de p1-2-IV ont permis d'établir : (1) les relations entre les formations géologiques sus-jacentes et sous-jacentes et (2) d'identifier les lithologies dominantes (Illustration 36).

Au nord de la zone d'étude (Illustration n°36), sur la commune de Le Rheu, les affleurements nommés Cart52 et Cart54, montrent des coupes des terrains (à la faveur d'un talus de bord de route pour Cart54 et d'un front de taille de la sablière de La Hauzière pour Cart52).

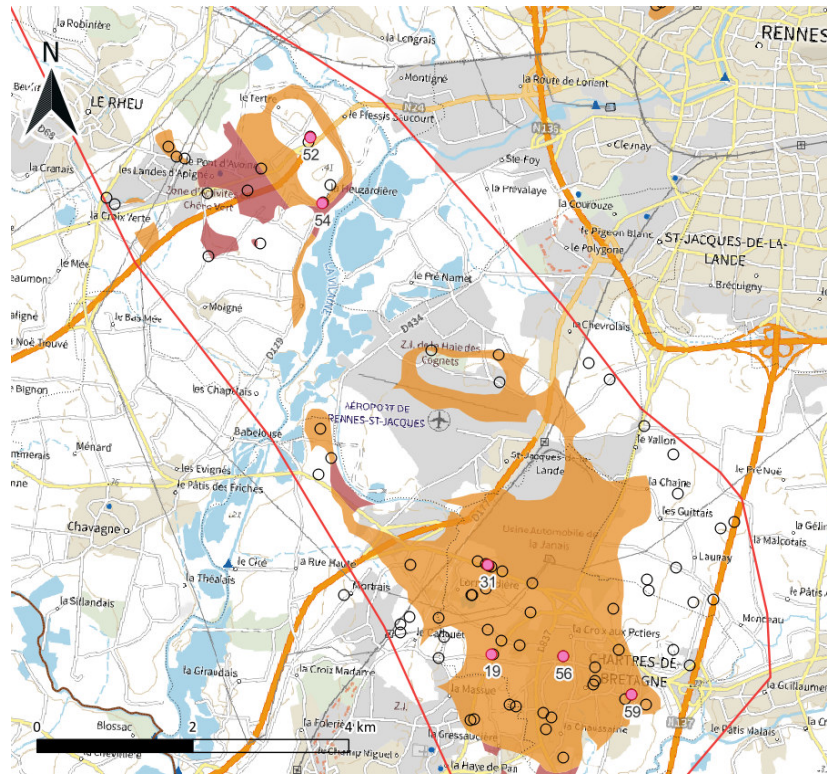


Illustration 36 : Points d'observation de la cartographie de terrain (rond vide) avec les points d'observation de qualité (rond rose) sur la formation géologique p1-2-IV en aléa moyen.

Du sommet vers la base sur Cart54 (Alt. 30 m NGF), la suite lithostratigraphique correspond à (Illustration 37) :

- 1.5 m environ de limons ocres de type « loess » périglaciaires (Holocène) mais avec, proches de la base, des éléments de quartz opaques clairs sub-arrondis, qui suggèrent que l'ensemble est un dépôt de pente de type « head ».
- Ces limons surmontent 1 m environ de galets et graviers de quartz au sens large, dans une matrice sableuse rouge à sablo-argileuse, avec des lentilles (0.2 m d'épaisseur) de sables rouges grossiers. Ce caractère hétérogranulaire correspond à des terrasses quaternaires anté-holocènes (Pléistocène moy. à sup.).
- Enfin, ces terrasses alluviales surmontent elles-mêmes des sables rouges fins à matrice argileuse, plutôt caractéristiques du Pliocène de la région ou du Quaternaire ancien (Pléistocène inf.)

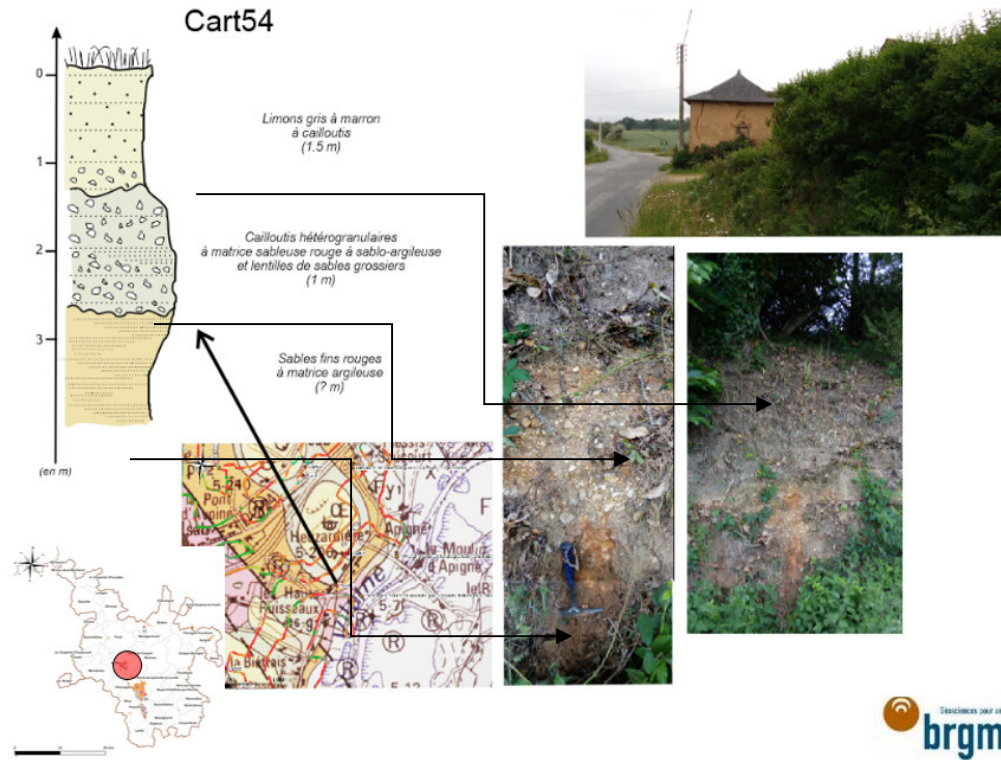


Illustration 37 : Point d'observation Cart54 – microlog du talus de route au sud de La Heuzardière, Commune de Le Rheu.

En ce qui concerne l'affleurement Cart52 (Alt. 40 m NGF ; Illustration 36), la série est légèrement différente mais corrélable avec celle de Cart54.

Du sommet à la base, elle débute par (Illustration 38) :

- Un sol argilo-sableux de 1 m d'épaisseur, de couleur gris à vert, à cailloutis, correspondant à des éléments briovériens. Ce sol correspond à un sol holocène.
- Ce sol surmonte une alternance de niveaux de 0,2 à 0,5 m d'épaisseur, de sables rouges, de conglomérats et de microconglomérats à matrice sableuse rouge, granoclassés, sur 2,5 m.

Ce dernier niveau peut correspondre soit à la formation pliocène, soit à la formation Pléistocène ancien.

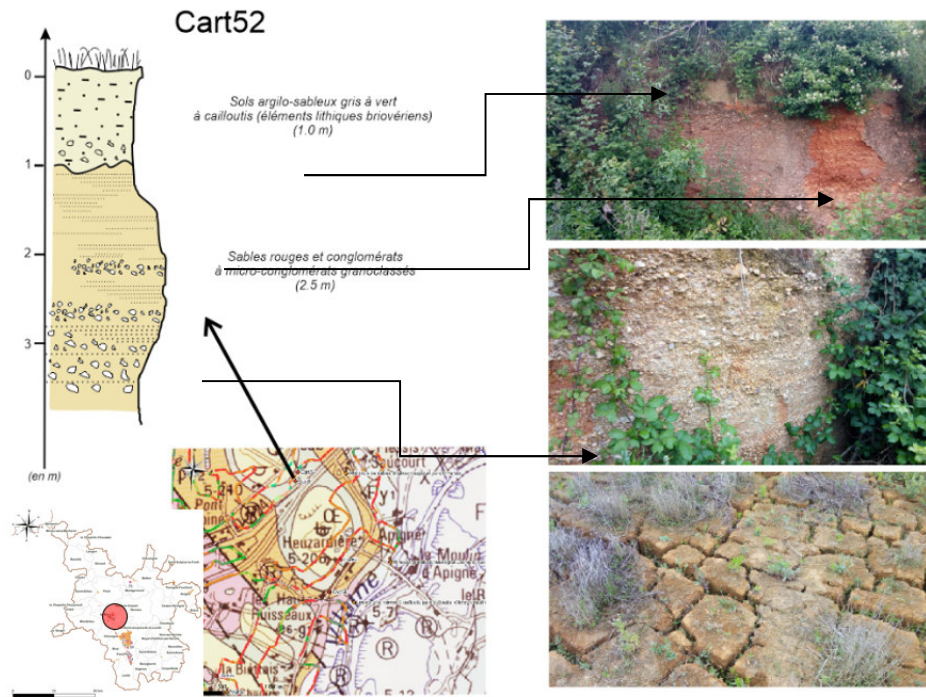


Illustration 38 : Point d'observation Cart52 - microlog d'un ancien de front de taille (Sud) de La Heuzardières, Commune de Le Rheu ; Photographie du bas : argiles de décantation.

Les deux affleurements Cart52 et 54, montrent clairement le caractère détritique de la formation géologique p1-2-IV. Peu d'argiles sont présentes hormis celles issues du lavage des sables (Illustration 38 en bas).

Cette formation va voir de ce fait, son aléa au retrait-gonflement très largement réévalué.

Dans la notice de la carte géologique (Feuille n°317, Rennes), ce secteur où avait été défini le stratotype du Pliocène en Bretagne (Durand, 1960), avait fait l'objet d'investigations complémentaires. Plusieurs forages avaient permis de faire une coupe nord-sud de sables rouges du secteur (Coupe géologique d'Apigné, Trautmann et al., 2000 ; Feuille n°317, Rennes).

Premières conclusions partielles :

L'interprétation historique était que les sables rouges étaient contenus dans un bassin tectonique dont la faille supposée avait la même orientation que celle de Pont-Péan (Nord-Ouest/Sud-Est). Nos investigations de terrain ne confirment pas l'hypothèse d'une faille, étant donné que le signal de la spectrométrie gamma ne s'arrête pas brutalement suivant un accident N150°.

Ainsi, le contact entre les argiles éo-oligocènes et les sables rouges, ne faisant qu'un angle de 25° approximativement, pourrait correspondre à un talweg (Illustration 39).

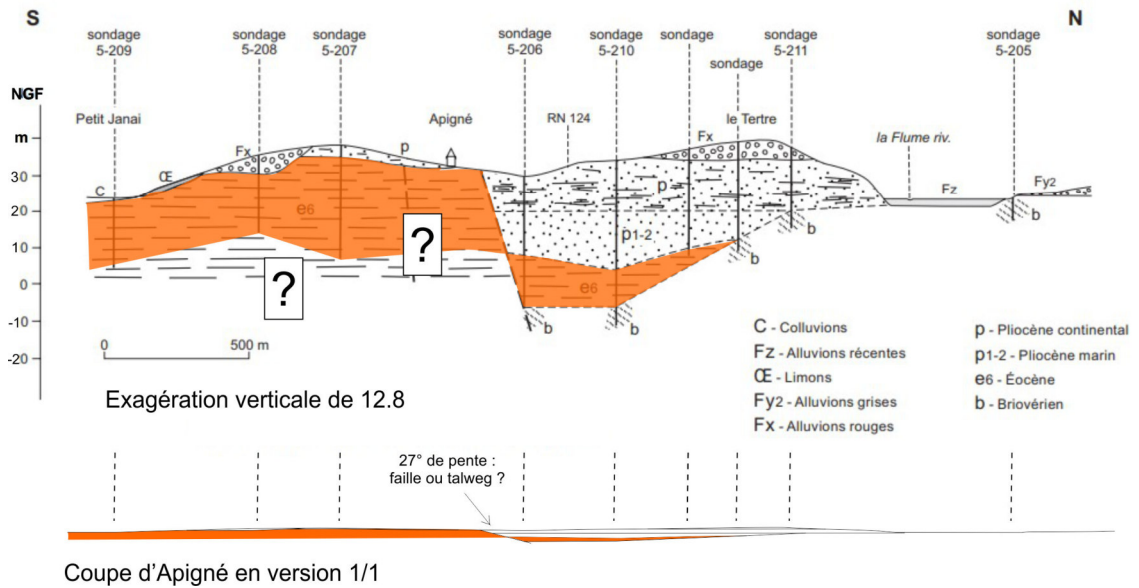


Illustration 39 : En haut - Coupe d'Apigné tirée de la notice de la carte géologique au 1/50 000, Feuille n°317, Rennes, Trautmann et al., 2000) avec les argiles éo-oligocènes surlignées en orange ; En bas – Même coupe mais sans exagération verticale. La limite entre les sables pliocènes rouges et les argiles éo-oligocènes fait 25° et pourrait correspondre à un talweg.

L'autre fait important sur cette coupe (complétée par l'analyse détaillée des descriptions des séries de sables rouges de la notice de la Feuille n°317, Rennes), est que la base de la série (Description du log de forage 5-206 et Illustration 39) semble plutôt être dominée par une fraction argileuse.

Plus au sud, dans le bourg de Chartres-de-Bretagne, au moins quatre autres affleurements permettent là aussi de caractériser les lithologies de la formation géologique et ses relations avec les autres formations géologiques sous-jacentes et sus-jacentes (Illustration 36).

Sur le point d'observation Cart31 (Illustration 40), le talus le long de la route départementale n°34 (au niveau de l'usine de PSA, sur environ 700 m de long), la série des sables rouges pliocènes est composée par de la base au sommet :

- 1,5 à 2,5 m d'épaisseur d'une alternance de conglomérats et microconglomérats et niveaux graveleux à gravelo-argileux de couleur rouge.
- Elle repose sur des niveaux limono-argileux rouges avec des éléments lithiques hétérogranulaires (du galets aux graviers).

Comme pour les suites lithologiques précédentes, les niveaux plus argileux semblent être situés à la base de la série.

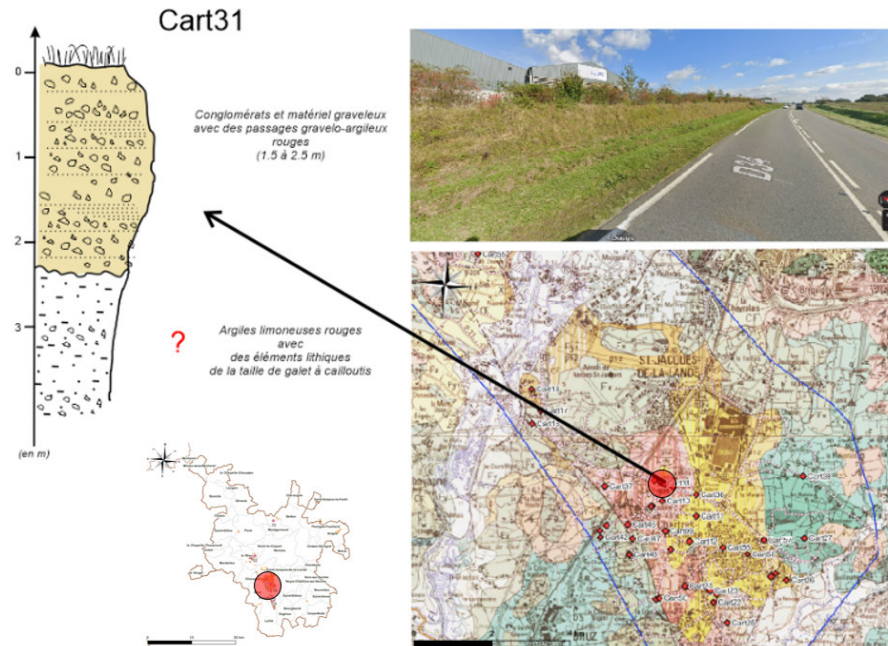


Illustration 40 : Point d'observation Cart31 - microlog de bord de route sur 700 m de long, le long de la RD n°34 (Chartres-de-Bretagne)

Les points d'observation suivants montrent la relation entre cette formation géologique **p1-2-IV** et celles sous-jacentes.

Au point Cart19 (alt. 38 m NGF ; Illustration 41), il est possible d'observer du sommet vers la base :

- Un niveau de sables rouges, fins à très fins ferrugineux, subhorizontal sur 1,5 à 2,5 m d'épaisseur.
- A la base de ces sables, rapidement le passage vers les faluns miocènes sous-jacents se fait sur environ 0,5 m, par un niveau chaotique avec des éléments lithiques à la fois carbonatés et de quartz, soulignant un passage certainement érosif.
- Et enfin les faluns miocènes, altérés et composés de sables et micro conglomérats (arénites à rudites).

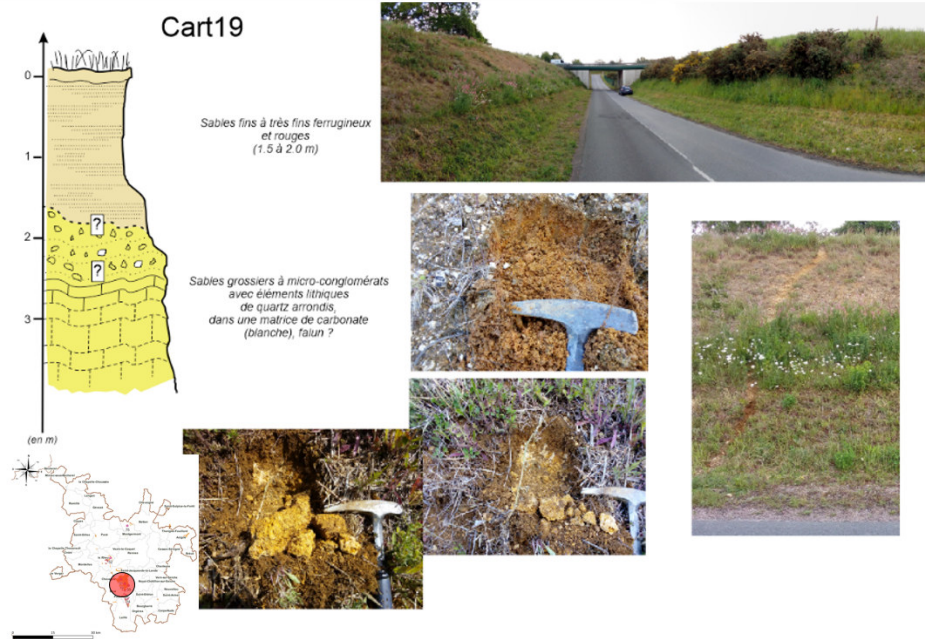


Illustration 41 : Point d'observation Cart19 - microlog de bord de route sur 200 m de long, le long de la route du Clos Renaud (Chartres-de-Bretagne) passant sous la route de la Croix-blanche.

Au Cart56 (Alt. 34 m NGF ; Illustration 42), dans le bourg de Chartres-de-Bretagne, en la faveur de travaux de la construction d'un R+2 avec souterrain, la formation géologique de sables rouges n'est plus présente.

Elle est remplacée par :

- un sol limono-argileux rouge au dessus sur 1,5 à 2 m d'épaisseur,
- puis, dessous, des faluns miocènes très altérés (pluvérulents).

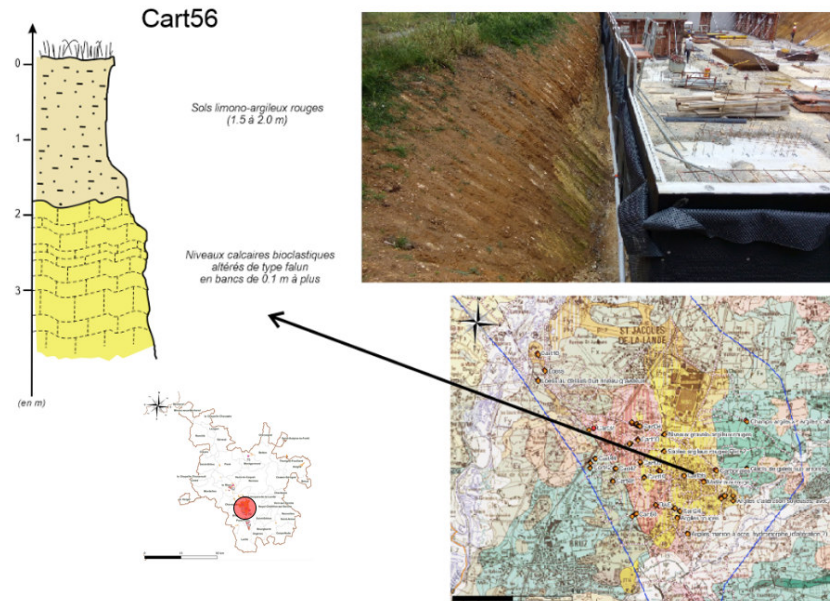


Illustration 42 : Point d'observation Cart56 - microlog dans le bourg de Chartres-de-Bretagne, à la faveur de travaux de la construction d'un R+2 avec souterrain (Chartres-de-Bretagne)

La comparaison des deux micrologs de Cart19 et 56, montre que le niveau limono-argileux de Cart56 est à une altitude NGF de 4 m en dessous de celle de Cart19.

Ailleurs dans le bourg de Chartres-de-Bretagne, où vers le sud en direction de la Seiche (Riv.), l'altitude diminue progressivement et il est possible de voir apparaître de plus en plus de termes argileux dans la formation géologique pliocène au sens large (Illustration 43).

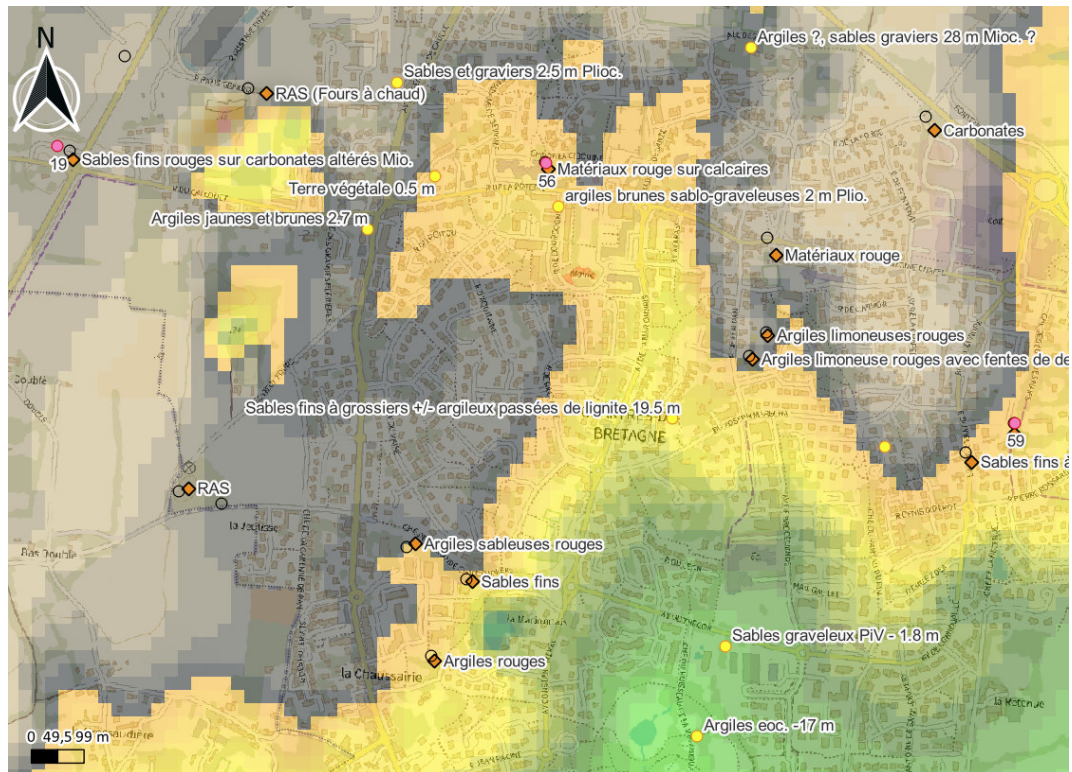


Illustration 43 : Les argiles « pliocènes » semblent plutôt se situer en moyenne sous la côte 34 m NGF (limite des pixels noirs et orangés tirés du MNT au pas de 25 m de l'IGN) mais sans que ce soit une règle absolue.

Secondes conclusions partielles :

Les observations au niveau du bourg de Chartres-de-Bretagne, confirment la présence d'une formation argileuse pliocène. Cette fraction argileuse est plutôt située en dessous de la fraction sableuse.

La présence au sein du Pliocène d'un terme argileux pourrait être une explication de la variation systématique du signal U/K/Th, observée au sein des sables. Ainsi les mesures faites en surface, oscillent car elles se situent à proximité de cette interface sable/argile.

Dans l'inventaire des formations géologiques dans la tranche d'âge pliocène, la présence de cette argile rouge sur le secteur de Chartres-de-Bretagne pourrait correspondre à un équivalent latéral à vertical à la formation **notée pA**, qui n'est observable que très localement à Saint-Jean-la-Poterie (Morbihan). A Saint-Jean-la-Poterie (Morbihan), ces argiles reposent cependant sur des sables marins jaunes azoïques.

D'autres formations géologiques avec une dominance argileuse en Ile-et-Vilaine appartiennent au cycle sédimentaire mio-plio-quadernaire. Elles sont **notées B, m5-p et m-p**. Ces trois formations pourraient elles aussi être des équivalentes latérales aux argiles identifiées dans le cadre du projet CARTAGILE (§ 2.2.5).

La **Formation n°13, notée B**, pour argiles sableuses rouges et cailloutis, d'âge supposé aussi dans la tranche plio-quaternaire d'après la notice de la carte géologique au 1/50 000 de Caulnes, est systématiquement située au-dessus des faluns miocènes et sous des alluvions plio-quaternaires. La **Formation n°14, notée m5-p**, montre des argiles montmorillonitiques (à concrétions carbonatées) et est décrite à Chasné-sur-Illet, et représente 5 m d'argile verdâtre (à concrétions blanches de calcite), essentiellement de montmorillonite (smectite), argile micacée et kaolinite. Les restes d'Echinides, de Bryozoaires, de Bivalves et une microfaune particulièrement riche en Foraminifères et de coccolithes pourraient lui conférer un âge Pliocène (J. Estéoule *et al.* 1972), mais l'étude des coccolithes (J.P. Margerel 1983, non publié dans la notice de la carte géologique de Combourg) préciserait un âge miocène moyen à terminal. Enfin, la **Formation n°15, notée m-p**, semble similaire à celle **notée m5-p**, notamment dans sa composition de faluns, sables et argiles smectitiques à faune marine de Poligné sur des épaisseurs de 4 à 9 m.

Alors qu'avaient été proposées des relations entre les formations pliocènes et quaternaires avec la géomorphologie (notice explicative de la carte de n°419, Redon ; Illustration 44), ce niveau d'argiles sous-jacent aux sables rouges dans le secteur de Chartres-de-Bretagne/Apigné pourrait venir s'insérer au-dessus des argiles datées du Miocène sup. à pliocène inf. (m5-p, m-p et pA), avec des minéralogies plutôt smectitiques et sous les sables rouges pliocènes.

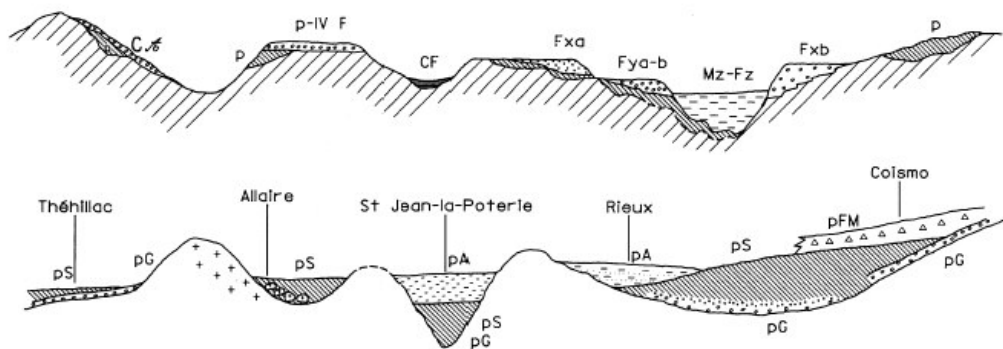


Illustration 44 – Relation entre les formations pliocènes et quaternaires avec la géomorphologie (d'après la notice explicative de la carte de n°419, Redon).

Dans le cycle mio-pliocène, les argiles sous-jacentes pourraient correspondre à la remontée du niveau marin au Miocène sup. (au Messinien), la séquence peut débuter par des sables évoluant vers des argiles (pA, m5-p et m-p, voire B à préciser ; série granodécroissante positive), jusqu'au niveau maximum d'inondation. La suite de la série serait l'installation des sables rouges passant latéralement aux argiles identifiées dans CARTAGILE (série granocroissante, négative), plutôt kaoliniques, dans un environnement circa continental jusqu'à l'installation des cycles quaternaires (Illustration 45).

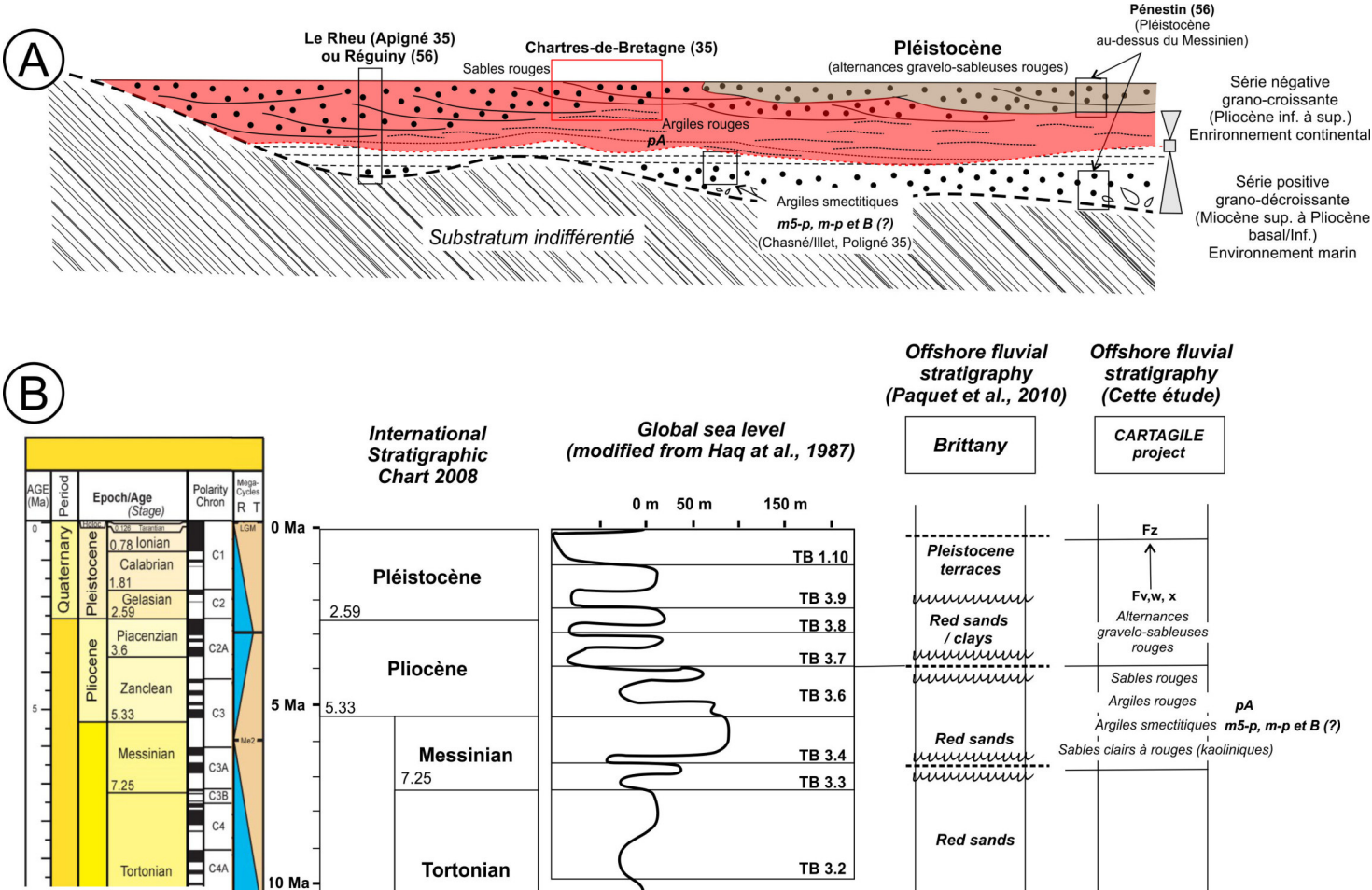


Illustration 45 : En haut, schéma conceptuel du cycle miocène sup.-pliocène d'Ille-et-Vilaine (cette étude) et en bas, du Morbihan sur la partie Offshore à partir de la cartographie CARTAGILE (modifié d'après Paquet et al., 2010)

Les formations géologiques argileuses oligo-éocènes notées en aléa fort :

Ces formations géologiques argileuses éocènes et oligocènes ont été regroupées car leur distinction est difficile sur le terrain. Leur cartographie s'est grandement appuyée sur la radiométrie spectrale, accompagnées de contrôles terrain (tarrière à main dans les fossés). Elles ont surtout pu être observées dans le sud du bourg de Pont-Péan (Illustration 46).

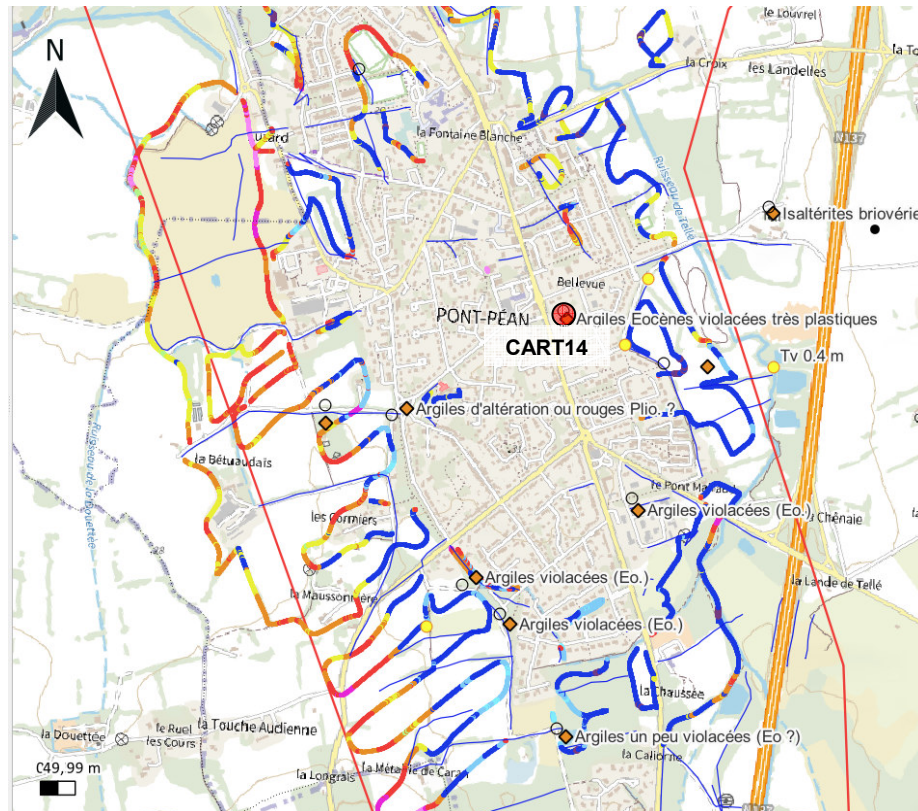


Illustration 46 : Points d'observation de la cartographie de terrain (rond vide) et les lithologies observées (losanges oranges), cheminements colorés du levé de spectrométrie gamma, sur la formation géologique éo-oligocène e6-g1 en aléa fort au bourg de Pont-Péan (35).

La formation géologique éo-oligocène se situe suivant une direction nord-ouest/sud-est (N150), correspondant au bassin d'effondrement de Chartres-de-Bretagne, qui s'étend depuis Le Rheu jusqu'à Pont-Péan. Sur l'illustration n°46, si la cartographie est difficile dans le bourg en raison de la forte anthropisation, la limite entre les schistes altérés du Briovérien (cheminements en rouge) est nette par rapport aux argiles éo-oligocènes (cheminements en bleu).

Le secteur où ces argiles sont observables de façon univoque, est celui du point d'observation Cart14 (Illustration 46 et Illustration 47).

Si les argiles ont été décrites sur les reconnaissances à la tarière à main comme des argiles très plastiques de couleur violacée (irisée caractéristique), elles apparaissent à la station Cart14 à la faveur de travaux de terrassements, tout autant plastiques, mais de couleur grise sans les irisations (Illustration 47). En surface, elles sont oxydées

(couleur rouille ocre sur les photographies de l'illustration n°47) et très rapidement, elles passent à une couleur uniforme grise.

Cart14

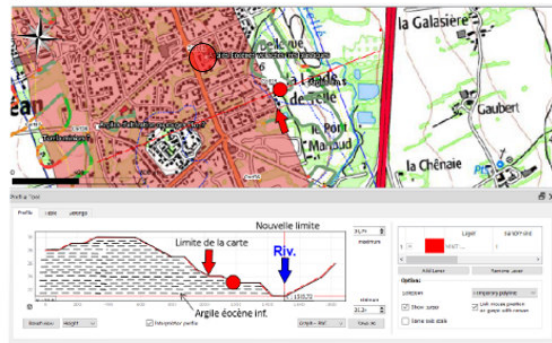


Illustration 47 : Point d'observation Cart14 – Décapage pour l'aménagement d'une parcelle située au-dessus des argiles éo-oligocènes dans le bourg de Pont-Péan (35).

Ces argiles pourraient être celles décrites dans :

- un puits (à La Riverdière ou La Raveriais) à Bruz, par T. Bezier (1902 ; Notice de la carte géologique de Rennes), décrivant 6 m d'argiles grises et noires azoïques, que Y. Milon (1936 ; Notice de la carte géologique de Rennes) appellera « sapropels inférieurs ».
- et dans plusieurs sondages du BRGM, dont celui de La Lande-du-Pont à Bruz (353-1-66), décrivant entre 2,50 et 17,20 m des argiles silteuses ou compactes, grises, noires ou brunes, à passées tourbeuses ou pyriteuses, datées du Sparnacien à Stampien inférieur (à partir de pollens de *Plicapollis pseudoexcelsus*).

Les informations géologiques complémentaires à la cartographie.

En plus des investigations de terrain, la cartographie traditionnelle a été complétée par l'ensemble des données géoscientifiques des bases de données du BRGM Bretagne, obtenues et bancarisées lors de différentes études sur la territoire breton (Illustration 48).

Elles correspondent :

- Aux rapports de recherche d'argiles réalisées par le BRGM lors du plan minier breton des années 1970 ;

- Des forages de la BSS, dont les informations géologiques étaient utilisables (<https://infoterre.brgm.fr>) ;
- Des points d'observation des cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM ;
- Et des analyses de sols récoltées lors de la cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement des argiles en 2010 (Schroëtter et al., 2010).

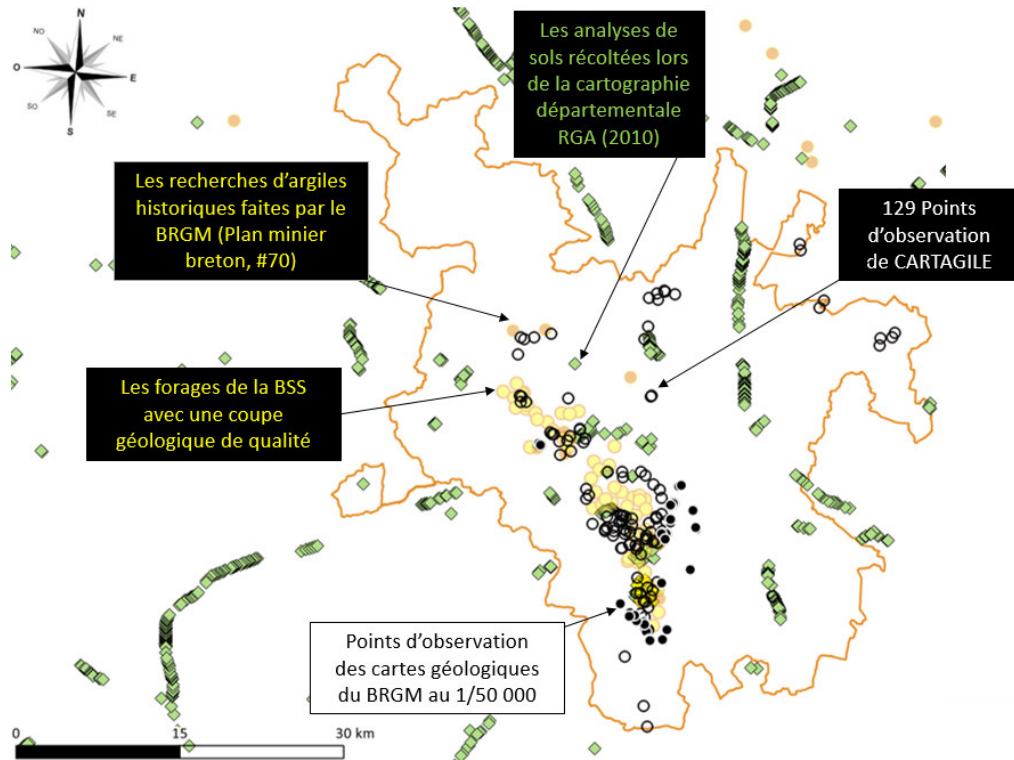


Illustration 48 : Ensemble des données complémentaires sur le territoire de Rennes Métropole utilisées pour la réalisation de la carte géologique.

3.3 LA CARTE DES ARGILES

Synthèse des résultats des deux méthodes

La radiométrie spectrale gamma a permis de mettre en évidence :

- des niveaux argileux au sein de la formation géologique des sables et argiles pliocènes ;
- de mieux préciser les limites des argiles éo-oligocènes ;
- Et enfin de préciser au sein des schistes birovériens, les secteurs altérés composés d'argiles d'altération.

La cartographie de terrain a permis :

- de valider les niveaux argileux au sein de la formation géologique des sables et argiles pliocènes : argiles rouges (+/- limoneuses),
- de préciser la position stratigraphique de ces niveaux argileux, en-dessous des sables rouges au sens large,
- de valider la présence des argiles éo-oligocènes et de les échantillonner,
- et de proposer une répartition des différentes formations géologiques en fonction de l'histoire géologique et de la dynamique sédimentaire.

L'ensemble permet de proposer une carte géologique des argiles au 1/10 000, et de préciser les secteurs les plus argileux (Illustration 49).

Trois formations géologiques argileuses initialement considérées comme en aléa moyen et fort sont présentes :

- les argiles dites « pliocènes »,
- celles dites « éo-oligocènes »
- et enfin les argiles d'altération des schistes briovériens.

Cette dernière peut être éliminée de la réévaluation de son aléa, puisque sur l'ensemble du territoire breton et de Rennes Métropole, ces argiles d'altération étaient en aléa faible. Ce sont donc les deux autres formations géologiques argileuses : les argiles dites « pliocènes » et celles dites « éo-oligocènes » qui vont être réévaluées.

Validation des argiles identifiées avec la radiométrie gamma

L'interprétation des mesures de spectrométrie gamma pour la connaissance des formations géologiques sédimentaires en centre France (Loire et Sologne ; Tissoux et al., 2017) avait abouti à la mise en place d'une nouvelle méthode de cartographie à partir des mesures spectrales.

Si cette méthode avait montré son efficacité en domaine de « bassin sédimentaire » (Illustration 49 en haut, Tissoux et al., 2017), elle n'avait pas encore été appliquée au « domaine de socle ».

La radiométrie spectrale gamma déployée dans le présent projet a montré qu'il était possible de discriminer et d'identifier les variations lithologiques invisibles sur le terrain, mais la relation entre ces argiles et leur minéralogie reste délicate. Cette méthode appliquée au domaine sédimentaire sur la totalité de la région Centre-Val de Loire (France) avait permis de produire une cartographie lithologique prédictive de la surface.

La discrimination entre les trois types d'argiles (pliocènes, éo-oligocènes et d'altération) est possible dans un diagramme k-Th (Illustration 49 en bas).

Chacune des formations argileuses identifiées dans le présent projet définit un domaine K-Th respectif avec cependant des zones de recouvrement.

L'Illustration 49 montre les mesures par formation argileuse. Les cercles correspondent aux zones de ces formations argileuses, réalisées avec une sélection des valeurs plus précises.

Les variations des teneurs en radioéléments contenus dans les différentes unités lithologiques argileuses mettent en évidence leur origine différente mais ne discriminent pas leur nature minéralogique.

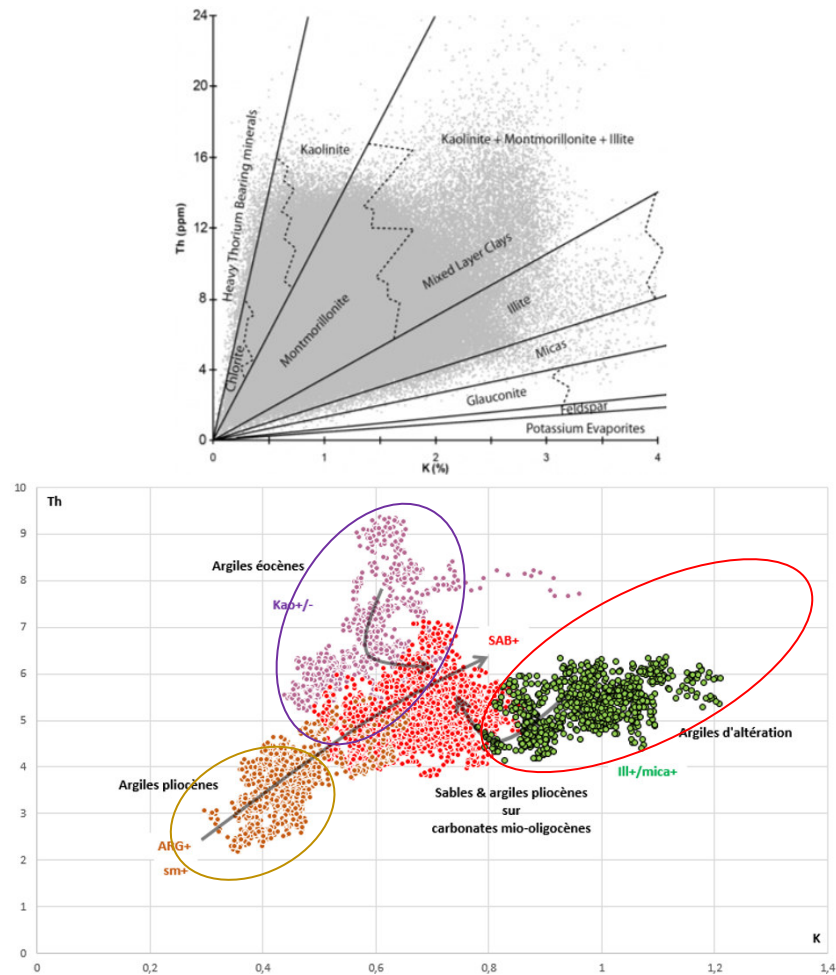


Illustration 49 : En haut - Répartition des valeurs des formations géologiques de la région Centre dans diagramme K-Th (Diagramme Schlumberger (1985) dans Tissoux et al. 2017) et en bas - répartition dans diagramme K-Th des trois formations argileuses identifiées dans le présent projet CARTAGILE.

Dans le diagramme K-Th (du bas), deux paramètres possibles influencent certainement la répartition des mesures radiométriques gamma des formations géologiques argileuses :

- Les variations des pourcentages en minéraux argileux (ici pourcentages de smectites) des argiles tertiaires bretonnes (graphique de l'illustration n°49),

- Et/ou la granulometrie (Illustration 49) dont il est possible d'observer que les argiles pliocènes et les sables ont des pôles diamétralement opposés.

Dans le premier cas, l'Illustration 50 met en évidence clairement les variations de pourcentages de smectites entre et au sein des mêmes des formations géologiques argileuses bretonnes, ce qui peut expliquer les répartitions du diagramme K-Th, et dans le second cas, l'Illustration 49 met en évidence l'influence de la granulométrie sur la répartition des mesures radiométriques gamma du Pliocène.

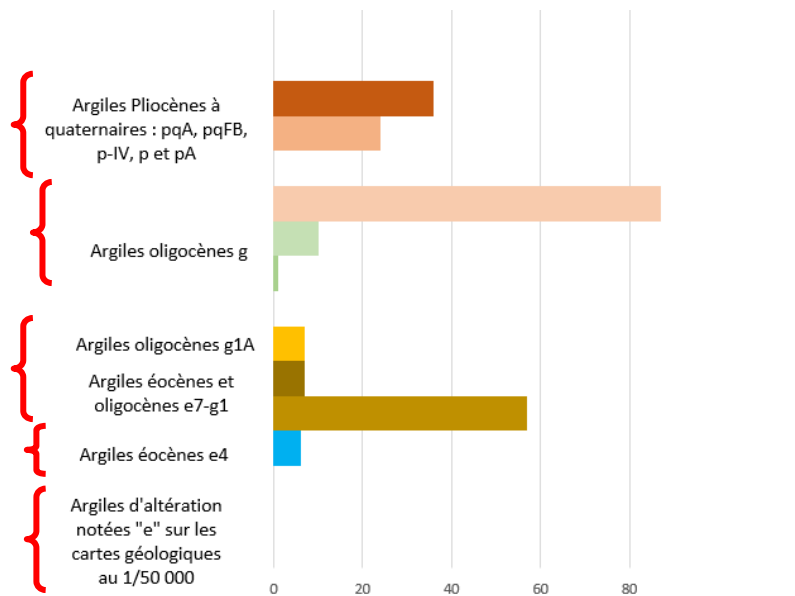


Illustration 50 : Pourcentage de smectite (analyses DRX) sur les argiles tertiaires bretonnes (Schroëtter et al., 2010a, b, c et d et cette étude).

L'analyse des mesures de radiométrie spectrale gamma et la cartographie de terrain permettent de dresser une carte des argiles plus précise que celle existante (Illustration 51), dont il reste à évaluer le pouvoir gonflant pour deux d'entre-elles : les argiles pliocènes et celles éo-oligocènes.

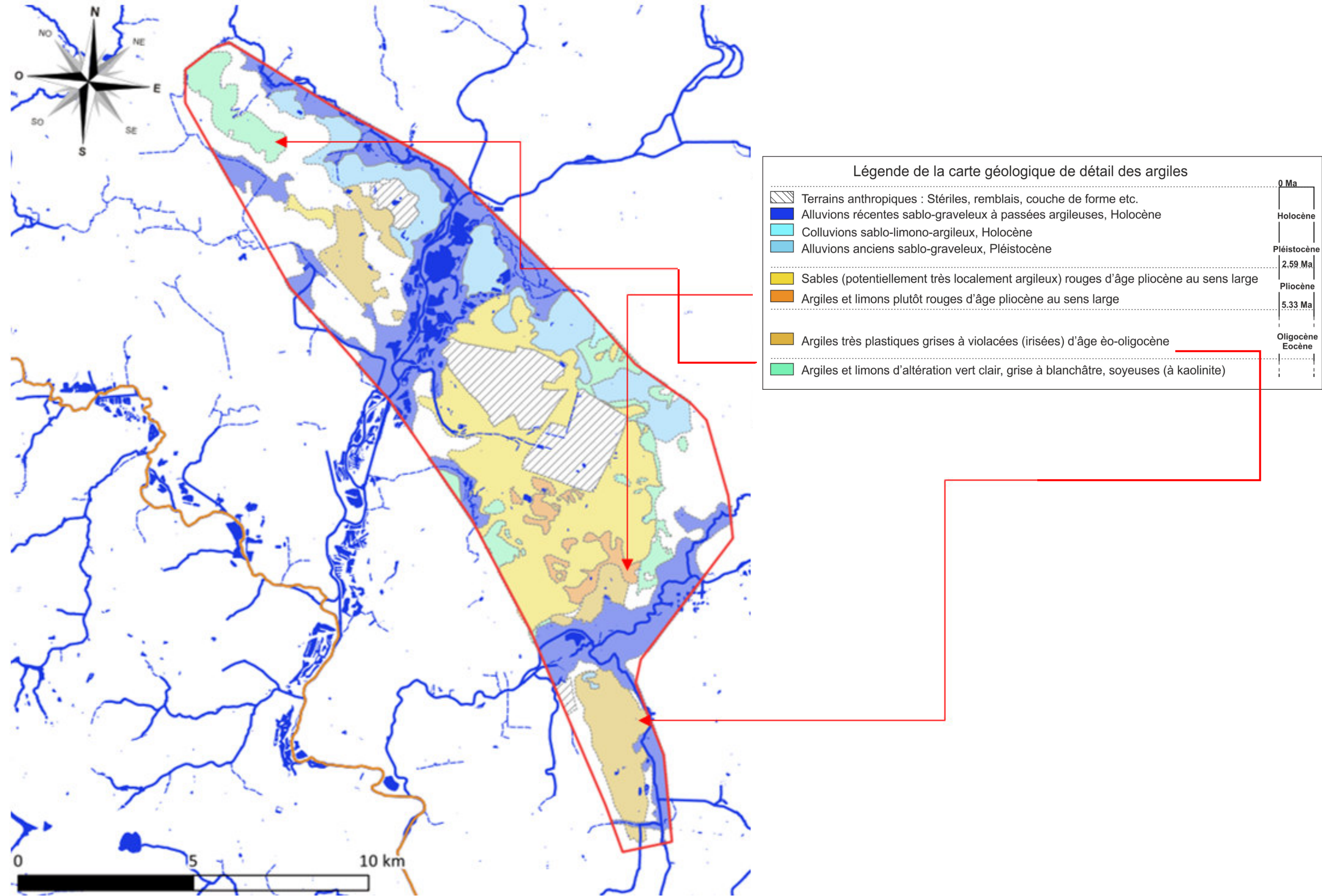


Illustration 51 : Nouvelle carte des argiles réalisée sur le secteur de Pont-Péan par la combinaison de la radiométrie spectrale gamma et de la cartographie traditionnelle.

4. Carte d'aléa

L'évaluation de l'aléa retrait-gonflement des formations géologiques argileuses en aléa fort et moyen du territoire de Rennes Métropole s'est faite en respectant la méthodologie nationale à savoir (Illustration 52) :

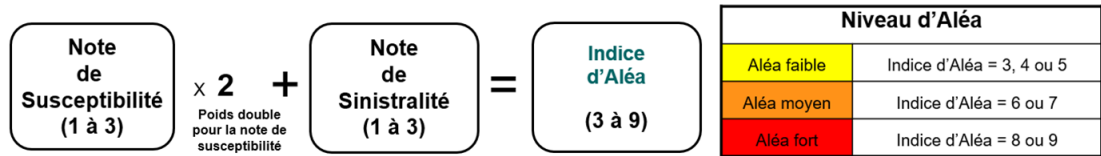


Illustration 52 : Formule de calcul de l'aléa retrait-gonflement pour chaque formation géologique argileuse

L'ensemble des données utilisées pour la notation de l'aléa de deux formations géologiques argileuses éo-oligocènes et pliocènes de l'Illustration 51, sont synthétisées dans les tableaux de l'Illustration 61.

4.1 Caractérisation mineralogique

Vingt analyses DRX ont été réalisées dans le cadre du présent projet. Elles viennent compléter les 66 analyses DRX réalisées lors de la cartographie de l'aléa retrait-gonflement des quatre départements bretons en 2010 (Schroëtter et al., 2010a, b, c et d ; Illustration 53).

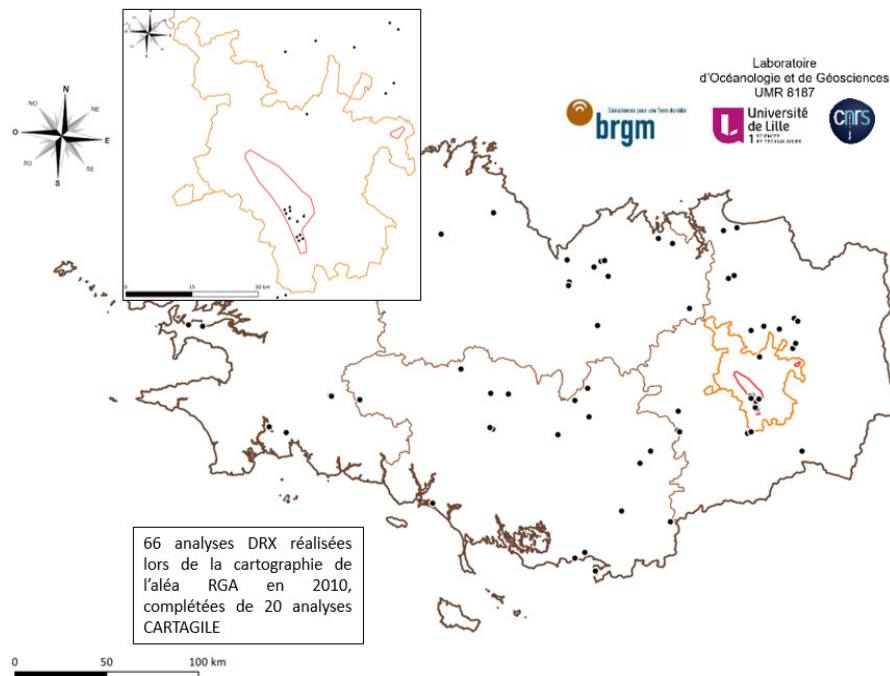


Illustration 53 : Les analyses DRX réalisées et utilisées pour la caractérisation minéralogique des deux formations géologiques argileuses identifiées dans CARTAGILE.

Les analyses ont été faites en partie par le Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) de l'université de Lille et par le BRGM (Illustration 53).

Les autres analyses disponibles sur le secteur d'étude, ont été celles réalisées lors du projet CINERGY (Bauer et al., 2011), produites sur la pile sédimentaire du forage carotté de 675 m de profondeur, à travers les argiles oligocènes et éocènes mais aussi celles liées à l'altération du socle briovérien (Illustration 54).

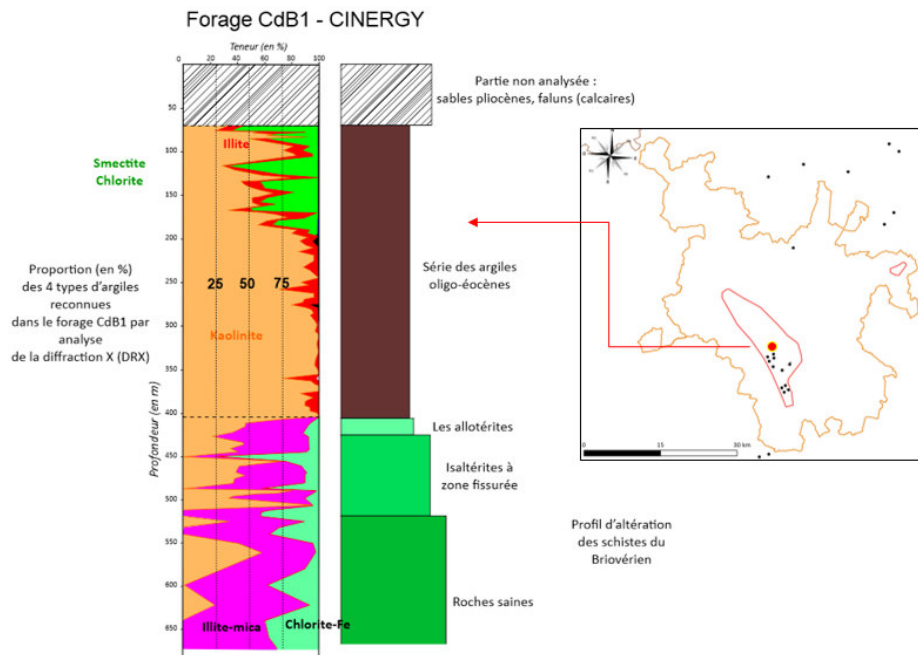


Illustration 54 : Log simplifié du forage CINERGY et analyses DRX des argiles (modifié d'après Bauer et al., 2011)

4.1.1. Minéralogie des argiles pliocènes

Les argiles pliocènes ont bénéficié de 9 analyses DRX dont les résultats sont indiqués dans le tableau (Illustration 55 : 8 réalisées dans le cadre de cette étude et une issue des précédentes études citées ci-dessus (Schroëtter et al., 2010a, b, c et d).

n°	Description lithologique	Mrx gonflants	Smectite (%)	Kaolinite (%)	Chlorite (%)	Illite et/	Vermiculite	Verm (precisions)	Min, acces,
1	Argile limoneuse rouge	0%	0%	73%	0%	27%	0%	N/C	N/C
2	Argile blanche	36%	36%	60%	0%	4%	0%	N/C	N/C
3	Argile kaki	87%	87% (87+0)	8%	0%	5%	0%	N/C	Quartz, FeO(OH)
4	Argile grise	0%	0%	86%	0%	14%	0%	N/C	N/C
5	Argile rouge	24%	24% (0+24)	24%	7%	45%	0%	N/C	FeO(OH)
6	Argile rouge à cailloutis	9,0%	0	36,0%	10,0%	45,0%	0,0%	9,0%	Quartz, Feldspaths
7	Argile rouge à cailloutis	9,0%	0	36,0%	6,0%	39,0%	9,0%	0,0%	Quartz
8	Sable argileux plio/IV	7,0%	0	51,0%	7,0%	33,0%	0,0%	7,0%	Quartz
9	Argile rouge à cailloutis	23,0%	0	40,0%	9,0%	28,0%	8,0%	15,0%	Quartz, Feldspaths

Illustration 55 : Minéralogie des argiles pliocènes par diffraction des rayons X (DRX)

Le pourcentage en minéraux gonflants permet de leur attribuer la note minéralogique suivant la grille de la méthode nationale suivante (Illustration 56).

% 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 56 : Critère de détermination de la note minéralogique des formations argileuses

Ainsi, à partir de 7 mesures valides sur les 9 disponibles, les argiles pliocènes ont un pourcentage de minéraux gonflants (smectite, vermiculite etc.) de **27.9 %**.

La **note minéralogique des argiles pliocènes au sens large** est donc de « **2** », donc une **susceptibilité minéralogique** de leurs minéraux argileux « **moyenne** ».

Cependant, il est important de garder en mémoire que localement, et c'est notamment le cas des **argiles pliocènes de couleur vert kaki** de **Saint-Jean-la-poterie** ou de **Pénestin** (deux échantillons ; Schroëtter, 2013) dans le Morbihan, pour lesquelles les pourcentages en minéraux gonflants de ces argiles peuvent être très élevés respectivement de **87, 88 et 89%**.

4.1.2. Minéralogie des argiles éo-oligocènes

Les argiles éo-oligocènes ont bénéficié de 10 analyses DRX (Illustration 57, réalisées dans le cadre de la présente étude, complétées par des analyses issues des précédentes études (Schroëtter et al., 2010a, b, c et d ; Bauer et al., 2014 – Programme CINERGY).

n°	Description lithologique	Mrx gonflants	Smectite (%)	Kaolinite (%)	Chlorite (%)	Illite et/ traces	Vermiculite	Verm (precisions)	Min, acces,
21	Forage CINERGY	69,2	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C
1	Argile verte	69,0	69% (69+0)	16%	0%	15%	0%	N/C	N/C
13	Forage CINERGY	63,5	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C
12	Forage CINERGY	57,3	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C
5	Argile d'alteration colluvionnée	57,0	57% (57+0)	39%	0%	4%	0%	N/C	FeO(OH)
17	Forage CINERGY	46,4	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C
24	Forage CINERGY	41,7	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C
26	Forage CINERGY	38,9	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C
8	Argile éocène	32,0	22,0%	60,0%	0,0%	17,0%	10,0%	0,0%	Quartz, Feldspaths
15	Forage CINERGY	31,8	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C

Illustration 57 : Minéralogie des argiles éo-oligocènes par diffraction des rayons X (DRX)

La répartition des argiles éocènes par rapport à celles oligocènes est complexe et difficilement distinguable, c'est pourquoi elles ont été regroupées. Ceci a un impact sur les pourcentages d'argiles gonflantes qui sont en règle générale plus importants dans les argiles oligocènes que dans celles éocènes et donc dans les argiles proches ou en surface.

La **moyenne arithmétique de ce pourcentage de minéraux gonflants** sur ces 10 analyses est donc de **50.7%**, ce qui confère à cette formation géologique argileuse, une **susceptibilité minéralogique de « 3 » (« forte »)** (barème dans l'illustration 56).

4.2 Caractérisation géotechnique

Les analyses géotechniques de type classification GTR 92 (Norme NF P11 300), ont été utilisées pour établir la note géotechnique de ces deux formations géologiques argileuses : éo-oligocènes et pliocènes (Illustration 58).

Indice de plasticité	Susceptibilité	Note	Valeur de bleu	Susceptibilité	Note
IP < 12	faible	1	< 2,5	faible	1
12 ≤ IP < 25	moyenne	2	2,5 à 6	moyenne	2
25 ≤ IP < 40	forte	3	6 à 8	forte	3
IP ≥ 40	très forte	4	> 8	très forte	4

Illustration 58 : Grille d'évaluation de la note géotechnique de la méthode nationale pour l'indice de plasticité et la valeur au bleu de méthylène.

Les valeurs au bleu de méthylène (VbS) et les indices de plasticité (Ip) sont les deux principaux paramètres géotechniques qui ont été utilisées.

4.2.1. Analyses géotechniques des argiles pliocènes

Les analyses utilisées pour l'évaluation de la note géotechnique sont :

- les données issues des études précédentes sur l'évaluation RGA des argiles d'Ille-et-Vilaine (Schroëtter et al., 2010c),
- et des analyses réalisées dans le cadre de cette étude.

La **moyenne** de l'**indice de plasticité (Ip)** pour ces 14 analyses GTR est de **23.1** et la **moyenne** de la **valeur au bleu de méthylène (VbS)** de **4.3** (Illustration 59).

Prof.	Description lithologique	Ip	VBS
1,8	Argile rouge à grisâtre	11	0
2,2	Argile rouge à grisâtre	27	6,2
2,5	Argile rouge à grisâtre	30	3,73
2,5	Argile rouge à grisâtre	32	0
2,5	Argile bariolée grisâtre	26	3,97
3	Argile rouge à grisâtre	14	0
3	Argile rouge à grisâtre	26	6,1
3	Argile bariolée grisâtre	22	1,69
3	Argile bariolée grisâtre	20	4,07
3	Argile bariolée grisâtre	23	3,9
3	Argile bariolée	26	4,53
3,5	Argile rouge à grisâtre	22	4,2
3,5	Argile rouge à grisâtre	22	4,59
4	Argile rouge à grisâtre	22	4,13

Illustration 59 : Valeurs de l'indice de plasticité (Ip) et de la valeur de bleu de méthylène (VBS) des argiles pliocènes dans le secteur de Chartres-de-Bretagne/Bruz

Ces moyennes permettent d'attribuer la **note géotechnique de 2 (moyen)** à la formation géologique des argiles pliocènes (selon la grille d'évaluation de l'illustration 58).

4.2.2. Analyses géotechniques des argiles éo-oligocènes

Les analyses utilisées pour l'évaluation de la note géotechnique sont :

- les données issues des études précédentes sur l'évaluation RGA des argiles d'Ille-et-Vilaine (Schroëtter et al., 2010c),
- et des analyses réalisées dans le cadre de cette étude.

La **moyenne** de l'**indice de plasticité (Ip)** pour ces 6 analyses est de **39.8** (Illustration 60).

Prof.	Description lithologique	Ip
1.5	argile brune à irisée	42
1.00	argile beige à taupe	40
1.50	argile beige à taupe	40
0.8	argile irisée	40
1.60	argile à passées sableuses	39
1.30	argile beige à ririsée	38

Illustration 60 : Valeur de l'indice de plasticité (Ip) des argiles éo-oligocènes dans le secteur de Pont-Péan

Cette moyenne des 6 valeurs les plus importantes de l'indice de plasticité, permet d'attribuer la **note géotechnique de 3 « fort »** mais il est important de constater que cette moyenne frôle la limite supérieure (selon la grille en Illustration 58), dont la note géotechnique **pourrait être de « 4 »**.

Parmi toutes les analyses disponibles, **un retrait linéaire (RI)** est disponible dans cette formation argileuse, avec pour valeur **1.2**, ce qui permettrait d'attribuer la **note de « 4 »**.

Après plusieurs calculs de moyennes arithmétiques et en faisant varier plusieurs critères :

- géographique : présence d'argiles plutôt éocènes qu'oligocènes,
- de profondeur : prélèvement fait réellement dans la formation géologique non altérée ou non mélangée à des alluvions/colluvions de surface etc.,

la **note géotechnique de « 3 » (fort)** semble être la note la plus raisonnable.

4.3 Détermination du niveau d'aléa RGA

4.3.1. Rappels du calcul de la note d'aléa RGA

L'Illustration 61 est la **synthèse de l'ensemble des tableaux ou grilles d'évaluation de l'évaluation nationale de l'aléa retrait gonflement** des formations géologiques argileuses.

Pour **chaque paramètre** (géologique, minéralogique et géotechnique) en fonction des valeurs de mesures réalisées ou utilisées pour chaque formation géologique argileuse (tableaux en noir de l'illustration 61), **correspond un niveau de classification**.

La **moyenne arithmétique** des notes **géologique**, **géotechnique** et **minéralogique** permet de déterminer **l'indice de susceptibilité** de la formation géologique argileuse à gonfler (IS).

De cet indice de susceptibilité est déduit la note de susceptibilité au RGA. Cette susceptibilité pourrait être qualifiée de prédisposition de la formation géologique argileuse au RGA.

Une seconde note (celle de la **sinistralité**) est calculée pour ces formations géologiques argileuses en fonction de la **densité des sinistres au kilomètre carré**.

Enfin, la **note d'aléa** sera une **moyenne pondérée** entre la **note de susceptibilité (x2)** et de **sinistralité**.

4.3.1. Les notes d'aléa RGA

Lors de la cartographie départementale en 2010, il n'avait pas été possible d'avoir une cartographie des variations de faciès (changement de lithologies au sein d'une même formation géologique). Il a été possible de faire cette distinction dans le cadre de la présente étude :

- grâce au changement d'échelle cartographique : passage du 1/50 000 au 1/10 000,
- et grâce au déploiement de la cartographie assistée de la radiométrie gamma.

Les **argiles éo-oligocènes** étaient déjà décrites comme une formation argileuse, ce qui n'a pas fait évoluer sa **note lithologique qui est restée à « 4 » (forte)**. Pour les **argiles pliocènes**, la radiométrie gamma a révélé leur existence et leur répartition en faisant apparaître les variations de nature de sols au sein du Pliocène.

La **note lithologique de « 4 »** a donc pu leur être attribuée, surtout qu'elles constituent un niveau assez continu et avec une épaisseur d'au moins 3 m.

Leurs **notes de sinistralité n'ont pas évoluées** puisqu'elles étaient déjà au maximum de **« 3 »**. Ces notes de sinistralité établies à partir de la densité de sinistres au kilomètre carré, ont été confortées par :

- (1) une **diminution de la superficie pour l'une** (les argiles pliocènes)
- (2) et une **augmentation des sinistres pour l'autre** (les argiles éo-oligocènes).

Enfin en reprenant **les notes minéralogique et géotechnique** (§ 4.1.1, 4.1.2 et § 4.2.1, 4.2.2), les notes ci-dessus (lithologique et de sinistralité), et en les reportant dans les grilles (tableaux d'évaluation nationale de l'aléa retrait gonflement ; **les argiles pliocènes** se voient attribuer la **note d'aléa retrait-gonflement de « 2 », aléa « moyen »** et de **« 3 »** pour les **argiles éo-oligocènes, aléa retrait-gonflement « fort »**.

L'illustration n°61 synthétise l'ensemble des grilles et des valeurs ayant permis cette évaluation de l'aléa RGA.

CARTographie de l'Aléa retrait-Gonflement des argILES sur le territoire de Rennes-Métropole

Tableau d'évaluation de la note minéralogique (pour mémoire)

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

Tableau d'évaluation de la susceptibilité (pour mémoire)

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

Fonction de la densité de sinistres au km² Pour les argiles éo-oligocènes, le nombre de sinistres ont quasi doublé ce qui maintient cette formation géologique avec niveau de sinistralité de 3. Pour les argiles pliocènes, le nombre de sinistres n'évolue pas mais la superficie de la formation géologique est réduite ce qui la maintient avec un niveau de sinistralité de 3. *Ce qui justifie des notes de 3 pour ces deux formations*

Tableau d'évaluation de l'aléa RGA

	Note lithologique	Note minéralogique	Note géotechnique	IS	Note sucept.	Note sinistralité	IA	Note aléa RGA	Note aléa RGA
Argiles pliocènes	4,0	2,0	2,0	2,7	2,0	3,0	7,0	2,0	Moyen
Argiles éo-oligocènes	4,0	3,0	3,0	3,3	3,0	3,0	9,0	3,0	Fort

	Nbre de mesures	%age d'argiles gonflantes	%
Argiles pliocènes	7,0	27,9	%
Argiles éo-oligocènes	10,0	50,7	%

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

Valeur de l'IA	Note Aléa RGA
3, 4 ou 5	faible
6 ou 7	moyen
8 ou 9	fort

	Ip	Vb	RI	Nbres de mesures
Argiles pliocènes	23,1	4,3	N/C	14 & 11
Argiles éo-oligocènes	39,8	N/C	1,2	16,0
Note géot. Arg. p.	2,0	2,0	N/C	N/C
Note géot. Arg. eo-ol.	3 à 4	N/C	4,0	N/C

Tableaux d'évaluation de la note géotechnique (pour mémoire)

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

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

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

Illustration 61 - Calcul du niveau d'aléa retrait-gonflement des formations argileuses identifiées dans CARTAGILE

4.4 La nouvelle Carte d'aléa retrait-gonflement

La nouvelle carte d'aléa retrait-gonflement pour les formations géologiques qui étaient en aléa initialement fort et moyen, est tracée à partir de la nouvelle carte synthétique des formations argileuses. Pour chacune des formations géologiques argileuses identifiées, une réévaluation de la classe d'aléa a été recalculée (chapitre 4.3 ci-dessus).

Le résultat de cette nouvelle carte est présenté sur les Illustration 62 et Illustration 63 et à une échelle de validité du 1/10 000 pour l'aléa « moyen » et « fort ». Les zones blanches de la carte correspondent donc aux formations géologiques en aléa « faible » ou *a priori* « nul » ou encore « non argileuses ».

Ainsi, les polygones initialement en aléa « moyen » du territoire de Rennes Métropole (hors secteur 12) ont vu leur aléa retrait-gonflement passer en aléa « faible ». Il s'agit des 11 premiers secteurs (de 1 à 11 ; Illustrations n°34 et n°63). Sur le secteur 12, l'aléa « moyen » a été réduit en surface alors que celle de l'aléa « fort » a augmenté.

La comparaison entre l'ancienne et la nouvelle carte d'aléa « moyen » et « fort » uniquement peut être faite à l'illustration 62.

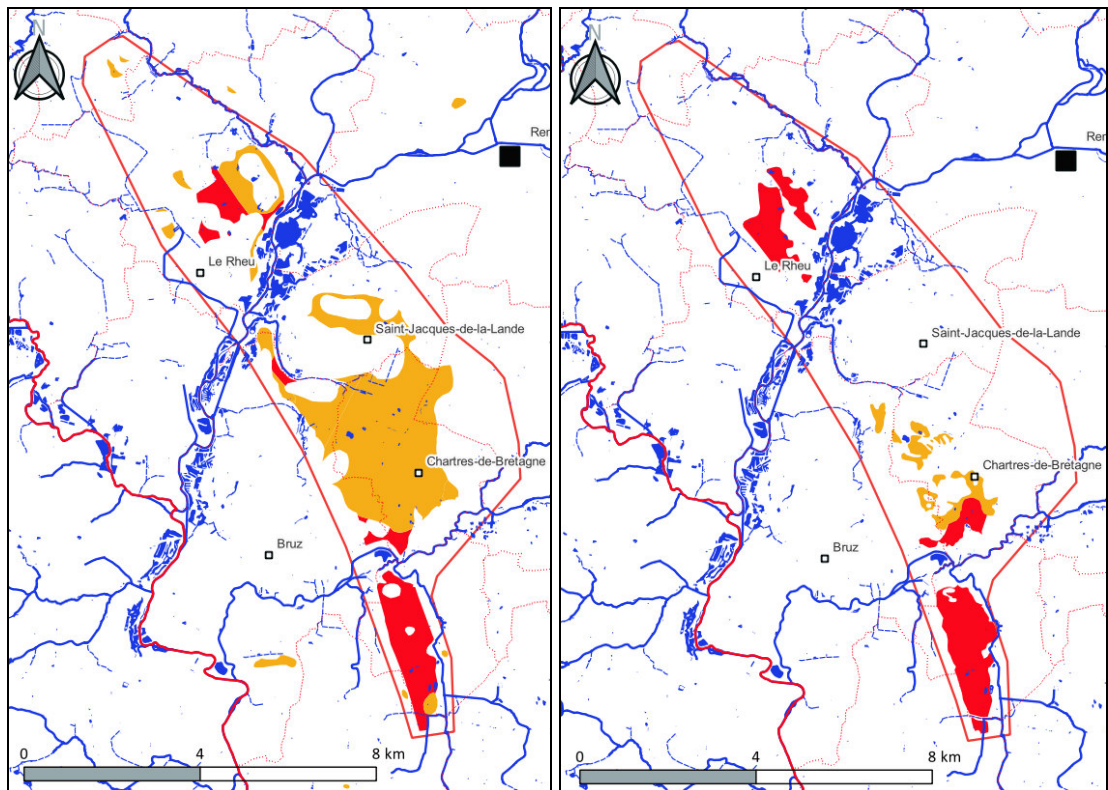


Illustration 62 : Cartographie des aléas moyen (en orange) et fort (en rouge) du secteur d'étude principal selon l'ancienne carte d'aléa retrait-gonflement (Schroëtter et al., 2010c), à gauche et nouvelle carte à droite.

La nouvelle carte d'aléa RGA de cette étude va donc être intégrée à la carte départementale (Illustration 63).

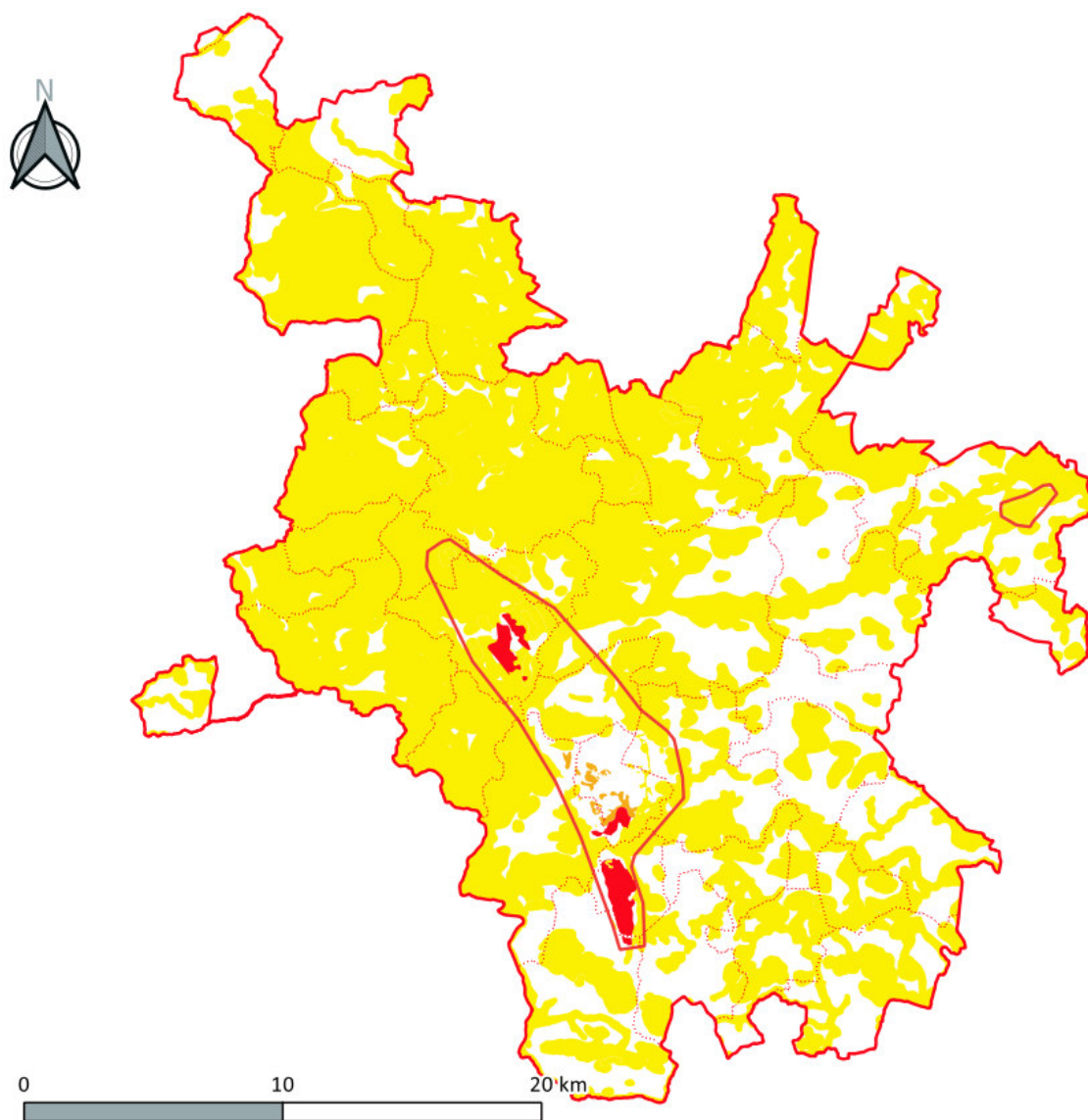


Illustration 63 : Nouvelle carte d'aléa retrait-gonflement des argiles du territoire de Rennes Métropole. Nouvelle carte proposée pour une mise à jour sur le site Georisques.gouv.fr.

Les communes impactées par un aléa « fort » sont les communes de :

- Le-Rheu (au nord) ,
- Chartres-de-Bretagne (au sud du bourg en bordure de la Seiche),
- Bruz (à l'est de la commune en bordure de la Seiche)
- Pont-Péan sur l'ensemble du bourg
- Et Laillé à l'est de la commune (Illustration n°64)

Les communes impactées par l'aléa « moyen » sont Chartres-de-Bretagne et Bruz (Illustration 64).

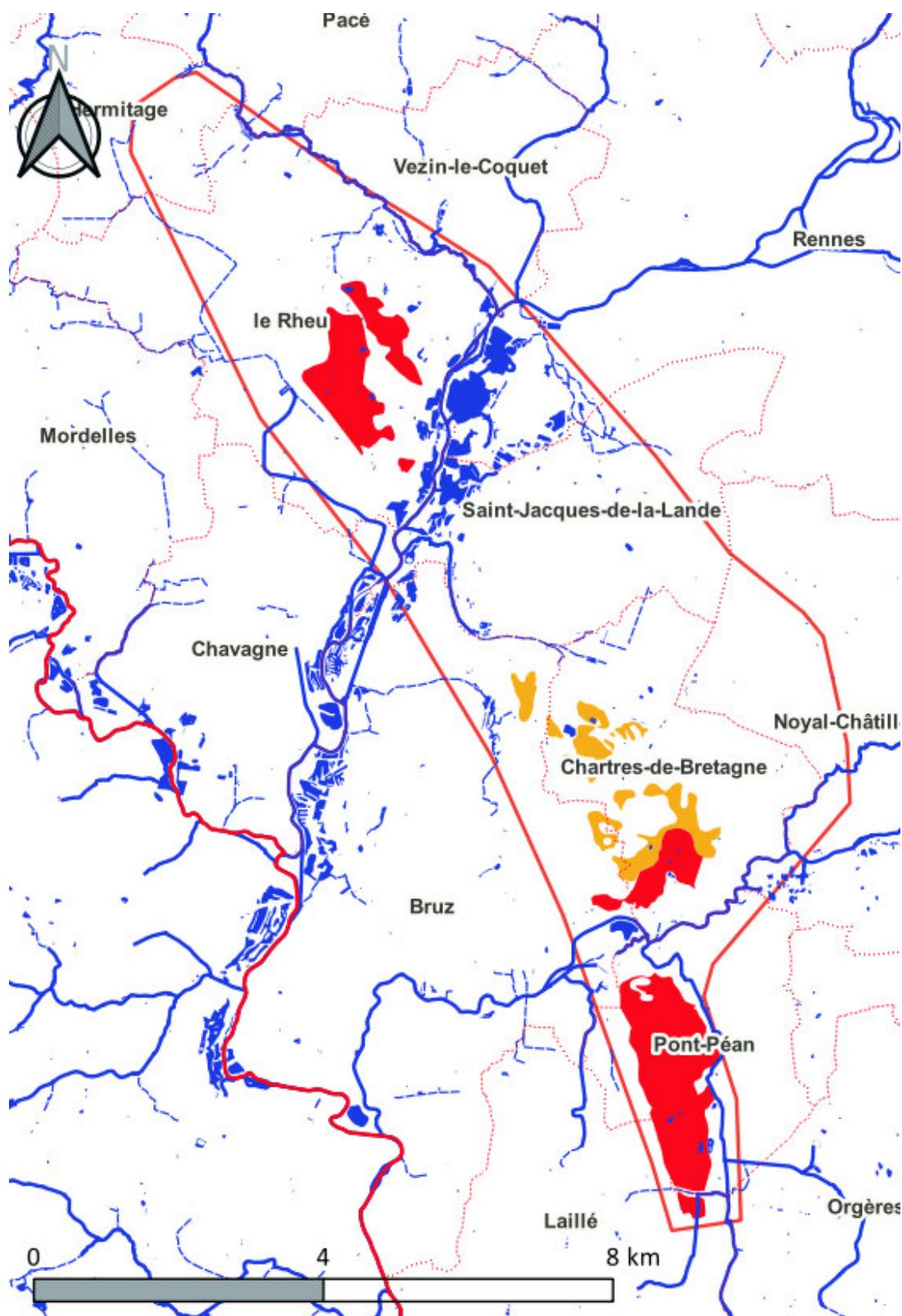


Illustration 64 : Nouvelle carte d'aléa retrait-gonflement (aléas moyen et fort uniquement) sur le secteur 12 .

5. Conclusion

La méthodologie mise en place dans le cadre du présent projet CARTAGILE a permis de mieux caractériser l'aléa retrait-gonflement et ceci avec une résolution qui peut être mise en application pour des documents d'information et d'urbanisme : PLUi, PPR, etc.

La cartographie à partir de la radiométrie spectrale gamma sur une superficie de 50 km² a permis de dresser une carte de haute résolution au 1/10 000 sur l'aléa « fort » et « moyen ». Les limites sont cependant le temps et l'effort demandés à l'opérateur. L'utilisation d'un drone pourrait être plus efficace, avec cependant des limites dans les secteurs très urbanisés.

Si les développements sur l'interprétation automatique (brevet CARGO) donnent des résultats en *domaine sédimentaire*, ils demandent encore une analyse des mesures U/K/Th en *domaine de socle* et leurs relations en fonction de la minéralogie et de la granulométrie des sols ou formations géologiques argileuses.

L'utilisation de la cartographie géologique traditionnelle et la compréhension de l'histoire géologique restent de bons compléments.

L'algorithme méthodologique mis en place ici pourrait être donc utilisé dans le cadre d'autres projets et notamment sur des secteurs géographiques avec peu de reliefs (Illustration 65).

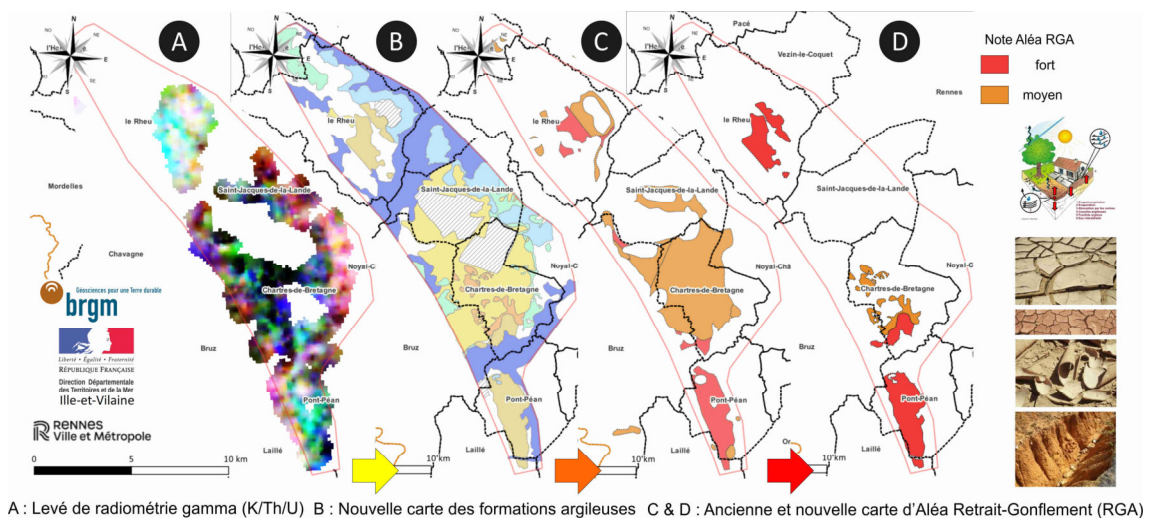


Illustration 65 : Algorithme méthodologique mis en place dans le projet CARTAGILE et répliquable dans des secteurs peu affleurants (aléas moyen et fort)

6. Bibliographie

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 tâche. Norme française NF P18-592

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

Bauer, H., Mougin B., Dezayes C., 2011, CINERGY : rapport géologique de fin de sondage, Rapport BRGM/RP-59528-FR, 79 p, 1 CD.

Boisson A, Lucassou F., avec la collaboration de. Schroëtter J.-M et Mougin B. (2020) - Identification et caractérisation des aquifères tertiaires et quaternaires stratégiques de Bretagne (projet ICARE). Rapport final. BRGM/RP-70336-FR, 76 p., 43 ill., 2 ann., 1 volume séparé.

Blanchet C., (1986), Inventaires bibliographiques des indices et gisements de matériaux tertiaires en Bretagne (complément à l'inventaire bibliographique « sables rouges » réalisé en 1985), 93 p.

Borne, V., Margerel, J.-P., et Ollivier-Pierre, M.-F., L'évolution des paléoenvironnements au Paléogène dans l'Ouest de la France. Le Bassin de Saffré-Nort-sur-Erdre (Loire-Atlantique, France), Bulletin de la Société géologique de France, t. 162, n°4, pp. 739-751.

Brault, N., Bourquin, S., Guillocheau, F., Dabard, M.-P., Bonnet, S., Courville, P., Estéoule-Choux J., et Stapanoff, F., (2004), Mio-Pliocene to Pleistocene paleotopographic evolution of Brittany (France) from sequence stratigraphic analysis : relative influence of tectonics and climate, *Sedimentary Geology*, 163, p. 175-210.

BRGM, (1989), Région de Bretagne, Plan Minier Breton 1986, Recherche d'argiles nobles en Ile-et-Vilaine, BRGM 89 SGN 266 BRE, 31 p., 18 ann.

BRGM, (1997), Mémento roches et minéraux industriels : Le Kaolin, Rap. BRGM, R 39949, 42 p., 7 fig., 8 tabl.

Cagnard, F., 2009, Carte géologique harmonisée du département de l'Ille-et-Vilaine. Notice technique, Rapport final, BRGM/RP-56656-FR.

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

Chassagneux D., Stieljes L. et Mouroux P., (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. et Ducreux G.H., (1996), Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse-pluie) à l'échelle

départementale. Approche méthodologique dans les Alpes de Haute-Provence. Rapport BRGM R39218, 33 p., 6 fig., 1 tabl., 4 ann., 1 pl. h.-t.

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

Donsimoni M., Clozier L. et Vincent M., (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.

Clément, J.-P., et Dadet, P., (1976), Recherche d'argiles en Bretagne, BRGM 76 SGN 342 BPL, 22 p., 6 ann., 3 cartes h.-t. 1/200 000.

Durand, S., (1960), Le Tertiaire de Bretagne : Etude stratigraphique, sédimentologique et tectonique, Thèse d'état, Mémoire de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne, 389 p.

Estéoule-Choux J., (1967), Contribution à l'étude des Argiles du Massif Armoricaire. Argiles des altérations et argiles des bassins sédimentaires tertiaires, Thèse de doctorat, Université de Rennes, série C, n° d'ordre 63, n° de série 26, 319 p.

Estéoule-Choux J. et Rozé, M., (1982), Sur l'origine de la kaolinite dans les sables rouges pliocènes du Massif armoricain, Bulletin de la Société géologique et minéralogique de Bretagne, ©, 14, 2 : p ; 91-101.

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

Estéoule-Choux J. et Blanchet, C., (1987), L'altération directe de muscovites et de biotites en Halloysite : Mise en évidence par microscopie électronique à balayage, Clay minerals, 22, p. 11-20.

Estéoule-Choux J., Bos P., et Blanchet C., (1988), Le Bassin tertiaire de Pipriac (Ille-et-Vilaine) : structure, mise en évidence de dépôts oligocènes, Géologie de la France, n°1, pp. 47-50.

Estéoule J., Estéoule-Choux J., et Perret P., (1972), Etude des formations superficielles du Massif Armoricaire : Caractères distinctifs et passage des altérites et des dépôts tertiaires aux formations quaternaires, Bulletin de la Société géologique et minérale de Bretagne, série C, vol.4, n° 2, pp.97-106.

FondOuest (Lithologie), 2008, Rapport de diagnostic géotechnique (Mission G5) : Diagnostic géotechnique - Phénomène de retrait-gonflement, Pont-Péan (35), 52 p.

Habib, (1992), Les sécheresses de 1989 et 1990. Revue Française de Géotechnique, n°53, p 7-30.

Haq B.U., Hardenbol J., Vail P.R., (1987) Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic, Science, 235 (1987), pp. 1156-1167.

Martelet G., Tourlière B., Lacquement F., Prognon F., Reninger P.A., (2015) Regolith lithology mapping in sedimentary environment using airborne gamma-ray, morphology and borehole data. Extended abstract in proceedings of the 1st Conference on Proximal Sensing Supporting Precision Agriculture, 6 - 10 September 2015, Turin, Italy.

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

Lacquement F., Prognon F., Tourlière B., Martelet G., Deparis J., Tissoux H., Reninger P.A. et Perrin J. (2015) - Méthodologie de cartographie du régolithe à partir de données radiométriques aéroportées en région Centre - Etablissement de cartes lithologiques. BRGM/RP-64932-FR, 130 p., 79 fig., 3 annexes, 1 CD.

Lacquement F., Prognon F., Tourlière B., Martelet G., Deparis J., Reninger P.A., Perrin J., Tissoux H. (2016), Méthodologie de cartographie du régolithe en domaine sédimentaire à partir des données spectrométriques aéroportées en région Centre. In 25e RST 2016, Caen, France, 24-28 Octobre 2016.

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.

Le Berre P., (1982), Recherche de gisements d'attapulgitite et de bentonite dans le Massif Armoricaire, Tome 1 et 2, Rapport BRGM, 82 SGN 175 GMX, 203 p.

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

Meynier A., (1940), La Formation du réseau hydrographique de la Vilaine, étude géographique, Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest, 47-1, pp. 153-184

Mougin, B., Allier, D., Blanchin, R., Carn, C., Courtois, N., Gateau, C. et Putot, E., (2008), SILURES Bretagne (Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines), Rapport final, Année 5, BRGM/RP-56457-FR.

Paquet F., Menier D., Estournès G, Bourillet J.-F., Leroy P. et Guillocheau F. (2010). Buried fluvial incisions as a record of Middle–Late Miocene eustasy fall on the Armorican Shelf (Bay of Biscay, France), Marine Geology, Volume 268, Issues 1–4, 15 January 2010, Pages 137-151

Prian J.-P., Donsimoni M. et Vincent 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.

Prognon F., Tourlière B., Reninger P.A., Martelet G., Lacquement F., Plat E., Gourdière S., Tissoux H., Deparis J., Perrin J. (2016). Méthodologie de cartographie de l'aléa retrait-gonflement à partir des données de spectrométrie gamma. In, GEOFCAN 2016a, Orléans, France - 08-09/11/2016.

Prognon F., Martelet G., Reninger P.A., Pannet P., Lacquement F. (2016). Apport d'analyse de gamma-spectrométrie à l'étude d'un mouvement de terrain : Cas d'étude

de Boursault (Champagne-Ardenne). In 25e RST 2016, Caen, France, 24-28 Octobre 2016b.

Schroëtter, J.-M. (2013) - Compréhension des mouvements de terrains sur la commune de Pénestin, Morbihan (56) retrait-gonflement ou érosion littorale. rapport final . BRGM/RP-62681-FR, 83 p., 2 ann.

Schroëtter, J.-M., Launay E., Desprez A., Imbault M., Le Roy S. et Plat E. (2010a) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département du Finistère. BRGM/RP-58916-FR, 118 p., 3 ann., 3 cartes h.-t.

Schroëtter, J.-M., Launay E., Ollivaud N., Imbault M., Le Roy S. et Plat E. (2010b) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département du Morbihan. BRGM/RP-58041-FR, 160 p., 4 ann., 3 cartes h.-t.

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

Schroëtter, J.-M., Poilvet J.-C., Launay E., Imbault M., Le Roy S. et Plat E. (2010d) - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département des Côtes d'Armor. BRGM/RP-58917-FR, 132 p., 3 ann., 3 cartes h.-t.

Schroëtter J.-M., 2013, avec la collaboration de C. Bondis et F. Pillois, Compréhension des mouvements de terrain de la commune de Pénestin, Morbihan (56) : Retrait-gonflement des argiles ou érosion littorale, Rapport final, BRGM/RP-62681-FR, 91 p., 35 fig., 2 ann.

Schroëtter J.-M., Rouainai D., Nombo S.-J. et Grumel J. (2017) - Evaluation des ressources minérales de Bretagne (action en direction du Schéma Régional des Carrières) - Rapport BRGM/RP-67165-FR., 185 fig., 5 tab., 10 ann., 308 pp.

Schroëtter J.-M., Boisson A., Lucassou F., Bader A.-G., Beccaletto L., Ouergui Y. et Tourlière B., (2020) - ANAFORE : ANALyse multicritère des données de FORages les plus productifs de bretagnE, Rapport final, BRGM/RP-70280-FR, 156 p., 105 ill., 2 annexes.

Thomas E., (1999), Evolution cénozoïque d'un domaine de socle : le Massif armoricain Apport de la cartographie des formations superficielles, Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, Rennes, FRANCE, 2 vol., 250 p.

Tissoux H., Prognon F., Martelet G., Tourlière B., Despriée J., Liard M., Lacquement F. (2017). Contribution de la spectrométrie gamma aéroportée à la caractérisation et à la cartographie des dépôts silice-clastiques fluviaux dans le Val de Loire et en Sologne (Centre, France). Quaternaire, 28, 87-103.

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

Trautmann F., Paris F., Carn A. (1999) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Rennes (317). Orléans : BRGM, 85 p. Carte géologique par TRAUTMANN F., PARIS F. (2000).

Trautmann F., Becq-Giraudon J.F., Carn A. (1994) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille Janzé (353). Orléans : BRGM, 74 p. Carte géologique par F. Trautmann (1994).

Vincent M., Le Nindre Y.-M., Meisina C. et Chassignol A.L., (1998), Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département des Deux-Sèvres, BRGM/RP-39967-FR, 89 p., 14 fig., 13 tabl., 6 ann., 2 cartes h.-t.

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

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

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

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

Annexe 1 - Mécanisme du RGA

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

À l'échelle microscopique, les minéraux argileux se caractérisent par une structure minéralogique en feuillets. Ceux-ci sont constitués d'un assemblage de silicates (SiO_2) et d'aluminates (Al_2O_3) entre lesquels viennent s'interposer des molécules d'eau. La majorité des minéraux argileux appartient à la famille des phyllosilicates 2:1 (deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique). La structure des assemblages cristallins est variable selon le type d'argile. Certains d'entre eux, telle que la montmorillonite, présentent des liaisons faibles entre feuillets, ce qui permet l'acquisition ou le départ de molécules d'eau.

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

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

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

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

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

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

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

- la limite de liquidité W_L sépare l'état liquide de l'état solide ; elle correspond à la teneur en eau à partir de laquelle l'argile commence à s'écouler sous son poids propre ;
- la limite de plasticité W_P sépare l'état plastique de l'état solide (avec retrait) ; elle correspond à la teneur en eau en deçà de laquelle l'argile ne peut plus se déformer sans microfissuration ; L'étendue du domaine plastique compris en ces deux valeurs est dénommée indice de plasticité : $IP = W_L - W_P$. Elle représente l'aptitude de l'argile à acquérir de l'eau.
- la limite de retrait W_R : lorsque la teneur en eau diminue en dessous de W_P , le volume de sol argileux se réduit progressivement, mais le matériau reste saturé en eau jusqu'à une valeur dite limite de retrait qui sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait. À partir de ce stade, si la dessiccation se poursuit, elle se traduit par une fissuration du matériau. En cas de réhydratation de l'argile, l'eau pourra circuler rapidement dans ces fissures. Au-delà de W_R , l'arrivée d'eau s'accompagnera d'une augmentation de volume, proportionnelle au volume d'eau supplémentaire incorporé dans la structure.

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

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

Dans le cas d'un sol saturé, la contrainte verticale totale, qui règne dans le sol à une profondeur donnée, est la somme de la pression interstitielle due à l'eau et d'une contrainte dite effective qui régit le comportement de la phase solide du sol (pression intergranulaire). La contrainte totale est constante puisque liée à la charge exercée par les terrains sus-jacents (augmentée éventuellement d'une surcharge due, par exemple, à la présence d'une construction en surface). L'apparition d'une pression interstitielle négative, appelée succion, se traduit donc par une augmentation de la contrainte effective (c'est-à-dire une consolidation du squelette granulaire) et une expulsion d'eau.

Un sol argileux situé au-dessus du niveau de la nappe, et qui est saturé, est ainsi soumis à une pression de succion qui lui permet d'aspirer l'eau de la nappe, par capillarité, et de maintenir son état de saturation. Cette pression de succion peut atteindre des valeurs très élevées à la surface du sol, surtout si celle-ci est soumise à une évaporation intense.

Annexe 2 – Susceptibilité au RGA

Elaboration de la carte de susceptibilité

Critères retenus

Les critères retenus pour l'élaboration de la carte de susceptibilité au phénomène de retrait-gonflement sont :

- la nature lithologique des formations affleurantes à sub-affleurantes,
- la nature minéralogique des argiles présentes dans la phase argileuse
- et le comportement géotechnique du matériau.

La carte de susceptibilité correspond donc à une hiérarchisation des formations géologiques argileuses en prenant en compte ces trois critères.

Les autres critères de susceptibilité au retrait-gonflement que sont : le contexte hydrogéologique, la topographie, la végétation ou le type de fondation des bâtis, ne peuvent pas être pris en compte à l'échelle pluricommunale.

Méthode de classification

Le document de départ pour élaborer la carte de susceptibilité est la carte des formations argileuses du territoire considéré.

Cette carte de susceptibilité consiste à la hiérarchisation les formations argileuses vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement, à partir des trois critères cités ci-dessus : lithologie, minéralogie et géotechnique.

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).

L'illustration ci-dessous résume la notation des trois critères pour évaluer la susceptibilité au retrait-gonflements des formations argileuses. La note de susceptibilité correspond à la moyenne arithmétique des notes de chaque critère.

Critère lithologique

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 aussi en partie l'hétérogénéité et l'épaisseur de la formation argileuse.

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.

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

Critère minéralogique

Les phénomènes de retrait-gonflement s'expriment préférentiellement dans les minéraux argileux appartenant au groupe des smectites (montmorillonite, beidellite, nontronite, saponite, hectorite, saucanite) et, dans une moindre mesure, au groupe des interstratifiés, alternance plus ou moins régulière de feuillets de natures différentes, lorsque ceux-ci comportent des smectites au sein de leur structure, par exemple smectites/illite ou illite/smectites. La vermiculite est aussi connue pour sa sensibilité au phénomène de retrait-gonflement. La caractérisation minéralogique des argiles se détermine par des analyses de diffractométrie aux rayons X.

Le critère minéralogique est basé sur le pourcentage moyen de minéraux gonflants (smectites et interstratifiés) présents dans la phase argileuse. Les notes de 1 à 4 sont attribuées en fonction des coupures suivantes :

% 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 67 – Hiérarchisation des formations en fonction du pourcentage de minéraux gonflants

Critère géotechnique

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 analyses géotechniques font souvent référence au guide GTR (1992) élaboré par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et qui permet une comparaison possible des matériaux entre eux. Dans sa première version de 1992, le guide GTR avait remplacé l'ancienne « Recommandation pour les terrassements routiers » (RTR) éditée en 1976. Le guide GTR a fait l'objet de mises au point et de modifications mineures dans sa deuxième version rééditée en juillet 2000.

Ce guide est aujourd'hui appliqué par l'ensemble de la profession (maîtrises d'ouvrages, maîtrises d'œuvres, ingénieries, entreprises) à la conception et à la construction d'ouvrages en terre dans le domaine des routes et autoroutes.

Dans les autres domaines, il est appliqué partiellement ou tient lieu pour le moins de règles de références, en complément à des prescriptions ou recommandations spécifiques à d'autres fonctions d'ouvrages.

L'illustration ci-dessous présente de façon synthétique la classification selon le GTR 92, et montre comment un sol sera de plus en plus argileux dans la classification (pointe de la flèche rouge).

La classification se fait de façon dichotomique à partir de la granulométrie du « plus gros au plus petit » : R : matériaux rocheux > C : matériaux rocheux mais avec matrice fine > La matrice fine qui est ensuite elle aussi subdivisée en deux parties avec : B : sols avec $D_{max} > 50 \text{ mm}$ > A : Sols avec $D_{max} < 50 \text{ mm}$.

Dans les matériaux de type A franchement argileux, la discrimination se fera en fonction de la valeur au Bleu de méthylène (Vb ou VBS) et de l'indice de plasticité (Ip), paramètres géotechniques qui seront décrits plus loin dans le manuscrit.

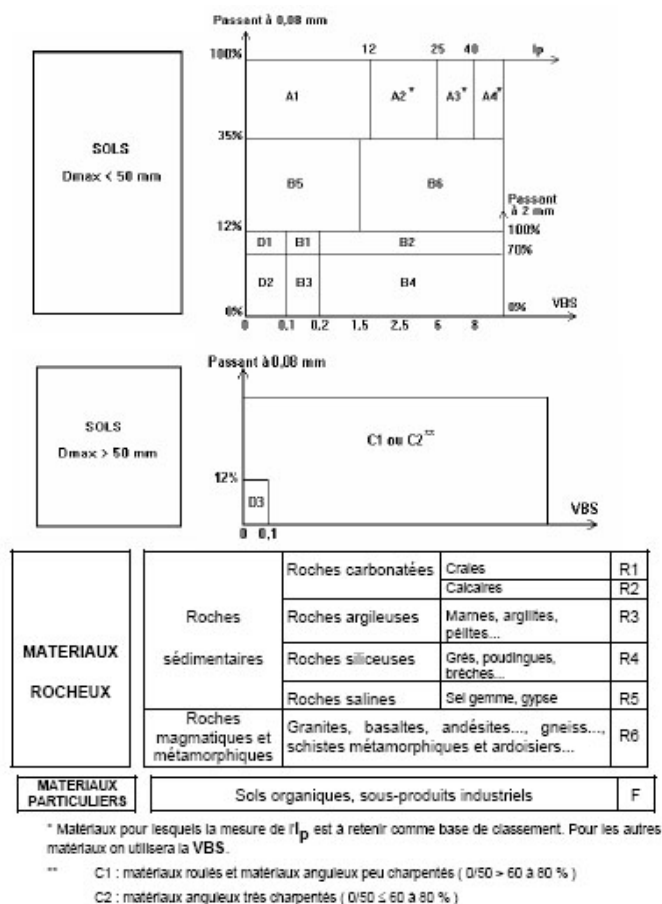


Illustration 68 - Classification des sols selon le guide GTR92 (source © LCPC)

Généralités sur les expertises de sinistres et les analyses géotechniques

Les expertises de sinistres et les analyses géotechniques ont deux objectifs particuliers et varient dans leurs contenus d'un bureau d'études à l'autre et suivant les objectifs assignés à l'étude. Cependant, la reconnaissance de sol se fait toujours par l'intermédiaire soit d'un sondage mécanique avec une sondeuse (foreuse) ou une pelle mécanique, soit manuel avec une tarière à main ou en fouille directe. Les objectifs de cette reconnaissance sont :

- (1) de déterminer **les caractéristiques intrinsèques du sol** en déterminant les limites d'Atterberg (qui permettent de calculer l'indice de plasticité IP), le retrait linéaire (RI), la valeur au bleu de méthylène (Vb ou VBS, qui traduit la capacité d'adsorption du sol) et le coefficient de gonflement (Cg), éventuellement complétés par une analyse granulométrique pour déterminer le passant à 80 μ m. Les analyses granulométriques inférieures à 2 μ m qui permettraient de déterminer la fraction argileuse du matériau et les analyses aux rayons X permettant de distinguer le pourcentage de minéraux gonflants, sont réalisées plus rarement car elles sont plus coûteuses ;
- (2) de **caractériser l'état du sol**, et notamment son état de dessiccation en effectuant des mesures de teneurs en eau à différentes 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.

Dans le cadre d'une cartographie des sols argileux susceptibles au retrait-gonflement, seuls sont pris en compte les caractéristiques intrinsèques du sol car (1) elles sont indépendantes de la période de prélèvement et (2) car il est question de déterminer la susceptibilité au retrait-gonflement de chaque formation de sol.

Les études géotechniques post sinistres sont souvent complétées par des essais in situ au pressiomètre ou au pénétromètre dynamique. L'objectif de ces essais est la vérification de la capacité portante du sol afin de déterminer le type de fondations et son dimensionnement. Ces résultats permettent ainsi le dimensionnement ultérieur de micropieux, si une reprise en sous-œuvre des fondations est nécessaire. Ces résultats ne sont cependant pas directement utilisés dans le cadre de la présente étude.

Pour résumer, les résultats intéressants le cadre de l'étude pour caractériser le comportement géotechnique du matériau vis à vis du phénomène de retrait-gonflement sont au nombre de **4** : **(1)** l'indice de plasticité IP, **(2)** la valeur de bleu de méthylène Vb ou VBS, **(3)** le coefficient de gonflement Cg et **(4)** le retrait linéaire RI.

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

Indice de plasticité (IP)

Il est calculé à partir des limites d'Atterberg qui mettent en évidence l'influence de la teneur en eau sur la consistance du matériau fin. Cet indice correspond à la différence entre la limite de liquidité (WL) et la limite de plasticité (Wp) du matériau. Il représente donc l'étendue du domaine plastique et donne une indication sur l'aptitude du matériau argileux à acquérir de l'eau.

On considère généralement (Chassagneux et *al.*, 1998) que la susceptibilité d'une argile vis-à-vis du retrait-gonflement varie en fonction de l'indice de plasticité (IP) de la manière suivante :

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

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

Essai au bleu de méthylène (Vb)

L'essai au bleu de méthylène permet 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. Il traduit en effet à la fois l'argilosité de l'échantillon et la teneur en minéraux gonflants de sa fraction argileuse. Malheureusement, les résultats d'essai de bleu sont relativement peu nombreux et il n'est pas toujours aisé de les interpréter de manière statistique.

Cet essai a été développé par Tran Ngoc Lan (1977) et adopté comme procédure d'essai officiel des Laboratoires des Ponts et Chaussées (norme AFNOR NF P 18-592). Il consiste à mesurer la capacité d'adsorption de 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 pour 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 (Vb) :

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

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 teneur en eau. Pendant la deuxième phase, 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.

Le retrait linéaire, noté RI, correspond à la pente de la droite donnant le tassement de l'échantillon en fonction de la diminution de teneur en eau, dans la partie où cette teneur en eau reste supérieure à la limite de retrait. Les coupures suivantes ont été proposées (Mastchenko, 2001) pour caractériser le potentiel de retrait avec ce paramètre.

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

Coefficient de gonflement (Cg)

L'essai de gonflement à l'œdomètre (ASTM 90, norme XP P 94-091) consiste à mesurer une amplitude de gonflement à la suite d'un apport d'eau. Il est par conséquent fortement conditionné par l'état initial de saturation en eau du sol considéré. En effet, pour un même sol, le gonflement relatif sera d'autant plus grand que le sol était initialement plus sec. Cette observation souligne l'intérêt d'associer ces essais avec la réalisation d'un profil hydrique. Ainsi la pression de gonflement ne constitue pas une caractéristique intrinsèque du sol, les valeurs dépendant fortement de l'état de saturation initial du sol considéré. Le potentiel de gonflement peut cependant être caractérisé par le coefficient de gonflement Cg (pente de la droite de déchargement observée dans un essai œdométrique) qui permet d'évaluer le potentiel de gonflement des formations argileuses identifiées :

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

Illustration 72 - Barème d'évaluation de la susceptibilité au retrait-gonflement en fonction du coefficient de gonflement de la formation

Annexe 3 – Analyses minéralogiques (DRX)

Protocole analytique :

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

1. Principe

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

2. Appareillage

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

3. Préparation des échantillons

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

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

4. Analyse semi-quantitative

L'identification des minéraux argileux est réalisée en confrontant la position des raies principales et des harmoniques sur les trois essais réalisés (Brindley & Brown, 1980). L'analyse semi-quantitative (Biscaye, 1965 ; Holtzappfel, 1985) est basée sur l'intégration du signal des pics principaux ($I/I_0 = 100$) caractéristiques de chacun des minéraux argileux en présence à

l'aide du logiciel MacDiff (Petschick, 2000). Les minéraux smectitiques sont caractérisés par un pic à 14Å sur l'essai naturel, qui gonfle à 17Å lors de l'essai glycolé et se rétracte à 10Å pour l'essai chauffé. L'illite est caractérisée par un pic basal à 10Å pour les trois essais (naturel, glycolé et chauffé). La chlorite est déterminée par la présence de 4 pics situés à 14Å, 7.1Å, 4.75Å et 3.54Å sur les trois essais. La kaolinite est caractérisée par deux pics à 7.2Å et 3.58Å sur les essais naturel et glycolé, qui disparaissent au chauffage. La reproductibilité de l'analyse, basée sur 3 mesures par diffraction des rayons X à partir de 5 aliquotes d'une même préparation, est de 5% (Bout-Roumazeilles, 1995).

Biscaye, P.E., 1965, Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans: Geological Society of America Bulletin, v. 76, p. 803-832.

Brindley, G.W., and Brown, G., 1980, Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-ray Identification: London, Mineralogical Society, p. 495.

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

Petschick, 2000, MacDiff, Freeware.

5. Prélèvement sur le terrain

Les prélèvements des échantillons sur le terrain ont été réalisés à l'aide d'une tarière à main.

La profondeur d'investigation a été toujours supérieure au mètre afin de s'assurer que l'échantillon était représentatif de la lithologie recherchée. Ainsi des fonds de fossés rafraîchis, des travaux en cours ou la connaissance du terrain du géologue régional ont permis d'atteindre ces objectifs.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Service géologique régional Bretagne
RENNES Atalante Beaulieu
2, rue Jouanet
35 700-Rennes
Tél. : 02 99 84 26 70 / Fax : 02 99 84 26 79